

Pablo Melogno
Pablo Rodríguez · Salomé Fernández
(compiladores)

Elementos de Historia de la Ciencia



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Pablo Melogno
Pablo Rodríguez · Salomé Fernández
(compiladores)

Elementos de Historia de la Ciencia

La publicación de este libro fue realizada con el apoyo de la Comisión Sectorial de Enseñanza (CSE) de la Universidad de la República.

© Los autores, 2011.

© Universidad de la República, 2011

Departamento de Publicaciones, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República (UCUR)

José Enrique Rodó 1827 - Montevideo CP: 11200

Tels.: (+598) 2408 57 14 - (+598) 2408 29 06

Telefax: (+598) 2409 77 20

www.universidadur.edu.uy/bibliotecas/dpto_publicaciones.htm

infoed@edic.edu.uy

ISBN: 978-9974-0-0760-4

Contenido

PRÓLOGO	7
AUTORES	9
1. ASTRONOMÍA Y FÍSICA EN PLATÓN	13
I. Contexto histórico y biográfico	13
II. Teoría del conocimiento, matemáticas y astronomía	16
III. El Timeo y el desarrollo de la cosmología griega	20
IV. Estructura del cosmos y ordenamiento planetario	23
V. Teoría de los poliedros	27
VI. Bibliografía	31
2. CIENCIA Y MÉTODO EN ARISTÓTELES	33
I. Breve biografía de Aristóteles	33
II. La obra de Aristóteles	34
III. La ciencia aristotélica	35
IV. La Física de Aristóteles	39
V. Cosmología aristotélica	49
VI. Las ciencias biológicas	53
VII. Bibliografía	58
3. LOS ELEMENTOS DE EUCLIDES Y EL DESARROLLO DE LA MATEMÁTICA GRIEGA	61
I. Contexto histórico-biográfico	61
II. El proceso de sistematización de la Geometría	64
III. Estructura de los Elementos	67
IV. Procedimientos operativos	72
V. De los elementos a las geometrías no euclidianas	75
VI. Bibliografía	79
4. LA TEORÍA PLANETARIA DE CLAUDIO PTOLOMEO	81
I. Vida	81
II. Obra	82
III. El Almagesto	83
IV. El explanandum: el movimiento de los planetas	85
V. El explanans: el modelo de epiciclos y deferentes	91
VI. Las leyes de la teoría	100
VII. Las constantes de cada modelo	103
VIII. Conclusión	109
IX. Bibliografía	110
5. CIENCIA Y FILOSOFÍA EN LA EDAD MEDIA. LA DISPUTA ENTRE RAZÓN Y FE	111
I. Introducción	111
II. Dilucidando contextos	114
III. La recuperación y traducción del saber clásico	121
IV. La asimilación de la filosofía y la ciencia antiguas: la polémica razón y fe	123
V. El análisis de la intensificación y la disminución de las cualidades	129
VI. La teoría del ímpetus	132
VII. A modo de conclusión: medievales y modernos	134
VIII. Bibliografía	135

6. DE LA ALQUIMIA A LA QUÍMICA _____	137
I. Introducción _____	137
II. Alquimia en la Antigüedad _____	138
III. Alquimia en la Edad Media _____	152
IV. Alquimia en la Edad Moderna _____	156
V. Y después... _____	164
VI. Recapitulación _____	165
VII. Bibliografía _____	166
7. LEONARDO DA VINCI.	
UN ESTUDIO DE LA UNIDAD DE SU PENSAMIENTO Y SU LUGAR EN LA HISTORIA DE LA CIENCIA _____	167
I. Introducción _____	167
II. Breve contexto histórico _____	167
III. Reseña biográfica: Leonardo da Vinci (1452-1519) _____	171
IV. ¿Leonardo científico? Visiones y re-visiones historiográficas _____	173
V. Leonardo y las ciencias de la naturaleza _____	183
VI. Incursiones en la matemática y la geometría (perspectiva, óptica, proporción) _____	189
VII. Indagaciones en la astronomía y aportes a la física _____	192
VIII. Leonardo técnico: artes bélicas, arquitectura, mecánica, hidráulica y vuelo _____	194
IX. Bibliografía _____	200
8. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA COPERNICANA _____	203
I. A modo de introducción _____	203
II. Breve Reseña biográfica _____	206
III. Revolución Copernicana _____	210
IV. Hipótesis fundamentales de la teoría copernicana _____	213
V. Objeciones a la teoría copernicana _____	222
VI. Bibliografía _____	228
9. GALILEO GALILEI. EVIDENCIA EXPERIMENTAL MATEMÁTICAMENTE ANALIZADA EN LA FILOSOFÍA NATURAL DE PRINCIPIOS DEL SIGLO XVII _____	229
I. Vida y contribuciones científicas de Galileo Galilei _____	229
II. Contexto histórico-filosófico de la ciencia de Galileo _____	234
III. Galileo y el ideal aristotélico de ciencia demostrativo en la aplicación de la investigación del mundo natural _____	235
IV. Galileo: observación, experimentación y abstracción _____	237
V. Evidencia observacional y probabilidad en el establecimiento de nuevos fenómenos celestes _____	241
VI. La rotación magnética de la Tierra y la interpretación de Galileo de la evidencia experimental de William Gilbert _____	244
VII. Bibliografía _____	246
10. J. KEPLER (1571-1630).	
LA CREATIVIDAD Y EL RIGOR EN LA BÚSQUEDA DE LA ARMONÍA DEL MUNDO _____	249
I. Introducción _____	249
II. Desvelar el orden del mundo _____	250
III. El tribunal de la experiencia _____	254
IV. A la búsqueda de la armonía _____	260
V. Método, estilo y controversias _____	262
VI. Preparación de su legado _____	264
VII. Bibliografía _____	268

I 1. ANTONIE-LAURENT LAVOISIER (1743 ² -1794) Y LA QUÍMICA DEL SIGLO XVIII	269
I. Presentación	269
II. Un triángulo singular: Lavoisier, ciencia y sociedad	270
III. Una doble reforma: la nomenclatura y la enseñanza de la química	278
IV. Epílogo: A modo de conclusión	284
V. Fuentes y Bibliografía	285
I 2. DARWIN Y EL EVOLUCIONISMO	289
I. Introducción	289
II. Breve historia de la teoría evolutiva	289
III. Biografía	292
IV. Acogida de <i>El Origen de las Especies</i>	299
V. La evolución por medio de la selección natural	303
VI. Tabla: principales obras	307
VII. Bibliografía seleccionada	307
I 3. EL PROBLEMA DEL V POSTULADO Y EL SURGIMIENTO DE LAS GEOMETRÍAS NO EUCLIDIANAS	309
I. Introducción	309
II. El problema del V postulado	309
III. El nacimiento de las geometrías no euclidianas	318
IV. Geometría hiperbólica y elíptica	322
V. Desarrollos posteriores	329
VI. Consecuencias filosóficas	331
VII. Bibliografía	335
I 4. EINSTEIN Y LA REINVENCIÓN DE LA FÍSICA	337
I. Einstein y la física	337
II. Einstein, la política y la guerra	348
III. Finale	355
IV. Bibliografía	356
I 5. LOS INICIOS DE LA FÍSICA CUÁNTICA Y EL PROBLEMA DE SU INTERPRETACIÓN	359
I. Introducción	359
II. Surgimiento histórico de la Física Cuántica	359
III. El debate Einstein-Bohr	378
V. Bibliografía	387
I 6. LA TEORÍA DEL BIG BANG EN LA RED DEL CONOCIMIENTO	391
I. Mapas del universo	391
II. Corrimiento al rojo de las galaxias	401
III. Teoría del Big Bang	402
IV. Efecto horizonte y escenario inflacionario: un triángulo amoroso entre cosmología, astrofísica y física de partículas	410
V. Otras interpretaciones	414
VI. Materia oscura y futuro del universo	415
VII. Conclusiones	416
VIII. Bibliografía	417
ÍNDICE ANALÍTICO	419
ÍNDICE DE NOMBRES	426

Prólogo

Es con mucha satisfacción que presentamos al público esta primera edición de *Elementos de Historia de la Ciencia*; expresando desde ya nuestro agradecimiento a los académicos de Uruguay, Argentina, España y México que presentaron sus valiosas contribuciones a esta obra, así como a la Comisión Sectorial de Enseñanza y a la Escuela Universitaria de Bibliotecología y Ciencias Afines de la Universidad de la República.

El presente volumen está destinado tanto a estudiantes de humanidades y ciencias sociales sin formación científica, como a estudiantes de ciencia o científicos sin formación histórica o filosófica, y en general a todos quienes estén dando sus primeros pasos en el campo de los estudios sobre historia y filosofía de la ciencia. Ha sido concebido con el objetivo de dar cuenta de episodios, procesos y personajes de primer orden en el desarrollo histórico del conocimiento científico. En este sentido, se ha enfatizando hasta cierto punto el tratamiento de procesos históricos que han tenido un marcado protagonismo en los abordajes de la historia y la filosofía de la ciencia a lo largo del siglo XX; tal es el caso de la revolución copernicana, el desarrollo de la geometría de Euclides a las geometrías no euclidianas, y el advenimiento de la mecánica cuántica.

No obstante esto, el lector echará de menos la presencia de algunos personajes o tradiciones destacadas en la historia de la ciencia, como Pitágoras, Arquímedes, Mendel, Newton o Pasteur, por sólo nombrar algunos de los que no tuvieron cabida en esta primera edición. En este sentido, cabe consignar que más allá de las naturales limitaciones editoriales, toda historia de la ciencia es de carácter parcial, respondiendo los criterios de parcialización al concepto de ciencia desde el cual se construye el relato histórico. Y si bien este volumen no está estructurado desde un concepto de ciencia que regule sus contenidos, parte sí de la premisa según la que un texto introductorio de historia de la ciencia debe hacer hincapié en los personajes y tradiciones históricas que marcaron momentos de ruptura y revolución en el desarrollo del conocimiento científico, y esto implica necesariamente tomar decisiones metodológicas que excluyen algunos momentos y personajes de la historia de la ciencia a favor de otros.

Notará el lector asimismo una ostensible heterogeneidad de abordajes, que marcan diferencias pronunciadas entre los capítulos que componen la obra, tanto en aspectos conceptuales como metodológicos. Ello es en parte consecuencia de una decisión deliberada de los compiladores, que no dieron a los autores de cada capítulo más indicación que la de elaborar un material introductorio para un curso de historia de la ciencia destinado a estudiantes de grado de humanidades. Esta premeditada ponderación de la diversidad responde al hecho de que, si bien es esperable que una publicación como la presente mantenga ciertas características básicas de orden y formato, es igualmente importante que sea fiel reflejo del *estado del arte*, en el que se encuentra la disciplina a la que la obra pertenece.

En este sentido, la historia de la ciencia es en primer término una disciplina en la que conviven múltiples abordajes y estilos heterogéneos de conceptualizar la ciencia, inscriptos en tradiciones diferenciadas y en algunos casos antagónicas, que abarcan desde los programas

fundacionales de George Sarton o Alexander Koyrè, hasta propuestas tan disímiles entre sí como las de Irme Lakatos, John Bernal o Michel Serrès, sin contar a los indispensables Karl Popper y Thomas Kuhn.

En segundo término, el devenir histórico del conocimiento científico como campo de estudios no es patrimonio de una sólo disciplina, sino que la historia de la ciencia se nutre y mantiene en contacto fluido y más o menos sistemático —dependiendo del caso y de la concepción que se tenga de la disciplina— con áreas como la historia, la filosofía, la antropología, o la sociología entre otras.

En vistas de esto, los compiladores buscaron dar a los autores de la obra un margen de libertad de trabajo lo suficientemente amplio como para que el producto final permitiera reflejar tanto la variedad de abordajes posibles dentro de la historia de la ciencia como el carácter multidisciplinar del campo de estudio. Es por ello que el lector no encontrará un texto con un formato sobredefinido, en el que se le de a todos los temas un tratamiento similar en lo conceptual ni en lo metodológico. Por el contrario, encontrará enfoques claramente diferenciados en aspectos sustantivos, en el marco de un formato que no sólo busca dar cuenta de la diversidad de abordajes, sino también estimular la polémica y la evaluación crítica.

La obra contiene un índice de nombres y un índice analítico, herramientas cuya inclusión se consideró indispensable para un acercamiento metodológicamente controlado a un texto de gran tamaño. En el índice de nombres se consignan no sólo los científicos mencionados en los diferentes capítulos, sino también personajes históricos, literarios o políticos; se incluyen igualmente los nombres de los traductores, prologuistas y editores de obras consignados en la bibliografía de cada uno de los capítulos.

Para el índice analítico se tomó un criterio más restrictivo, en el entendido de que un índice exhaustivo puede volverse una herramienta inmanejable además de muy poco útil. Por esto, el índice incluye solamente términos teóricos relevantes o representativos de cada una de las teorías tratadas a lo largo del libro, no incluyendo nombres de disciplinas, objetos generales de estudio o términos teóricos de importancia secundaria. Los compiladores son concientes de lo controversial de haber tomado un criterio semejante, no obstante lo hicieron a sabiendas de que en la elaboración de un índice analítico siempre existen diferentes alternativas metodológicas, cuyos resultados pueden ser discutibles.

Montevideo, noviembre de 2010

Autores

José María Adrover (Madrid, 1984). Licenciado en Biología por la Universidad Complutense de Madrid con las especialidades de Neurobiología y Biología Sanitaria. Actualmente trabaja en el Centro de Investigaciones Biológicas del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), en Madrid, e investiga los mecanismos moleculares de la competencia celular. Mail: niseto@gmail.com

Adriana Assandri (Montevideo, 1978). Profesora de Historia, egresada del Instituto de Profesores «Artigas». Master en Historia del Arte por la Universidad de Ámsterdam-Países Bajos. Se ha desempeñado como docente de Historia de la Ciencia en la Escuela Universitaria de Bibliotecología y Ciencias Afines de la Universidad de la República, Uruguay. Mail: adriana.assandri@gmail.com

Marina Camejo (Montevideo, 1977). Profesora de Filosofía, egresada del Instituto de Profesores «Artigas». Docente de Epistemología e Historia y Filosofía de la Educación en la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Docente de Métodos Lógico-Cuantitativos en la Licenciatura en Ciencias de la Comunicación. Universidad de la República, Uruguay. Mail: letiem@gmail.com

Christián C. Carman (Buenos Aires, 1973). Profesor en Filosofía por la Universidad Católica Argentina y Licenciado en Filosofía por la misma Universidad. Se doctoró en la Universidad Nacional de Quilmes (2004). Ha realizado estudios de posgrado en la Università del Sacro Cuore de Milán con una Beca del Gobierno Italiano, y posdoctorales en la Universidad de San Pablo, Brasil, y en la University of Puget Sound, Estados Unidos. Actualmente es Profesor Adjunto de Filosofía de las Ciencias en la Universidad Católica Argentina, investigador del CONICET e investigador adjunto de la Universidad Nacional de Quilmes. Ha publicado artículos en revistas nacionales e internacionales y participado en numerosos proyectos de investigación, tanto nacionales como internacionales. Mail: ccarman@gmail.com

Elena Díez de la Cortina Montemayor (Madrid, 1969). Licenciada en Filosofía por la Universidad Complutense de Madrid. Master Universitario: Especialista en Intervención Psicoanalítica por la Universidad Nacional de Educación a Distancia-Madrid. Es directora de la Editorial Manuscritos: www.editorialmanuscritos.com y del portal de filosofía en Internet Cibernous: www.cibernous.com. Mail: admin@cibernous.com

Soledad Esteban Santos. Doctora en Química y Licenciada en Sociología por la Universidad Complutense de Madrid. Profesora Titular de Química General y Técnicas Experimentales en Química en el Departamento de Química Orgánica y Bio-Orgánica de la Facultad de Ciencias dentro de la Universidad Nacional de Educación a Distancia y Directora de Cursos de Formación de Profesorado en la misma universidad. Ha escrito varios artículos sobre temas de Química e Historia de la Química y es autora entre otros del volumen *Introducción a la Historia de la Química* (UNED, 2001). Mail: sesteban@ccia.uned.es

María Salomé Fernández Batista (Montevideo, 1979). Profesora de Historia egresada del Instituto de Profesores Artigas. Docente de Historia de la Ciencia en la Escuela Universitaria de Bibliotecología y Ciencias Afines de la Universidad de la República, Uruguay. Mail: salomebatista2@hotmail.com

Godfrey Guillaumin (Ciudad de Guanajuato, 1967). Doctor en Filosofía (UNAM), con especialidad en el área de Historia y Filosofía de la Ciencia. Realizó una estancia postdoctoral en el Center for Philosophy of Science de la Universidad de Pittsburg-EEUU y estancias de investigación en la Universidad de Chicago, en la Universidad de Texas en Austin y en la British Library de Londres. Es profesor-investigador del Departamento de Filosofía de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa-México. Es autor de diversos libros y artículos de su especialidad, como *El surgimiento de la noción de evidencia* (UNAM, 2005), *Raíces metodológicas de la teoría de la evolución de Charles Darwin* (Anthropos/UAM, 2009). Sus líneas de investigación abarcan la Historia de la Ciencia (Hipocráticos, Aristóteles, Ptolomeo, Gilbert, Boyle, Newton, Darwin, Lyell), Historia y Filosofía de la Metodología (Siglos XVII-XIX) e Historia de la Filosofía de la Ciencia (segunda mitad del siglo XX). Mail: guillaumin.godfrey@gmail.com

Esteban Magnani (Buenos Aires, 1973). Licenciado en Ciencias de la Comunicación (UBA). Docente en la cátedra de Moreno de la materia *Principales Corrientes del Pensamiento Contemporáneo* de la licenciatura en Ciencia de la Comunicación. Realizó un MA in Media & Communication por la London University. Es escritor, periodista y colaborador habitual del diario *Página/12*. Colaboró con Naomi Klein y Avi Lewis en el documental sobre nuevas formas de organización social en la Argentina realizado para la cadena CBC. Es autor de libros, sobre todo, de divulgación científica: *10 Teorías que conmovieron el mundo*, *Historia de los Terremotos*, entre otros. Mail: estebanmagnani@gmail.com

Pablo Melogno (Melo, 1979). Profesor de Filosofía, egresado del Instituto de Profesores «Artigas» y Licenciado en Psicología por la Facultad de Psicología-Udelar. Se ha desempeñado como docente de Historia y Filosofía de la Ciencia en la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación y de Lógica en el Instituto de Profesores Artigas. Actualmente es Profesor Adjunto de Epistemología e Historia de la Ciencia en la Escuela Universitaria de Bibliotecología y Ciencias Afines de la Universidad de la República, Uruguay. Ha escrito diversos artículos en temas de Epistemología, Innovación, e Historia y Filosofía de la Ciencia, en revistas de Uruguay, Brasil, Argentina, España y México. Mail: pmelogno@gmail.com

Hernán Miguel (Buenos Aires, 1956). Licenciado en Física. Doctor en Filosofía. Presidente de la Asociación de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur en el período 2007-09. Actualmente es Profesor Titular de Introducción al Pensamiento Científico del Ciclo Básico Común de la Universidad de Buenos Aires y de Filosofía e Historia de la Ciencia y la Tecnología en el posgrado de la Universidad Nacional del Comahue. Dirige y ha dirigido proyectos de investigación relativos a la epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales y en causación y leyes naturales. Es autor y coautor de distintos libros para la enseñanza de la Física y de la Filosofía de la Ciencia. Mail: ciencias@retina.ar

Leonardo Moledo (Buenos Aires, 1947). Licenciado en Ciencias Matemáticas en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Fue profesor titular de Periodismo Científico en la Facultad de Ciencias Sociales de la UBA y profesor de Problemática de la Ciencia y Periodismo Científico en la Universidad Nacional de Entre Ríos. De 2001 a 2007 fue el Director del Planetario Galileo Galilei de Buenos Aires y Profesor de la Universidad Nacional de Quilmes. Es autor de una importante cantidad de artículos y libros de temas científicos, entre los que se cuentan *De las Tortugas a las estrellas* (AZ, 1994) y *Los mitos de la ciencia* (Planeta, 2008). Mail: leonardomoledo@gmail.com

Inés Pellón González (Guadalajara- España, 1960). Licenciada y Doctora en Ciencias (Sección Químicas). Profesora titular de Escuela Universitaria del Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente en la E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Ingenieros de Telecomunicaciones-Universidad del País Vasco. Autora de los libros *Un químico ilustrado. Lavoisier* (2002); *El hombre que pesó los átomos. Dalton* (2003), entre otros, y coautora de *Espionaje, Ciencia y Tecnología en Bergara (1777-1783)* (1999). Desde 1999 ocupa el cargo de Tesorera en la Junta Directiva de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas. Mail: ines.pellon@ehu.es

Nicolás Olszevicki (Buenos Aires, 1986). Estudió en el Colegio Nacional de Buenos Aires del que egresó con el título de bachiller especializado en Ciencias Humanísticas. Actualmente es estudiante de Letras y Filosofía en la Universidad de Buenos Aires, colabora desde 2007 para la sección *Ciencia* y para el Suplemento *Futuro* del diario Página 12. Trabajó junto a Leonardo Moledo en la escritura del libro *Los mitos de la ciencia* (Planeta, 2008) y de diversos artículos de divulgación científica. Mail: nolsze@gmail.com

Inmaculada Perdomo Reyes (Las Palmas de Gran Canaria, 1966). Doctora en Filosofía de la Ciencia. Profesora Titular del Área de Lógica y Filosofía de la Ciencia en la Facultad de Filosofía, Universidad de La Laguna, Tenerife, Islas Canarias-España. Docente de Teorías de la elección racional y racionalidad científica y de Ciencia y democracia en el Posgrado Interuniversitario en Lógica y Filosofía de la Ciencia. Es autora de diversos artículos sobre temas de Filosofía de la Ciencia y relaciones entre ciencia y género, así como del volumen *Hacia un nuevo empirismo: la propuesta filosófica de Bas C. van Fraassen* (Biblioteca Nueva, 2003) en coautoría con Jesús Sánchez Navarro. Mail: inmaperdomo@gmail.com

Pablo Rodríguez (Montevideo, 1979). Licenciado en Filosofía por la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación-Udelar. Se ha desempeñado como Docente del Departamento de Lógica y Filosofía de la Lógica en dicha facultad y en el curso de Historia de la Ciencia en la Escuela Universitaria de Bibliotecología y Ciencias Afines de la Universidad de la República, Uruguay. Mail: pablorodriguez66@gmail.com

Margarita Santana de la Cruz (Las Palmas de Gran Canaria, 1964) Doctora en Filosofía de la Ciencia. Profesora a cargo de los cursos de Historia de la Ciencia Antigua y Medieval en la Facultad de Filosofía de la Universidad de La Laguna, Tenerife, Islas Canarias-España. Docente de Retórica de la Ciencia en el Posgrado Interuniversitario en Lógica y Filosofía de la Ciencia. Miembro del Consejo Editorial de la Revista *Clepsidra*. Es investigadora del Proyecto «Valores y sesgos en el conocimiento científico y su transmisión», financiado por el Ministerio de Igualdad del gobierno español. Mail: msantana@ull.es

I. Astronomía y Física en Platón¹

I. Contexto histórico y biográfico

Aristocles de Atenas, más conocido como Platón, nace en el 427 a.C. y muere en el 347 a. C.². Es recordado como uno de los filósofos más grandes no sólo de la antigua Grecia sino de toda la historia. Su extensa obra, que nos ha llegado casi en su totalidad, abarca temas de metafísica, teoría del conocimiento, ética y política entre otros. Si bien Platón no mostró por la ciencia experimental una inclinación análoga a la de su discípulo Aristóteles (384-322), supo sí incursionar en matemáticas, astronomía y física, siendo figura relevante en el desarrollo de la llamada tradición platónico-pitagórica, basada en la premisa de que el conocimiento de científico solo es posible a través de la matematización de los fenómenos naturales.

Perteneciente a una familia aristocrática de las más tradicionales de Atenas, la vida de Platón y también parte importante de su obra están atravesadas por las intensas circunstancias históricas de la Atenas del siglo IV. La mayoría de las noticias que posemos Platón se deben al capítulo que le dedica Diógenes Laercio (s. III d.C.) en sus *Vidas de los filósofos más ilustres* (Hicks, 1965), una obra escrita unos 600 años después de su muerte —entre el 225 y el 250 d.C.—, aunque nutrida de una cantidad importante de fuentes.

Platón nace en el 427, en el seno de una prestigiosa familia aristocrática. El linaje de su madre, Pericliona, se remontaba al gran legislador ateniense Solón (640-560), y el de su padre Aristón, al antiguo rey Codro (ca. s. XI), último de los reyes del ática. Su madre era hermana de Cármenes (m. 403) y sobrina de Critias (460-403), personajes destacados en las revueltas aristocráticas contra la democracia ateniense. El último cuarto del siglo V y la primera mitad del IV muestran a las principales polis griegas en estado de guerra constante, alternándose Atenas, Esparta y Tebas en la hegemonía sobre el resto de Grecia. Este período coincide casi exactamente con los 80 años de vida de Platón, por lo que no es

1 Una versión preliminar y abreviada del presente artículo fue incluida en Melogno (2008).

2 En cuanto la mayoría de las fechas referidas son anteriores a Cristo, se evitará la abreviatura a.C. En fechas de la antigüedad posteriores a Cristo, se utilizará la abreviatura d.C.

casual que comience su obra *Las Leyes* tomando a la guerra como un estado continuo entre las ciudades (1972, I, 625e).

Para el momento de su nacimiento, persiste la hegemonía de Atenas sobre gran parte de las ciudades griegas, con Pericles (495-429) al frente: es la época de oro de la democracia y del imperio ateniense. Este se sostenía en una política expansionista, manteniendo una flota militar financiada mediante el pago de tributos, con un control casi total del tráfico marítimo, tanto comercial como militar. Ambos aspectos eran decisivos, en cuanto el suelo infértil del Ática hacía que la industria y el comercio fueran la base de la economía de Atenas (Finley, 1963).

De joven Platón recibió la típica educación de un joven aristócrata, ejercitándose en la gimnasia y las letras, y componiendo asimismo algunos ditirambos y tragedias de los que luego renegaría (Hicks, 1965, I-III). Según consigna Aristóteles (*Metafísica*, 1973, I, 987a), desde temprana edad se familiarizó con la filosofía de Cratilo (s. V), discípulo de Heráclito (ca. 535-484). En el 407, contando con veinte años, se hizo discípulo de Sócrates (470-399), pasando luego por la escuela de Hermógenes (s. V), quien seguía a Parménides (s. V).

Estas primeras dos décadas de la vida de Platón trascurren en paralelo a la Guerra del Peloponeso, que entre el 431 y el 404 enfrentó a Esparta contra Atenas, teniendo a casi toda Grecia plegada a uno u otro bando. Los atenienses marcharon a la guerra a instancias de Pericles, pero no obstante el amplio apoyo obtenido por este, persistió una minoría oligárquica reacia al enfrentamiento, que mostraba admiración por las instituciones espartanas; a este grupo pertenecía la familia de Platón. Después una de una compleja serie de vicisitudes características de la historia política y militar de la Grecia antigua, en el 404 culmina finalmente la Guerra del Peloponeso, con el triunfo de Esparta en la batalla de Egos Pótamos (Tucídides, 1988). La guerra mostró la incapacidad de Atenas para organizar a Grecia bajo su imperio, del mismo modo que la victoria de Esparta mostrará su incapacidad para hacer lo propio.

Lisandro, líder espartano, designa para gobernar Atenas a quienes pasarán a la historia como los *Treinta tiranos*. Participan en favor de los espartanos Cármides y Critias, parientes cercanos de la familia de Platón. El gobierno de los *Treinta* persiguió a sus opositores, realizó confiscación indiscriminada de bienes, y otros excesos que devinieron en la condena a muerte de algunos de sus propios miembros, como fue el caso de Terámenes. A causa de estos y otros excesos, luego de ocho meses, se produce la caída de los *Treinta*, a manos de la ofensiva demócrata encabezada por Trasíbulo, con lo que se restaura la democracia (Aristóteles, *Constitución de Atenas*, 1973, 38-40).

En el 403 mueren Critias y Cármides, y en el 399 se produce el juicio y la condena de Sócrates, maestro de Platón. Acusado de corromper a la juventud y adorar falsos dioses (*Apología de Sócrates*, 24a-26e)³, Sócrates fue condenado a muerte (*Apología de Sócrates*, 36b-38a) después de que, según el testimonio de Platón, esquivara la cárcel, la huida, el destierro y otras soluciones jurídicas contempladas en su proceso (*Apología de Sócrates* 37b-28b, *Crión*, 45a-47a). La muerte de Sócrates cala muy hondo en el ánimo de su discípulo, que por aquel entonces contaba 28 años, al punto que los primeros diálogos platónicos están abocados a la defensa y sistematización del pensamiento socrático. No obstante, tanto el fracaso del proyecto aristocrático de los *Treinta*, como la condena de Sócrates bajo la restauración democrática, afectaron a Platón lo suficiente para marcar su aislamiento casi

3 Todas las referencias a obras de Platón corresponden a la edición Aguilar consignada en la bibliografía.

de por vida de la política de Atenas (*Carta VII*, 324b-327c; Cicero, *De Finibus bonorum et malorum*, 1951, V, 87).

Por esta época abandona la ciudad, viajando durante cuatro años, primero a Megara, donde recibe la enseñanza del socrático Euclides (*ca.* 450-*ca.* 380), y después a Cirene donde aprende matemáticas con Teodoro (465-398). Luego avanza a Italia donde entra en contacto con los pitagóricos Filolao (*n.* 474) y Eurito (s. V); finalmente llega a Egipto donde escucha la sabiduría de los sacerdotes (Hicks, 1965, IV-V).

En el 395 regresa a Atenas. Por ese entonces comienza la Guerra de Corinto, en la que las principales ciudades griegas, con el apoyo de Persia, forman una liga contra Esparta. Platón entra en el ejército y combate en el 394. Por esta época habría escrito el *Gorgias*, su primer cuestionamiento sistemático del estado moral y político de la Atenas democrática. En el 389 vuelve a partir, visita al matemático Arquitas (*fl.* s. IV) en Tarento y a Timeo (*fl.* s. V) en Locro. Finalmente en el 388 llega a Siracusa, donde traba amistad con Dion, consejero del tirano Dionisio I (*Carta VII*, 327c-334d). Este se enemista con Platón a poco de conocerlo, por lo que ordena sea vendido como esclavo. Platón es rescatado y vuelve a Atenas en el 386 (Hicks, 1965, VI-XI). En ese mismo año termina la Guerra de Corinto, con la intervención del imperio persa.

De vuelta en Atenas y a los 40 años, funda la famosa *Academia*, alrededor del año 387. En ella se impartía enseñanza gratuita de diferentes ramas de lo que hoy llamaríamos filosofía y ciencia —distinción que no corresponde al pensamiento griego de la época—, pero fue financiada por personajes pudientes como Dionisio II. Se dedicaba principalmente a la enseñanza de la matemática y la filosofía, a tal punto que en la entrada habría figurado la inscripción: «nadie entre sin saber geometría», característica de la definida raíz pitagórica del pensamiento platónico (Plutarch, 1959). Fue concebida como un centro de estudios dedicado fundamentalmente a la ciencia pura, esto es la dialéctica y las matemáticas tal como se entendían en el sistema platónico. La Academia contribuye así a consolidar la incipiente tradición platónico-pitagórica en matemáticas, de acuerdo a las claras afinidades entre la filosofía de Platon y el pitagorismo (Aristóteles, *Metafísica*, 1973, I, 987-988a, III, 996a). Esto en cuanto si bien Platón no realizó descubrimientos matemáticos específicos, contribuyó al desarrollo de la matemática incentivando su estudio en sus discípulos y buscando aplicar los conocimientos matemáticos a la astronomía y la física. De aquí que la mayor parte de los descubrimientos matemáticos realizados en el siglo IV se deben a matemáticos que habrían estado vinculados a la Academia (Proclus, 1948).

Diógenes Laercio proporciona nombres de varios de los discípulos de la Academia en sus primeros tiempos, entre los que destacan Espeusipo de Atenas (*ca.* 393-339) Jenócrates de Calcedonia (*c.* 396-314), el astrónomo Heráclides del Ponto (390-310), y por supuesto Aristóteles (Hicks, 1965, XXIII). La Academia permanecerá abierta desde cerca del 387 hasta el 529 de nuestra era, cuando el emperador Justiniano I de Constantinopla ordene su clausura, en el marco de su definida política de persecución y abolición de las instituciones con creencias no cristianas (Evans, 2005).

En el 367 muere Dionisio I de Siracusa, asumiendo el trono su hijo Dionisio II. Dion, amigo de Platón, permanece como consejero de nuevo rey, y pensando que el magisterio de Platón sería de utilidad para un monarca tan joven, convoca nuevamente al filósofo a la corte siracusana en el 361. Según Diógenes, era intención de Platón instaurar en Siracusa el modelo político que había defendido en la *República*, para lo cual pidió a Dionisio hombres

y tierras. Fuere o no así, lo cierto es que la segunda aventura siracusana de Platón terminó en condiciones no mucho mejores que la primera. Enredado en intrigas políticas de las que poco detalle ha quedado en la historia, se ve confinado en el palacio y a su amigo Dion deserrado por Dionisio. Esta vez es una carta de Arquitas de Tarento al monarca siracusano la que le salva la vida (*Carta VII*, 337d-340d/ 345b-351a; Hicks, 1965, XIII; Plutarch, *Dion*, 1952). Es así que vuelve a Atenas y retoma la enseñanza en la Academia, al parecer sin dejar de realizar un tercer y último viaje a Siracusa intentando reconciliar a Dion con Dionisio, intento tan fallido como los anteriores. En el 353 Dion es asesinado luego de levantarse en armas contra Dionisio. Platón abandona definitivamente la política y dedica el resto de su vida a la enseñanza en la Academia (Hicks, 1965, XIV).

Paralelamente, en el 357 se había dado la primera incursión de Filipo de Macedonia (382-336) en el Mar Egeo, tomando ciudades que permanecían bajo dominio ateniense. Aprovechando el irreversible desgaste de las potencias griegas, más su propio poderío, en diez años Filipo completará su dominio sobre la costa norte del Egeo con la toma de Olinto en el 347, el mismo año en que muere Platón, a la edad de 80 años.

Buena parte de la vida de Platón transcurre durante la decadencia del imperio ateniense y la política democrática de Atenas, tal como Pericles la había conducido en buena parte del siglo V. Platón es testigo presencial de la Guerra del Peloponeso, de la caída del imperio ateniense, de los frustrados intentos de Esparta y Tebas por imponerse sobre el resto de Grecia, de las sucesivas revoluciones democráticas y aristocráticas que entretuvieron a sus conciudadanos. Estos factores, sumados a su origen aristocrático y su marcada simpatía por la organización política y la educación espartana, ejercerán una significativa influencia no solo en sus concepciones políticas, sino en general en su pensamiento filosófico.

Las obras de Platón suelen dividirse en cuatro períodos, cuyo contenido no está exento de debate. 1. *Período socrático*, al que pertenecen entre otros los diálogos *Apología de Sócrates*, *Critón* y *Protágoras*. 2. *Período de transición*, donde se ubican *Gorgias*, *Menón*, *Hippias Mayor* y *Menor* entre otros. 3. *Período de madurez*, al que corresponden entre otros *República*, *Banquete*, *Fedro* y *Fedón*. 4. *Período de vejez*, donde se ubican entre otros *Timeo*, *Teeteto*, *Sofista* y *Leyes* (Fraile, 1971). Se conservan asimismo trece cartas, de las cuales se reconoce autenticidad segura a las VII y VIII, y autenticidad probable a las II, III, VI y XIII. Por último, se conservan una serie de diálogos que si bien fueron atribuidos a Platón en diferentes épocas, son muy dudosos o claramente apócrifos, entre ellos *Epinomis*, *Alcibíades II*, *Teages* y *Clitofón* (Fraile, 1971).

II. Teoría del conocimiento, matemáticas y astronomía

No es el propósito de este trabajo realizar una exposición de la teoría platónica del conocimiento⁴, pero sí al menos resulta necesaria una presentación de aquellos puntos que mayor vinculación mantienen con las tesis físicas, matemáticas y astronómicas de Platón, a efectos de ofrecer un panorama relativamente integrado de su pensamiento. La teoría del conocimiento en Platón no es un constructo unitario, sino que fue experimentando variaciones y cambios de dirección que hacen imposible ofrecer una imagen de conjunto, generando hasta hoy controversias interpretativas de no fácil resolución. Una de las primeras

4 Es inmensa la cantidad de bibliografía disponible sobre Platón en general y sobre su teoría del conocimiento en particular. Remitimos al lector a las obras clásicas de Crombie (1979), Hare (1991) y Ross (1997), y la más reciente de Reale (2003).

referencias que se pueden tomar al respecto es la *mayéutica*, término griego que designa el arte de la comadrona o partera, introducido en el diálogo *Teeteto* (210b) para referirse al método socrático, característico de los diálogos de juventud, en los que Sócrates interroga a sus interlocutores para ayudarles a alumbrar ideas que estaban en sus mentes aunque no lo supieran (*Teeteto*, 161b).

A partir de su confesa e irónica ignorancia, Sócrates no afirma tesis alguna, sólo interroga y examina aquello que el alma del interrogado ha producido, de forma que el proceso consiste en llegar al descubrimiento de la verdad a partir de una serie bien trabada de preguntas y respuestas, y del examen de las inconsecuencias que las respuestas originan (*Hippias Mayor*, 288e-293a). En este marco el examen de sí mismo deviene método filosófico, a través del principio *conócete a ti mismo*. El conocimiento de sí mismo cobra valor en cuanto el fin último de la filosofía es la educación moral del hombre. De ahí que los conceptos que más preocupan a Sócrates sean los de las virtudes éticas (*Teeteto*, 149a), en cuanto el recto conocimiento de las cosas lleva al hombre a vivir moralmente: quien sabe lo que es bueno, también lo practica, de forma que el intelectualismo ético desemboca en la tesis de que la maldad sólo proviene de la ignorancia (*Protágoras*, 345d).

Si bien Platón se mantiene fiel a Sócrates en sus diálogos de juventud, a medida que su obra avanza se va independizando de la enseñanza socrática hasta llegar a la formulación de la *Teoría de las Ideas*, núcleo central de su concepción del conocimiento. En cuanto no es pensable el conocimiento de lo que está siempre sometido a cambio y movimiento, que es lo que sucede con el mundo de los sentidos, el conocimiento sólo será posible si existe algún tipo de realidad fija y estable, y esta realidad la remite Platón al mundo de las Ideas (*Fedro*, 247c-e). La postulación de las Ideas es resultado de la atribución de realidad ontológica a los conceptos socráticos (*Cratilo*, 439c), en cuanto Platón las considera como realidades independientes de la razón que las conoce, perfectas, incorruptibles y de carácter divino (*Fedón*, 81a-84a). De esta manera, conforman un conjunto articulado, en el que las más bajas funcionan como fundamento de las más altas. Esta serie termina en la Idea del Bien, que posee valor absoluto y es causa del orden y la belleza de cuanto existe (*República*, VII, 517c).

Así, la realidad se divide en dos mundos: inteligible y sensible; el primero sólo puede ser conocido por la razón, por oposición al segundo que es conocido a través de los sentidos. Pero una vez que los sentidos no participan de la aprehensión de la verdad, el mundo sensible no constituye más que una mera apariencia (*Teeteto*, 186d-e), que a lo sumo puede ser considerada como una imagen imitativa del mundo de las Ideas, en cuanto los objetos que percibimos en el mundo sensible son copias de sus correlativos en el mundo ideal (*Fedro*, 250a-251c).

En estos términos, Platón postula una correlación entre *ser* y *conocer*: El más alto grado de *ser* es correlativo al más elevado conocimiento, la *episteme*, derivado del mundo inteligible. Del mismo modo, a la ignorancia absoluta corresponde al *no-ser*, y entre ambos, aparece la *doxa*, opinión o creencia, relativa al mundo sensible (*República*, V, 477a-b). La *episteme* por su parte comprende dos grados: el conocimiento racional discursivo, o *pensamiento*, y la intuición intelectual, o *entendimiento*. El primero es conocimiento hipotético, mediato, que procede por demostración. La intuición intelectual es el conocimiento intuitivo por contemplación directa del mundo ideal, es la dialéctica, un saber no-hipotético, en cuanto conocimiento inmediato y directo de las Ideas (*República*, VI, 510c-511d; *Filebo*, 58a-59c).

La matemática constituye un modelo de conocimiento racional, en cuanto emplea un método discursivo y deductivo: parte de una hipótesis y deduce conclusiones (*República*,

VI, 510c). Genera un conocimiento que permite contemplar la esencia de los números, del mismo modo que la dialéctica permite contemplar la esencia de las Ideas (*República*, VII, 525b). Sin embargo, la dialéctica emplea un método discursivo ascendente, parte de una Idea y asciende hasta la Idea suprema, por lo que a diferencia de la matemática rebasa el plano hipotético y llega a un principio no condicionado (*República*, VII, 521c). A la dialéctica corresponde tanto reducir a una única idea la diversidad de seres que participan en ella, como dividir las Ideas por géneros y especies, ordenarlas, clasificarlas e inteligir sus relaciones, de tal modo de establecer cuáles pueden ser relacionadas sin contradicción y cuáles no (*Fedro*, 265b-266a; *Sofista*, 253d).

Los objetos matemáticos a su vez, mantienen un rango intermedio entre los objetos sensibles y las Ideas, ya que a semejanza de estas, son inmateriales y permanecen iguales a sí mismos, pero a diferencia de las Ideas, puede haber varios objetos matemáticos del mismo tipo, mientras que la Idea es única. Junto al círculo esencial, o la idea de círculo, existen las imágenes de la Idea, es decir los círculos concretos que podemos trazar (*Carta VII*, 342b-343e), a semejanza de lo que sucede con la diversidad de los objetos sensibles. De acuerdo a este esquema, la matemática constituye un tipo de conocimiento intermedio entre la dialéctica pura y el conocimiento sensible, no obstante la validez deductiva de sus principios la sitúan mucho más cerca de la *episteme* que de la *doxa*.

Volviendo al mundo sensible, es posible distinguir entre el *mundo físico terrestre*, que se compone de los cuatro elementos —aire, tierra, fuego y agua—, y que se mantiene en constante cambio, siendo imperfecto y perecedero todo lo que hay en él (*Timeo*, 53c-d), y el *mundo físico celeste*, región compuesta aparentemente por un solo elemento, el *éter*, e intermedia entre el mundo terrestre y el inteligible. Esto en cuanto se compone de seres —los planetas— que al igual que las ideas son perfectos, incorruptibles y de carácter divino (*Timeo*, 35b-36e).

Ahora bien, el conocimiento del orden cósmico es superior al conocimiento inmediato de lo sensible, y a su vez es inferior al conocimiento de las Ideas, por lo que la herramienta que permite al entendimiento discernir este orden cósmico debe ser aquella que intermedia entre la percepción sensible y la intelección pura: el conocimiento matemático. Platón concebía a la astronomía como matemática aplicada al estudio del mundo celeste, por lo que del mismo modo que la matemática es intermedia entre la *doxa* y la *episteme*, la astronomía es intermedia entre la física y dialéctica. Ello no impide que la matemática tenga otro tipo de aplicaciones, tanto en artes manuales, música, agricultura o medicina (*Filebo*, 55c-59d), como en la construcción de teorías matematizadas acerca del mundo físico terrestre, tal como la propuesta en el *Timeo* (55d-56c). La astronomía sin embargo tiene un lugar de privilegio dentro del conocimiento matemático, en cuanto es la disciplina matemática que más se acerca a la dialéctica.

Por esto, la verdadera astronomía no se ocupa de los cuerpos celestes visibles, o de sus movimientos visibles. Tiene como objeto realizar una reconstrucción matemática del movimiento real de los astros en el cielo, en relación al cual el movimiento aparente es sólo una expresión imperfecta en el espacio y el tiempo (*República*, VII, 529d-531a). Así establece Platón uno de los postulados más controversiales de su astronomía, según el cual el trabajo astronómico debe centrarse en la resolución de problemas matemáticos antes que en el acopio de observaciones del movimiento de los astros. De aquí que la astronomía platónica pueda ser considerada como una teoría cinemática pura de orden general (Mourelatos,

1981), en cuanto no aspira a una explicación física propiamente dicha, sino a la generación de modelos matemáticos que permitan dar cuenta de los fenómenos celestes.

Pero sin negar la importancia que desde mucho antes de Platón tenía la matemática para la astronomía, no deja de resultar bastante extraña la afirmación de que la astronomía no debe ocuparse de los objetos visibles o aparentes, siendo que se trata a fin de cuentas una ciencia observacional, y como tal era concebida en la época de Platón. La interpretación clásica que sobre este punto formuló Thomas Heath (1921), se basaba en una dificultad que ha generado no poca polémica respecto al supuesto desprecio de Platón por la astronomía observacional. Según Heath, puede aceptarse que Platón no quiere decir que la astronomía lidia con un cielo *ideal* distinto del cielo *aparente*, sino que se ocupa de los verdaderos movimientos de los cuerpos celestes, y no con sus movimientos aparentes, en cuanto sólo la matematización del mundo celeste puede permitir su verdadero conocimiento. Pero no es claro qué pretende Platón al contrastar las estrellas visibles del cielo con las estrellas reales de las que estas son imitaciones, porque si la astronomía *real* no se ocupa en sentido literal de el cielo *visible*, sino de el cielo *ideal* (*República*, VII, 529d) en el mismo sentido en que la dialéctica se ocupa de las Ideas y no de las cosas sensibles, la idea de una reconstrucción matemática del movimiento aparente pierde sentido.

Mourelatos (1981) sin embargo, ha insistido en que los problemas planteados en la concepción platónica de la astronomía son puras construcciones matemáticas, respecto de las cuales los fenómenos celestes juegan sólo un rol de sugestión, en cuanto ponen al descubierto los problemas que motivan el desarrollo matemático ulterior. Esto no hace que la astronomía quede disociada de la observación; por el contrario, el desarrollo de la cinemática busca lograr un progresivo ajuste entre el modelo matemático y el dato empírico, sin que esto implique la subordinación de la teoría a la observación —en términos de que los registros empíricos puedan oficiar como refutaciones o confirmaciones absolutas de las construcciones matemáticas—, en cuanto la concepción idealista de Platón parte de la no fiabilidad del dato empírico.

Más recientemente, Andrew Gregory (1996) se ha opuesto a las interpretaciones anti empíricas de la astronomía platónica originadas en Heath, considerando que el esquema expuesto en *República* implica que a pesar de la primacía del mundo ideal por sobre el sensible, Platón concebía a la astronomía como un proceso de investigación dinámico, que permite remontarse desde lo sensible a lo inteligible. Desde esta perspectiva, la observación del cielo visible no es un obstáculo sino una condición necesaria para la ascensión al conocimiento inteligible del mundo celeste. A favor de esta idea, cabe señalar también que en diálogos posteriores como *Timeo* y *Epinomis*⁵, no solo no aparece la mencionada denigración del papel de la observación, sino que por el contrario, se realza su importancia (*Epinomis* 986b-989a), en el marco de una consideración general más favorable del conocimiento sensible (*Timeo*, 37b, 47a-b).

Finalmente Johansen (2008) ha propuesto una visión diferente, señalando que *República* y *Timeo* presentan dos caracterizaciones diferentes del conocimiento matemático y astronómico. En *República*, Platón trata a la matemática y la astronomía en el contexto de la dialéctica y el conocimiento de las Ideas, por lo que el status de conocimiento de ambas queda reducido a su contribución al conocimiento del *ser*, es decir de las Ideas. En el *Timeo* por el contrario, el tratamiento remite al conocimiento del cosmos, es decir del devenir, por lo que una vez que

5 Diálogo de autenticidad cuestionada, probablemente no escrito por Platón.

ya no estamos en el ámbito del conocimiento de las Ideas, la función del astrónomo y el status tanto de la astronomía como de la matemática resultan diferentes a lo postulado en *República*.

Independientemente de los tecnicismos involucrados en la cuestión, y más allá de que se tome posición favorable por cualquiera de las muchas interpretaciones disponibles sobre el punto, resulta necesario tomar con precaución buena parte de las interpretaciones clásicas que atribuyen a Platón de modo no problemático una actitud de desprecio a la observación astronómica (Koestler, 1986; Sarton, 1965), cuando la misma diversidad de perspectivas y lo intrincado del asunto permiten apreciar que el papel de la observación en la astronomía platónica no puede postularse como un desprecio de lo sensible derivado automáticamente de la Teoría de las Ideas.

En suma, la teoría platónica del conocimiento parte de la distinción entre mundo sensible y mundo inteligible, de la cual se desprenden distintos grados de conocimiento que culminan en el acceso a las Ideas. A la matemática corresponde un lugar de privilegio dentro de los grados de conocimiento, en cuanto su estructura deductiva la acerca a la dialéctica pura. La astronomía puede entenderse como matemática aplicada al estudio de los objetos celestes, que poseen un status de conocimiento mayor que los objetos terrestres pero obviamente menor que las Ideas o los objetos matemáticos puros, como los números o las entidades geométricas. Asimismo, la utilización de la matemática no se restringe al estudio de los objetos celestes, sino que también ensayó Platón una explicación matematizada del mundo terrestre, en el marco de la cosmología desarrollada en el *Timeo*.

III. El *Timeo* y el desarrollo de la cosmología griega

En el *Timeo*, obra de vejez escrita probablemente entre el 391 y el 360, Platón desarrolla su concepción acerca de la formación y la estructura del cosmos. El diálogo ha sido a través de la historia una de las piezas más representativas y oscuras de la obra de Platón, lo que ha generado una secuela de controversias y tradiciones interpretativas que se remontan desde las épocas de la Academia hasta nuestros días.

El *Timeo* conforma junto al *Critias* —inconcluso— y el *Hermócrates* —nunca escrito—, una trilogía en la que Platón habría buscado ofrecer una especie de historia del mundo, desde el origen del cosmos hasta la conformación de las ciudades-estado, en el marco de una concepción antropológica con claras implicancias éticas. Es por esto que si bien los temas cosmológicos dan centro a la obra no la agotan, en cuanto el diálogo contiene una sección inicial donde se relata el Mito de la Atlántida, una sección central dedicada a la cosmología y una sección final de sobre fisiología y psicología. A diferencia de la mayoría de los diálogos platónicos, que se ciñen a la resolución de problemas específicos y rigurosamente delimitados, el *Timeo* aparece como una suerte de enciclopedia científica, cuyo objetivo es ofrecer una síntesis articulada entre las diferentes disciplinas que le dan contenido.

En cuanto al status de la cosmología, Platón establece que tanto en el conocimiento del origen del mundo como en el de los designios de los dioses, no cabe a los hombres nada más que conjeturas y razonamientos aproximados (*Timeo*, 29c/ *Fedón*, 96a-99d), al contrario de lo que sucede en el conocimiento dialéctico. En concordancia con la Teoría de las Ideas, del mismo modo que las acciones justas son tales a imitación de la idea de Justicia, el cosmos en cuanto totalidad dotada de orden es el producto de la acción que sobre la materia informe ejerce un artesano divino o *Demiurgo*, tomando como modelo las Ideas (*Timeo*, 29a-b). En función de esto, Johansen (2008) ha propuesto que la cosmología del *Timeo*

debe ser entendida como estudio del *devenir*, es decir de las cosas que llegan a ser pero que no siempre existieron, por oposición al estudio del *ser*, es decir al estudio dialéctico de las Ideas, realidades que tienen son eternas y que para Platón constituyen el verdadero *ser*. El carácter conjetural de la cosmología es así la consecuencia directa de su objeto de estudio, un cosmos que deviene, es decir que *ha llegado a ser* sólo a semejanza del *ser*. Por esto, resulta inapropiada la pretensión de establecer a través de la cosmología los principios básicos de las cosas con la seguridad con la que lo hace la dialéctica.

Esto hace que las afirmaciones de la cosmología tengan un status de conocimiento inferior al conocimiento de las Ideas, e incluso a la matemática pura. Sin embargo cabe pensar que el valerse de la matemática otorga a la cosmología un status superior al mero conocimiento empírico. Para Johansen (2008) lo que propone la cosmología del *Timeo* es una ampliación del campo de acción de la matemática respecto a los términos que había planteado Platón en *República*, y esta ampliación se opera bajo la idea de que es posible una explicación matemática de la composición de los cuerpos terrestres.

El Demiurgo, artífice del Universo y arquitecto de todo lo existente, oficia como intermediario entre las Ideas y el cosmos, y como elemento de orden y racionalidad, en cuanto el diseño que le imprime al cosmos asegura que éste no sea una creación azarosa (*Sofista*, 265b-266b/ *Filebo*, 28a-30a). El Demiurgo ordena una materia informe que existe eternamente, por lo que no se trata de una creación en sentido estricto, sino de un pasaje del caos al orden, al estilo de las antiguas cosmogonías griegas. Desde el momento en que el cosmos fue diseñado siguiendo el modelo del mundo inteligible, su forma y su funcionamiento no son arbitrarios, por lo que pueden ser conocidos intelectualmente por el hombre.

Sin embargo, las inquietudes iniciales del *Timeo* se orientan antes hacia la filosofía política que a la filosofía natural: el diálogo comienza planteando el problema de cómo debe ser la *polis* ideal, en su estructura y en su organización de gobierno, tópico al que ya había dedicado Platón la mayor parte de *República*. Partiendo de que la *polis* es un microcosmos en relación al macrocosmos, y que por tanto una y otro mantienen una esencia común, concluye que la estructura misma del cosmos debe tomarse como referencia para entender los problemas de la *polis*, y que una vez resuelto el problema del funcionamiento cósmico general, se derivará la solución de los problemas relativos a cada una de sus partes (*Timeo*, 27a). De este modo se articula un definido isomorfismo entre la *polis* y el cosmos, en el marco del cuál las inquietudes políticas de Platón habilitan el tránsito hacia el planteo cuestiones de orden cosmológico.

Los problemas cosmológicos fundamentales que aborda el diálogo son la composición de la materia y el ordenamiento de los planetas. El primero había sido tratado por los filósofos griegos de los siglos VI y V a. C. desde dos concepciones contrapuestas, que sin evitar un cierto anacronismo pueden denominarse como *materialista* e *idealista* (Toulmin; Goodfield, 1963). La tradición materialista fue desarrollada por los filósofos jonios del Asia Menor, en la costa oriental del Mar Mediterráneo, y partía de la base de que todos los objetos materiales proceden de una misma sustancia originaria, no siendo más que variaciones o manifestaciones de esta sustancia tan *material* como los mismos objetos que engendra. A esta materia generadora de todo lo viviente, los antiguos jonios la llamaron *arjé*.

Dependiendo de si el *arjé* era único o múltiple, podemos distinguir entre materialistas *monistas* y *pluralistas*. Según da noticia Aristóteles (*Metafísica*, 1973, I, 983c), la tradición materialista se inicia con Tales de Mileto (s. VI a.C.), quien afirmó que el agua era el principio de todas las cosas. Su conciudadano Anaximandro (c.610-545 a.C.) sostuvo que el principio de todo era el *ápeiron*, que puede traducirse como *lo indeterminado*, y el también

milesio Anaxímenes (c. 586-525 a.C.) señaló que el *arjé* correspondía con el *pneuma*, que no sin pérdida puede traducirse como *aire*. Entre los *pluralistas*, encontramos a Empédocles de Agrigento (ca. 483-ca. 424 a.C.), para quien la totalidad del mundo físico es producto de la combinación de cuatro elementos: fuego, agua, tierra y aire, y dos fuerzas: Amor y Odio. Otro personaje relevante a este respecto es Demócrito de Abdera (ca. 460-370 a.C.), quien junto a su maestro Leucipo (s. V a.C.) desarrollaron la teoría *atomista*, según la cual todo cuanto existe es el fruto de la combinación de átomos que se mueven en el vacío, regidos por el azar y la necesidad (Kirk/ Raven, 1987).

La concepción *idealista* por el contrario, partía de la base de que las estructuras últimas de la materia no son sustancias materiales propiamente dichas, sino más bien estructuras matemáticas. Esta tradición se origina en el siglo VI a.C. en las colonias griegas del sur de Italia, gracias a la escuela pitagórica. Alentados por sus descubrimientos en los campos de la acústica y la geometría, los pitagóricos concibieron el proyecto de dar cuenta de la naturaleza entera a través de estructuras geométrico-aritméticas (Aristóteles, *Metafísica*, 1973, I, 985b-986a). Aunque sus pretensiones se vieron muy pronto diezmadas por el descubrimiento de los números irracionales, que introdujeron una intolerable cuota de infinitud y disarmonía en el ordenado universo pitagórico. No obstante esto, la enseñanza de Pitágoras (ca. 570-490 a.C.) no dejó de ejercer una influencia sustantiva en pensadores de todas las épocas desde Platón hasta Kepler (Toulmin; Goodfield, 1963). Plenamente identificado con el pitagorismo, y quizás bajo la influencia específica del pitagórico Filolao (Hicks, 1965, VIII), Platón presentará en el *Timeo* su teoría de los poliedros, una concepción de la materia que respeta los códigos característicos de la tradición idealista, con el agregado de que busca asignar a los números irracionales un lugar preciso dentro de las estructuras matemáticas que ofician como fundamento del mundo sensible.

En cuanto al problema del ordenamiento planetario, o en un sentido más amplio, el problema de la estructura del cosmos, también había sido tratado por ambas tradiciones. Pero al contrario de lo que sucedió con el problema de la materia, las explicaciones materialistas resultaron inicialmente poco fértiles y fueron rápidamente desplazadas por los términos en los cuáles los pitagóricos abordaron el tema.

Los primeros jonios consideraron que la Tierra era un cuerpo plano que por algún mecanismo más o menos conocido se sostenía en otra sustancia material o flotaba en el vacío. Según da noticia Diógenes Laercio (Hicks, 1965, I), Tales consideraba a la Tierra como un disco que flota sobre el agua, mientras que Anaximandro sostenía que era un cilindro que flota en el vacío ya que al estar en el centro del universo equidista de todas sus partes. Anaxímenes por último, retomó la teoría de la Tierra plana propuesta por Tales, pero mantuvo la idea de que flotaba en el vacío. Como ha señalado Popper (1979), constituye un logro inestimable de los jonios el haber dado forma a la idea de la Tierra flotando en el espacio sin ser *sostenida por nada*, además de haber generado mecanismos altamente eficaces para explicar y predecir eclipses. Asimismo, dentro de la tradición jonia predominaba la idea de que los cuerpos terrestres provenían del mismo *arjé* que los cuerpos celestes, en contraposición a la creencia pitagórica —también asumida por Platón— del carácter divino de los astros, con la consiguiente imposibilidad de reducir ambos mundos —terrestre y celeste— al mismo principio explicativo (Kirk/ Raven, 1987).

Los pitagóricos por su parte, habrían introducido al menos tres ideas que serán fundamentales para la astronomía griega posterior, extendiendo su influencia a través de los siglos. Primero, sustituyeron la Tierra plana o cilíndrica de los jonios por una Tierra esférica;

segundo, establecieron que el mismo universo era finito y poseía forma esférica; tercero, afirmaron que las distancias entre los planetas respondían a proporciones matemáticas. Asimismo, propusieron la existencia de una anti-tierra, opuesta a nuestro planeta, aunque sin aventurar hipótesis acerca de su ubicación (Aristóteles, *Del Cielo*, 1973, IX, 290b-291a, XIII, 293a). Sostuvieron también que la Tierra no ocupa el centro del universo, sino que gira en órbitas circulares y alrededor de un *fuego* ubicado en el centro. No es claro si este *fuego central* corresponde o no con el Sol.

La astronomía de Platón presenta una clara influencia pitagórica, ateniéndose a los presupuestos básicos del pitagorismo excepto por el carácter geocéntrico de su sistema. Algunas de sus ideas astronómicas aparecen esbozadas en *República* (VII, 529d-531a, X, 616c-618a), y luego en *Leyes* (VII, 817e, 820c-822c), pero la exposición más completa se encuentra en el *Timeo*. Gregory (1996) señala incluso que en el *Timeo* se registra un cambio significativo en la naturaleza del movimiento celeste en relación a los diálogos anteriores. En *República* (530b) Platón había afirmado que los planetas experimentan desviaciones que vuelven dificultoso el cálculo y la determinación de su recorrido. En el *Timeo* (38c-39b) por el contrario, los planetas siguen cursos predecibles con relaciones invariables entre sus períodos, lo que permite realizar cálculos precisos de los movimientos de los cielos visibles. De acuerdo a esto podría decirse que el principio pitagórico de la matematización de las órbitas planetarias sólo se ve plenamente realizado por Platón en el *Timeo* y no en *República*.

Platón se atuvo igualmente al pitagorismo proponiendo un cosmos finito y esférico (*Fedro*, 247a); no obstante, colocó a la Tierra en el centro del universo (*Fedón*, 96d-98c/109d). Si bien según da noticia Plutarco en su *Vida de Numa* (Plutarch, 1952, 347), al llegar a la vejez Platón habría abandonado la idea de que la Tierra ocupaba el centro del cosmos, pensando —en clave pitagórica— que el lugar central debería corresponder a un cuerpo más digno y elevado, no hay en los textos platónicos ningún pasaje que pueda corroborar este comentario.

En el tratamiento de las proporciones de las distancias y planetarias y sus respectivas órbitas Platón buscaba, según una tradición referida por Simplicio (Duhem, 1969⁶), diseñar un modelo que de cuenta de los movimientos aparentes de los cuerpos celestes manteniendo el movimiento circular y uniforme. La idea del círculo como figura perfecta en la que necesariamente debían inscribirse las órbitas planetarias constituía otro de los pilares conceptuales ya no sólo del pitagorismo sino del horizonte conceptual de la astronomía griega, lo que hará que el desafío platónico sea retomado en primera instancia por Eudoxio de Cnido (ca.408-355), y una y otra vez por astrónomos de los siglos posteriores. Cabe señalar sin embargo que Plutarco, en su *Vida de Marcelo*, afirma que Platón se opuso tanto a Eudoxio como a Arquitas de Tarento (c. 430-?-c. 360), por considerarlos corruptores de la excelencia de la geometría (Plutarch, 1952, 473) al buscar una explicación mecánica del movimiento celeste, ajena al sentido cinemático que para Platón era el único camino posible de la astronomía.

IV. Estructura del cosmos y ordenamiento planetario

El cosmos generado por el Demiurgo posee en sí mismo el principio de su movimiento, que en astronomía se aplica al movimiento de los planetas y en mecánica a las variaciones y

6 Simplicius, *On Aristotle's On the Heavens*, II, 12, 292b10. La traducción de Duhem (1969) es de uso frecuente. Puede encontrarse una traducción al inglés del pasaje en el sitio del Prof. Henry Mendell de la California State University, Los Angeles, USA (ver bibliografía).

movimientos de los cuerpos en el mundo sensible. Basándose en este carácter animado del cosmos, Platón lo considera un organismo viviente dotado de alma: *el alma del mundo*, que se une al *cuerpo del mundo* en su propio centro. El alma envuelve al cuerpo coincidiendo en todas sus partes, oficiando como principio de vida y movimiento (*Timeo*, 36a).

El cuerpo del mundo surge cuando el Demiurgo dispone en un orden racional a los cuatro elementos, fuego, tierra, aire y agua, que permanecían dispersos y amorfos en el estado original de la creación (*Timeo*, 30c-32a). El Demiurgo organiza los elementos de acuerdo a la proporción áurea, según la cual dados tres términos, el medio tiene respecto al mayor la misma relación que el primero respecto al medio. Le da forma de una esfera, fuera de la que nada existe, ya que al cuerpo que contiene a todos los cuerpos conviene la forma geométrica que contiene a todas las formas. El cuerpo está privado de todo movimiento, salvo por el de rotación sobre sí mismo, considerado por Platón como el más perfecto de los movimientos (*Timeo*, 32c-34b).

El alma del mundo preexiste al cuerpo, en cuanto el cuerpo se subordina a ella, y es formada por el Demiurgo no en base a elementos materiales, sino a partir de principios provenientes del mundo ideal. Del principio de lo *Uno* —lo indivisible, siempre igual a sí mismo—, y el de lo *Otro* —lo variable y divisible—, se valió el Demiurgo para la mezcla inicial que daría composición al alma. Es forzoso que esta mezcla se componga de dos principios, ya que si se tratara de uno solo, el pasaje de la unidad a la diversidad habría resultado imposible. La mezcla de lo *Uno* con lo *Otro* forma un tercer principio, que mezclado a su vez con los dos anteriores produce un cuarto componente. La suma de los cuatro términos ($1+2+3+4 = 10$) da como resultado la decena, que para Platón —debido a la influencia pitagórica— era expresión de la perfección y la completud de la totalidad del cosmos; por tanto no es de extrañar que la decena fuera la síntesis de la unión de las sustancias originarias.

El Demiurgo divide la mezcla resultante en dos bandas, cruzándolas en forma de X para luego unir las por los extremos formando dos círculos concéntricos. El círculo exterior corresponde al principio de lo *Uno*, y se desplaza de izquierda a derecha en relación al Ecuador, desplazando a las estrellas fijas en él. Platón atribuía a las estrellas forma esférica, con un movimiento de rotación sobre su eje, y otro de traslación siguiendo el círculo de lo *Uno*. Al círculo interior de las estrellas, donde predomina el principio de lo *Otro*, el Demiurgo le imprimió el movimiento de derecha a izquierda, en sentido opuesto al círculo mayor, siguiendo la diagonal del paralelogramo formado por el eje central del cosmos, el Ecuador y el propio círculo (*Timeo*, 36c-d).

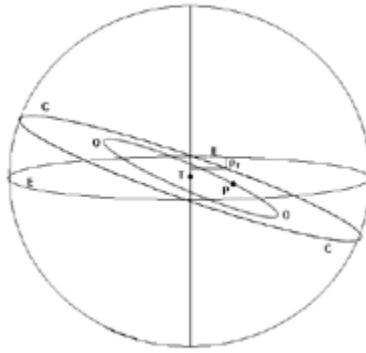


Figura 1. La esfera celeste. T: Tierra; P: planeta; Pr: paralelogramo; O: órbita planetaria; E: círculo externo (Ecuador, principio de lo Uno); C: círculo interno (principio de lo Otro).

Realizó luego otros siete círculos que siguen el movimiento de lo *Otro*, y se ordenan sobre la mezcla de dos progresiones; la primera de razón = 2: 1, 2, 4, 8; y la segunda de razón = 3: 3, 9, 27. Corresponden a los siete cuerpos celestes que por aquél entonces los griegos denominaban planetas: la Luna, el Sol, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter y Saturno. Tanto el círculo interno como los siete círculos planetarios giran en torno a la tierra con movimiento circular y uniforme. La Tierra permanece inmóvil en el centro, y no cae debido al equilibrio que todas las partes del cosmos mantienen entre sí; el cosmos es esférico, y la tierra está situada en el centro, por lo que equidista de todos los puntos que le dan límite, de ahí su carácter inamovible. Sin embargo, Platón afirma que si bien la Tierra no se desplaza de lugar «está estrechamente unida y apretada en torno al eje que atraviesa el Todo, el Dios la ha dispuesto para que sea la guardiana y la protectora de la noche y del día» (*Timeo*, 40b-c).

Este fragmento ha dado lugar a varias interpretaciones, que han suscitado la polémica desde la antigüedad. Según la interpretación clásica de Cornford (1966) el movimiento de la Tierra en torno a su eje neutraliza el movimiento del universo, ya que de otro modo se suprimiría el efecto de la rotación. Por más que se mantenga en el mismo lugar del espacio absoluto, su posición relativa respecto a las estrellas fijas varía en cuanto gira en sentido inverso a la esfera, completando una vuelta por día. De más está acotar que una consideración como la de Cornford no se desprende directamente del texto del *Timeo*, pero corresponde dejar sentada la existencia del problema.

En cuanto a las velocidades de los siete astros, Platón propone una explicación que como ha señalado Mourelatos (1981), es parcial y de carácter programático, en cuanto oficia más como una sugerencia de problemas a ser abordados por los astrónomos posteriores que como un modelo completo y acabado. Mercurio y Venus orbitan a la misma velocidad que el Sol, mientras que la Luna, Marte, Júpiter y Saturno, mantienen velocidades distintas a la de los primeros tres y distintas entre sí. Sobre las diferencias en las velocidades planetarias se calculan el año y el mes, en cuanto un mes se cumple cuando la Luna alcanza al Sol en su revolución, mientras que un año corresponde al recorrido completo del Sol sobre su círculo. A su vez, cuando las ocho órbitas retornan a su punto inicial, se cumple lo que Platón llamaba *el gran año*, medida de la perfección del tiempo, en cuanto implica la vuelta del mundo a su estado inicial, con la coincidencia de los círculos de lo *Uno* y lo *Otro* (*Timeo*, 39b-40c).

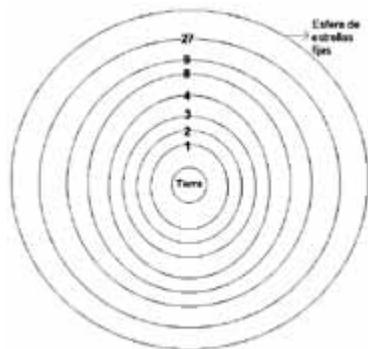


Figura 2. El ordenamiento planetario. 1: Luna; 2: Sol; 3: Venus; 4: Mercurio; 8: Marte; 9: Júpiter; 27: Saturno.

En el marco de esta explicación, Platón ensaya una hipótesis quizás destinada a explicar el movimiento retrógrado de algunos planetas: el círculo de lo *Uno* tiene supremacía sobre el movimiento de los otros círculos, por lo que los arrastra en dirección opuesta, y la resistencia generada por estos dos movimientos cambia la inclinación de los planetas respecto al Ecuador, convirtiendo sus órbitas en hélices que cambian constantemente su posición respecto del Ecuador (*Timeo*, 38e-39a). Cabe acotar la importancia de este pasaje. En primer término, muestra que ya para la época de Platón la astronomía griega se encuentra en un período de esfuerzo sistemático para atacar los movimientos anómalos de los planetas, es decir, aquellos que no encajan con los principios de uniformidad y circularidad. En segundo término, no deja de resultar llamativo encontrar un ensayo de explicación física del movimiento celeste, sobre todo en cuanto la tradición platónico pitagórica que marcará el desarrollo posterior de la astronomía se basará en la premisa de que el estudio de los cielos tiene como objetivo el introducir construcciones matemáticas aceptables para *salvar los fenómenos*.

En suma, existen en el cosmos platónico cinco velocidades orbitales: la que es común al Sol, Mercurio y Venus y las cuatro específicas de los cuatro astros restantes, que siendo diferentes entre sí, se ordenan de acuerdo a un principio ya insinuado en *República* (616c), según el cual la velocidad es inversamente proporcional a la circunferencia de la órbita, es decir que los planetas más cercanos a la tierra giran a mayor velocidad que los más lejanos. Recapitulando: la Luna orbita a una velocidad mayor que el Sol, Mercurio y Venus; estos tres orbitan a la misma velocidad, que a su vez es mayor que la de Marte, siendo la de Marte mayor a la de Júpiter y ésta mayor a la de Saturno (*Timeo*, 36d-39b).

En cuanto al sentido de la órbita, los planetas se desplazan de derecha a izquierda siguiendo el movimiento de lo *Otro*. Sin embargo, Platón afirma que a Mercurio y Venus el Demiurgo les dio un impulso tal que se desplazan en dirección contraria al Sol, alcanzándolo y siendo alcanzados por éste según una ley determinada (*Timeo*, 38c-d). Este pasaje a dado lugar a varias interpretaciones desde la antigüedad, en cuanto no es posible que Platón haya querido decir *literalmente* que Venus y Mercurio se desplazan en sentido opuesto al Sol, no solo porque un desplazamiento de este tipo rompe con el movimiento adscrito al principio de lo *Otro*, sino en cuanto iría en contra de las observaciones astronómicas más elementales ya disponibles en época de Platón, según las cuales Venus y Mercurio no sólo se desplazaban en el mismo sentido que el Sol, sino que se mantenían siempre cerca de este. ¿Qué significa entonces el *impulso opuesto* de Venus y Mercurio?. Haciendo un trabajo de compulsión y reorganización de

diferentes tradiciones interpretativas, B. L. Van Der Waerden (1992) propuso una tesis según la cual la explicación platónica de las órbitas de Marte y Venus alude a una teoría epicíclica desarrollada previamente en el marco de la tradición pitagórica, por lo que el impulso opuesto de ambos planetas corresponde al sentido de los epiciclos en que se desplazan⁷. Esta tradición interpretativa había sido anteriormente puesta en duda por T. Heath (1921) y N. R. Hanson (1978), manejando Heath la idea de que bajo la influencia de su discípulo Heráclides del Ponto, Platón habría considerado a Venus y Mercurio como satélites del Sol, lo que daría una imagen algo diferente del ordenamiento planetario del *Timeo*.

Asimismo, Hanson (1978) señaló que la astronomía platónica toma en cuenta que los planetas no están en el mismo plano que la Tierra, aunque no maneja la posibilidad de que las órbitas planetarias mantengan distintas inclinaciones sobre la eclíptica, es decir que no estén todas inscritas en el círculo de lo *Otro*. No obstante, a entender de Hanson Platón fue el primero en tomar debida cuenta de los movimientos *aberrantes* —no circulares y uniformes— de los planetas, aunque se habría dedicado más a lidiar con anomalías conocidas que a buscar nuevas dificultades.

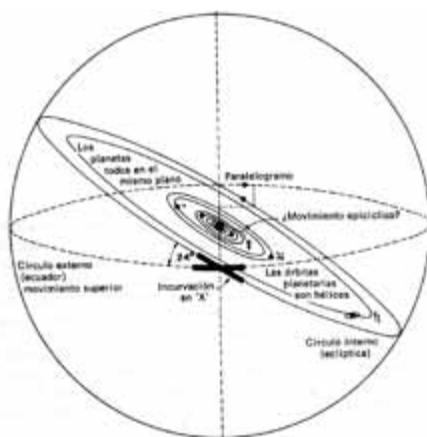


Figura 3. El modelo cosmológico (en Hanson, 1978).

V. Teoría de los poliedros

La sustancia utilizada por el Demiurgo para crear el mundo sensible se divide en cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Platón consideraba erróneos los intentos de los presocráticos de explicar a partir de uno de ellos el origen de los restantes (*Carta VII*, 343e), por ello no considera irreductibles a los elementos, sino que introduce la noción de un principio contenido en todos los cuerpos, que sostiene los cambios constatados en ellos. Este principio no es material, sino de orden geométrico, ya que aire, fuego, agua y tierra están compuestos de partículas indivisibles, a las que llega Platón razonando de la siguiente forma: todos los cuerpos poseen profundidad —tienen volumen, son tridimensionales—, y todo lo que tiene volumen tiene también superficie, por lo que todos los cuerpos constan de superficies que conforman volúmenes (*Timeo*, 53c). A su vez, toda superficie situada sobre un plano puede

⁷ Para un tratamiento detallado de la teoría de los epiciclos, véase en este mismo volumen el artículo de Cristián C. Carman, «La teoría planetaria de Claudio Ptolomeo» (*comps.*).

ser dividida en triángulos, y por último, todos los triángulos posibles pueden ser seccionados hasta reducirlos a dos tipos: el rectángulo isósceles y el rectángulo escaleno; por lo que éstos dos triángulos conformarían la estructura última de la realidad (*Timeo*, 53d-54b). Al igual en el diseño del Universo, el Demiurgo crea los triángulos elementales que componen los cuerpos a tomando como modelo los triángulos ideales (*Timeo*, 56c).

En este punto, el objetivo de la investigación platónica consiste en descomponer las estructuras más generales —compartidas por todos los cuerpos— e inmediatas —ya que son las primeras que conocemos— de la materia, empezando por el volumen y pasando luego a la superficie, hasta llegar a una estructura que ya no pueda ser reducida a otra. Podemos establecer que la estructura última está compuesta por estos dos triángulos —rectángulo escaleno e isósceles— desde el momento en que una vez que dividiendo cualquier superficie obtenemos alguno de los dos, y podemos seguir efectuando divisiones que reproduzcan de modo invariante el triángulo obtenido (*Timeo*, 54c-d), por lo que éste tendría el carácter irreductible que le fue negado respectivamente a los elementos, al volumen y a la superficie.

Si los cuerpos —que son tridimensionales— están formados de triángulos —que son bidimensionales— debe haber un tipo de entidades que permitan explicar con precisión el pasaje de los triángulos a los cuerpos, más claramente el pasaje de la superficie a la profundidad. Estas deben al mismo tiempo ser tridimensionales y estar conformadas por triángulos, requisitos que cumplen únicamente los cinco poliedros regulares, sólidos tridimensionales cuyas caras están compuestas de planos equiláteros. Estos son el tetraedro —4 caras triangulares—, el cubo —seis caras cuadradas—, el icosaedro —20 caras triangulares—, el octaedro —8 caras triangulares—, y el dodecaedro —12 caras pentagonales— (*Timeo*, 54d-55c). Los poliedros ofician como corpúsculos tridimensionales mínimos —son la mínima estructura que se puede obtener con tres dimensiones— que componen los elementos, de modo que las diferencias en la composición de los poliedros explican las diferencias entre tierra, fuego, aire y agua.

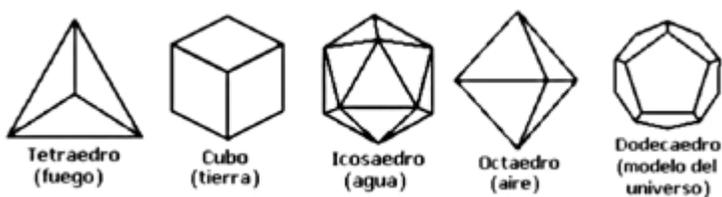


Figura 4. Los poliedros regulares.

De este modo, los corpúsculos cúbicos forman la tierra, ya que el cubo se compone de triángulos —rectángulos isósceles— distintos a los de los otros poliedros —rectángulos escalenos— y esto explica porque la tierra no puede transformarse en ninguno de los otros tres elementos. Además, la tierra es el más sólido de los cuatro cuerpos, y el cubo es el que tiene la base más estable entre los cuatro poliedros; de esta forma quedan el cubo y sus respectivos triángulos isósceles rectángulos identificados como sustrato de la tierra (*Timeo*, 55d-56a).

Para los tres elementos restantes el criterio es el siguiente: cuanto menor número de bases tiene un poliedro, mayor movilidad posee; por lo que al elemento más móvil —más volátil— le corresponderá el poliedro con menor número de caras. El fuego —considerado como el elemento de mayor volatilidad— queda así identificado con el poliedro de menos

caras, el tetraedro (4). Al agua, considerada como elemento menos móvil de los tres, le corresponde el poliedro de mayor número de caras, el icosaedro (20), y en un lugar intermedio se sitúa el aire, identificándose con el octaedro (8 caras) (*Timeo*, 56a-c).

Queda por último el dodecaedro, a quien Platón no lo identifica con ningún elemento, asignándole de modo muy poco claro la función de ser el modelo a partir de cual el Demiurgo diseñó el Universo (*Timeo*, 55c), por lo que la esfera celeste podría tener origen en el quinto sólido (Crombie, 1979/ Zeyl, 2009). Seguramente la primera de las muchas interpretaciones de este pasaje haya sido la de Filipo de Opunte, más que probable autor del diálogo apócrifo *Epinomis*, antiguamente atribuido a Platón. Según el *Epinomis*, el dodecaedro corresponde al *éter*, quinto elemento que da base en principio a la materia celeste (*Epinomis*, 982a). Una interpretación divergente recién parece tomar forma en el s. II de nuestra era, cuando el neoplatónico Albino identifica al dodecaedro con el modelo general del universo y asimila sus doce caras con las doce constelaciones del zodiaco (Whittaker, 1974).

Como se señaló, los cinco poliedros tienen en común el hecho de que pueden ser triangulados, es decir que seccionando sus caras pueden obtenerse triángulos. Las caras del tetraedro, (4) el octaedro, (8) y el icosaedro (20) están compuestas de triángulos equiláteros, por lo que el procedimiento se lleva a cabo seccionando cada equilátero a la mitad, de lo que resultan dos triángulos rectángulos escalenos; luego se traza una línea desde el vértice formado por la hipotenusa con el cateto menor de uno de los escalenos hasta la hipotenusa del otro, —y viceversa— obteniendo así 6 rectángulos escalenos (ver figura 5).

En el caso del cubo (6 caras) con una división basta, ya que trazando las dos diagonales de los cuadrados que conforman cada cara se obtienen los triángulos rectángulos isósceles. En el caso de tetraedro, dividiendo de esta manera los triángulos que conforman cada una de sus cuatro caras se obtienen seis triángulos rectángulos escalenos, por lo que la estructura básica del tetraedro, y por tanto del fuego, estaría compuesta por 24 triángulos rectángulos escalenos (seis por cara). Finalmente para el dodecaedro, poliedro de 12 caras pentagonales, no triangulares, Platón no introduce ningún procedimiento de triangulación, aumentando aún más la incertidumbre ya mencionada respecto del papel del quinto sólido en el sistema.



Figura 5. La triangulación de los poliedros.

El octaedro, estructura básica del aire, está compuesto de ocho caras en forma de triángulos equiláteros, de cada una de las cuales se obtienen igualmente seis rectángulos escalenos, por lo que el octaedro está compuesto de 48 rectángulos escalenos. Igualmente el icosaedro —20 caras conformadas por triángulos equiláteros— sustrato del agua, se conforma de seis triángulos rectángulos escalenos por cara, lo que a razón de 20 caras da un total de 120 rectángulos escalenos. En cuanto al cubo, sustrato de la tierra, que se compone de cuatro triángulos isósceles —no escalenos como en los tres poliedros anteriores— por cada una de las seis caras, da un total de 24 triángulos rectángulos isósceles.

Desde el momento en que el agua, el aire y el fuego están compuestos por el mismo tipo de triángulo —rectángulo escaleno— es posible que cada uno de estos elementos se convierta en el otro (*Timeo*, 56d-57b). El pasaje, por ejemplo, del fuego al aire se produce por una redistribución de los triángulos que en el fuego conformaban un tetraedro, los cuales al convertirse en aire se reagrupan formando un octaedro. Esto quiere decir que de un cuerpo de agua compuesto por 120 triángulos se pueden obtener dos cuerpos de fuego de 48 triángulos cada uno (suman 96) y uno de fuego con 24 triángulos ($24 + 96 = 120$). Análogamente, de la reunión de 5 cuerpos de fuego ($24 \times 5 = 120$) se puede obtener uno de agua, y del mismo modo con todas las combinaciones posibles. Esto vale para aire, fuego, agua y sus respectivos poliedros, pero no para el cubo, ya que los triángulos rectángulos isósceles que lo componen no pueden formar ninguno de los otros tres poliedros, por esto es imposible que la tierra pueda transformarse en alguno de los otros tres elementos (*Timeo*, 56d).

En el caso de los triángulos isósceles rectángulos que conforman el cubo, podemos establecer que cada uno de sus catetos = 1. No se trata de un «centímetro» o una medida geométrica cualquiera; sino de una abstracción matemática efectuada por Platón partiendo del hecho de que estos triángulos constituyen la estructura última de la materia, y que por tanto sus lados deben corresponder a una unidad indivisible, irreductible a otra cosa. Si los catetos de los isósceles que conforman el cubo valen 1, entonces, de acuerdo al teorema de Pitágoras, la hipotenusa valdrá:

$$\sqrt{1+1}$$

El número resultante es la raíz cuadrada de $2 = 1,414213562373\dots$ Se trata de un número irracional, que daría medida a la hipotenusa de los isósceles constitutivos del cubo. Los otros cuatro poliedros están constituidos por triángulos escalenos, de los cuales podemos igualmente tomar 1 como medida del cateto menor y 2 como medida de la hipotenusa, de aquí que la del restante cateto equivalga a la raíz cuadrada de 3: $1,732050807568877\dots$ En ambos casos aparecen números irracionales incluidos en los triángulos que conforman el sustrato último de la realidad. Cabe recordar que el descubrimiento de los irracionales había provocado una aguda crisis en la escuela pitagórica, afectando seriamente la concepción del número como ente perfecto y mensurable por definición, y marcando por tanto una fuerte deficiencia en el intento pitagórico de construir una cosmología —además de una ética y una física— de base matemática (*Leyes*, 819d-820c; Farrington, 1957). En este sentido puede verse a la teoría de los poliedros de Platón como un intento de esclarecer el lugar ocupado en el cosmos por esas nuevas realidades matemáticas, los números irracionales, confinándolos al mundo sensible.

Con 26 siglos de conocimiento científico generado desde la época de Platón hasta la fecha, es natural que hoy en día las teorías expuestas en el *Timeo* parezcan una serie de metáforas arbitrarias, un juego antojadizo que interpola asistemáticamente astronomía, geometría, física, aritmética y mera imaginación. No es extraño encontrar referencias al platonismo como una poderosa fuente de estancamiento del progreso científico. Arthur Koestler habló de una *cosmología surrealista* (Koestler, 1986: 36), y George Sarton se refirió a la «inmoderada e irracional matematización platónica de todas las cosas.» (Sarton, 1965: 356), que convertía al *Timeo* en un ejemplo cabal de *mala ciencia*, afirmando que dado su estilo críptico y el carácter cuasi divino que se le atribuyó por siglos, se trata de una de las obras de influencia más perjudicial de la historia intelectual de Occidente.

Cabe señalar que visiones de esta clase parten por lo menos de dos premisas erróneas. Primero, el habitual error historiográfico de evaluar los méritos de las teorías del pasado en función del conocimiento científico del presente. Bajo esta premisa, no podemos afirmar otra cosa que la absoluta falsedad de los modelos platónicos tanto en física como en astronomía. Pero si esa falsedad surge como resultado automático de la asunción de la verdad de las teorías que hoy aceptamos, bastaría que éstas pudieran ser razonablemente puestas en duda o declaradas falsas para que la interpelación de las teorías del pasado realizada en estos términos perdiera sentido. Por esto, solo podemos juzgar los méritos absolutos de las teorías del pasado en función de las teorías del presente si asumimos como absolutamente verdaderas estas últimas; asunción difícil de sostener en función de lo que muestra la historia del conocimiento científico.

En segundo término, sólo puede considerarse al platonismo como un obstáculo para el desarrollo del conocimiento científico si se desconoce o minimiza su influencia en algunos de los períodos más sobresalientes de la historia de la ciencia. Puede señalarse la fuerte influencia de la tradición platónico-pitagórica en el fructífero desarrollo de la matemática griega del período helenístico, particularmente en la obra de Euclides, y en astronomía en la obra de Claudio Tolomeo. Asimismo, en el desarrollo de la revolución copernicana, es relevante la influencia de Platón y del platonismo en algunos de sus participantes más connotados, como ser los casos de Copérnico, Kepler y Newton, descontando que la influencia en Galileo de la tradición platónico-pitagórica pueda resultar objeto de controversia⁸. Toulmin y Goodfield (1963) señalaron que el proceso de matematización de la física moderna dado a partir de Galileo es en cierta medida una realización de los ideales de Platón. En otro orden Lloyd (2007), ha señalado que el *Timeo* posee una importancia decisiva en el desarrollo histórico de la química moderna, a través de su influencia en los fundamentos de la temprana alquimia.

Finalmente uno de los físicos más destacados del XX, Werner Heisenberg, supo señalar en la doctrina platónica el antecedente de uno de los más importantes descubrimientos de la ciencia contemporánea: la imposibilidad de expresar la constitución última de la materia en un lenguaje que no sea el matemático:

Creo que en este punto la física moderna se ha decidido definitivamente por Platón. Porque realmente las unidades mínimas de la materia no son objetos en el sentido ordinario de la palabra; son formas, estructuras o ideas —en el sentido de Platón— de las que sólo puede hablarse sin equívocos con el lenguaje matemático (Heisenberg, 1974: 182).

VI. Bibliografía

Aristóteles (1973), *Obras*, Madrid, Aguilar.

Cícero (1951), *De Finibus bonorum et malorum*, Londres, The Loeb Classical Library, Harvard University Press/ William Heinemann, Ed. H. Rackham.

8 Véase en este mismo volumen los artículos de Cristián C. Carman, «La teoría planetaria de Claudio Ptolomeo», Marina Camejo, «Conceptos fundamentales de la teoría copernicana», Inmaculada Perdomo Reyes, «J. Kepler (1571-1630): la creatividad y el rigor en la búsqueda de la armonía del mundo», y Godfrey Guillaumin, «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*).

- Cornford, F. (1966 [1937]), *Plato's cosmology: the Timaeus of Plato translated with a running commentary*, Londres, Routledge & Kegan Paul.
- Crombie, I. (1979 [1962]), *Análisis de las doctrinas de Platón*, Madrid, Alianza.
- Duhem, P. (1969 [1908]), *To Save the Phenomena*, Chicago-Londres, University of Chicago Press.
- Evans, J. A. (2005), *The Emperor Justinian and the Byzantine Empire*, Westport, Greenwood Press.
- Farrington, B. (1957 [1953]), *Ciencia Griega*, Buenos Aires, Hachette.
- Finley, M. (s/f [1963]), *Los griegos de la antigüedad*, Barcelona, Labor.
- Fraile, G. (1971), *Historia de la Filosofía*, Madrid, BAC.
- Gregory, A. (1996), «Astronomy and observation in Plato's *Republic*», en *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 27, N.º. 4.
- Hanson, N. R. (1978 [1973]), *Constelaciones y conjeturas*, Madrid, Alianza.
- Hare, R. M. (1991 [1982]), *Platón*, Madrid, Alianza.
- Heath, Th. (1921), *A History of Greek Mathematics*, Oxford, Oxford University Press.
- Heisenberg, W. (1974 [1971]), *Más allá de la física*, Madrid, BAC.
- Hicks, R. D. (1965 [1925]), *Diogenes Laertius: Lives of Eminent Philosophers*, Massachusetts/ London, The Loeb Classical Library, Cambridge, Harvard University Press/ William Heinemann, 2 v.
- Johansen, Th. K. (2008), «The Timaeus and The Principles of Cosmology», en Fine, G. (ed.), *The Oxford Handbook on Plato*, Oxford, Oxford University Press.
- Kirk, C.; Raven, J. (1987 [1957]), *Los filósofos presocráticos*, Madrid, Gredos.
- Koestler, A. (1986 [1959]), *Los sonámbulos*, Barcelona, Salvat.
- Lloyd, D. R. (2007), «The Chemistry of Platonic Triangles: Problems in the Interpretation of the Timaeus», en *International Journal for Philosophy of Chemistry*, v. 13, n.º 2.
- Melogno, P. (2008), *Platón y Euclides: pilares de la tradición matemática griega*, Montevideo, CEBA.
- Mourelatos, A. (1981), «Astronomy and kinematics in Plato's project of rationalist explanation», en *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 12, n.º 1.
- Plato, *Timaeus* (1952), London, The Loeb Classical Library, Harvard University Press/ William Heinemann, Ed. R. G. Bury
- Platon (1972), *Obras Completas*, Madrid, Aguilar.
- Plutarch (1952), *The Lives of the Noble Grecians and Romans*, Chicago, Encyclopaedia Britannica/ William Benton.
- Plutarch (1959), *On Exile*, The Loeb Classical Library, Cambridge, Massachusetts/ London, Harvard University Press/ William Heinemann.
- Popper, K. (1979 [1963]), *El desarrollo del conocimiento científico. Conjeturas y refutaciones*, Buenos Aires, Paidós.
- Proclus de Lycie (1948), *Les Commentaires sur le premier Livre des Elements D'euclide*, Paris, Abel Blanchard.
- Reale, G. (2003 [1997]), *Por una nueva interpretación de Platón*, Barcelona, Herder.
- Ross, D. (1997 [1951]), *Teoría de las ideas de Platón*, Madrid, Cátedra.
- Sarton, G. (1965 [1952]), *Historia de la Ciencia*, Buenos Aires, Eudeba.
- Simplicius, *On Aristotle's On the Heavens*, II, 12, 292b10, en <<http://www.calstatela.edu/faculty/hmendel/Ancient%20Mathematics/Philosophical%20Texts/Astronomy/Simplicius%20InDeCael.pdf>>.
- Toulmin, S.; Goodfield, J. (1963 [1961]), *La trama de los cielos*, Buenos Aires, Eudeba.
- Tucidides (1988), *Historia de la Guerra del Peloponeso*, Madrid, Cátedra.
- Van Der Waerden, B. L. (1992), «The motion of Venus, Mercury and the Sun in early greek astronomy», en *Archive for History of Exact Science*, v. 26, n.º 2.
- Whitaker, J. (1974), «Parisinus Graecus 1962 and the Writings of Albinus», en *Phoenix*, 28, 3.
- Zeyl, D. (2009), «Plato's Timaeus», en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <<http://plato.stanford.edu/entries/plato-timaeus/>>

2. Ciencia y método en Aristóteles

I. Breve biografía de Aristóteles

Aristóteles nació en Estagira (Macedonia) en el año 385/4. Nicómaco, su padre, oficiaba como médico del padre de Filipo de Macedonia, el rey Amintas III, que se decía descendiente de la familia de los Asclepiádes, una de las dinastías médicas supuestamente descendientes de Asclepios. En su infancia debió Aristóteles estar ligado a la corte macedonia y a la vida palaciega.

En el 367/6, cuando tenía diecisiete años, se trasladó a Atenas sin perder la ciudadanía de Estagira, donde ingresó en la Academia platónica para estudiar. Platón debía tener unos cincuenta años por aquel entonces, y Aristóteles se convirtió en uno de sus discípulos más brillantes («el lector» le llamaba Platón) y en su mayor crítico. Allí colaboró en la enseñanza y escribió algunos diálogos a la manera platónica, de los que quedan unos pocos fragmentos: *Gryllos* o *De la Retórica*.

En el 347 muere Platón, que había designado a su sobrino Espeusipo como sucesor en la dirección de la Academia y Aristóteles la abandona y se dirige a Asso (Eólida) acompañado de Jenócrates y Teofrasto. Allí, donde trabajaban algunos platónicos, se convierte en consejero político y amigo del tirano Hermias de Atarneia, con cuya sobrina, Pitia, se casará más tarde. Bajo su influencia, Hermias suavizó su política reformando su constitución. Paralelamente, Aristóteles fundó una escuela de carácter marcadamente científico, sobre todo en el campo de la investigación biológica.

Tres años más tarde se traslada a Mytilene de Lesbos, inducido por el mismo Teofrasto, donde enseñó hasta el año 343/2, momento en el que es invitado por Filipo de Macedonia a aceptar el cargo de preceptor de su hijo Alejandro, el heredero del trono. Trató Aristóteles de convertir al futuro rey en un verdadero griego, pero Alejandro tendrá una visión política imperialista al modo oriental, incompatible con los ideales griegos de libertad, autonomía y ciudadanía.

En Pela, corte del rey de Macedonia, Aristóteles tiene noticias del trágico fin de Hermias, sometido a tortura y luego crucificado por haber conspirado con Filipo II de Macedonia contra los persas. La aflicción que le causó queda de manifiesto en la inscripción y el bello himno que compuso Aristóteles a su muerte. Cuando muere Filipo (335-334), Alejandro sube al trono y Aristóteles regresa a Atenas donde funda El Liceo o Perípatos (especie de

peristilo o galería cubierta donde se discutía y se paseaba, que estaba situado cerca del santuario de Apolo Licio). Allí ejerció sus propias enseñanzas durante trece años separado ya del platonismo de la Academia.

En el Liceo se creará por primera vez una de las más importantes bibliotecas en las que se recopilaban los más diversos temas: investigación histórica, historiografía filosófica, obras científicas sobre biología, física, etcétera.

A la muerte de Alejandro, en el 323, en Atenas se produce una reacción antimacedónica, y como Aristóteles estaba ligado con la monarquía de Macedonia, se le amenaza con un proceso de impiedad, acusándole de haber inmortalizado a Hernias en el himno que le compuso a su muerte. Temiendo correr la misma suerte que Sócrates, Aristóteles huyó de Atenas para refugiarse en Calcis de Eubea, lugar de nacimiento de su madre y donde se hallaba su propiedad familiar. Allí, una supuesta afección estomacal puso fin a su vida al año siguiente, cuando tenía sesenta y tres años de edad.

Consciente de su muerte, dejó un testamento (conservado por Diógenes Laercio, 2007) en el que deja a su familia (su hija Pytias, su hijo Nicómaco y su segunda mujer Herpillis) bajo la protección de Antipáter, lugarteniente de Alejandro, y a Teofrasto la dirección del Liceo. A la hija de su primer matrimonio la entrega en nupcias a su ahijado Nicanor, hijo del tutor que tuvo (Próxeno) cuando murieron sus padres. Aristóteles pide también que no se venda a sus esclavos y que se los libere en la edad adulta.

II. La obra de Aristóteles

Los escritos de Aristóteles pueden ser divididos en dos grupos:

1. Las «obras exotéricas»

Perdidas en los primeros siglos de la era cristiana, fueron publicadas por Aristóteles y literariamente eran diálogos similares a los de Platón. Tenemos constancia de alguno de los títulos de estas obras: *Eudemo o Del Alma*, *Protréptico*, *Gryllos o De la Retórica (contra Isócrates)*; *Sobre la Justicia*.

2. Los «escritos esotéricos»

Se trata de una serie de manuscritos, notas que probablemente Aristóteles utilizaba en sus cursos en el Liceo. Son los únicos que se han conservado, recopilados y ordenados por el último escolarca, Andrónico de Rodas. En la actualidad seguimos la ordenación y los títulos que les dio este último y listamos, a continuación, las obras según el sistema seguido por Bekker (1831-1870): *Organon*, *De la Interpretación*, *Primeros Analíticos* (dos libros), *Segundos Analíticos* (dos libros), *Tópicos* (ocho libros), *Refutaciones de Sofismas*, *Física* (ocho libros), *Tratado del Cielo* (cuatro libros), *De la Generación y de la Corrupción* (dos libros), *Metereológicos* (cuatro libros), *Tratado del Alma* (tres libros).

Tratados biológicos: *De la sensación*, *De la Memoria y del Recuerdo*, *De la interpretación de los sueños*, *De la respiración*, *De la Juventud y de la Vejez*, *De la longevidad y de la brevedad de la Vida*, *De la Vida y de la muerte*.

Historia de los Animales (diez libros), *De las partes de los animales*, *Del movimiento de los animales*, *De la marcha de los animales*, *De la generación de los animales* (cinco libros), *Problemas* (treinta y ocho libros), *Sobre Jenófanes*, *Meliso y Gorgias*, *Metafísica* (catorce libros), *Ética a Nicómaco* (diez libros), *Ética a Eudemo* (cuatro libros), *Gran ética*, *Política*

(ocho libros) *Económica* (dos libros), *Retórica* (tres libros), *Poética* (falta la segunda parte, sobre la comedia), *La Constitución de Atenas*.

III. La ciencia aristotélica

La ciencia, *episteme*, es un modo de saber diverso de otros tipos de saberes, que se caracteriza por su aspiración a formular rigurosamente las leyes que rigen los fenómenos, y a propiciar no sólo una descripción y explicación de los mismos, sino una predicción sobre su comportamiento futuro. Actualmente, casi todos nosotros tenemos alguna vaga noción de aquello a lo que denominamos ciencia, y distinguimos sus distintas ramas, por el ámbito al que se aplican estos conocimientos y por sus distintos métodos, formas de experimentación y verificación. Sin embargo, evidente para nosotros, no lo era en tiempos de Platón y Aristóteles.

El ideal de ciencia y la única *episteme* aceptada, para Platón y la Academia, lo cumplían estrictamente las matemáticas y la geometría, pues aunque ambas necesitan de imágenes sensibles para construirse en la razón, sin embargo, lo sensible mismo (sujeto al cambio y esencialmente cualitativo y heterogéneo) era sustraído de la investigación, que únicamente permitía como supuestos evidentes o *hypotheséis*, aquellos a los que se accedía por la pura intuición, sin intervención de la experiencia sensible.

El conocimiento del mundo sensible caía bajo los dominios de la *doxa*, la mera opinión, debido a que su ámbito de referencia gnoseológico (el conocimiento de lo sensible) venía determinado por su nivel ontológico, en este caso, el de ser meras copias del mundo de las ideas, y por ello mismo, un pseudo-ser.

Aristóteles fue, sin duda, un pensador independiente y pionero en su época. No sólo rehabilitó el conocimiento de los fenómenos naturales. También fue el primero en elaborar una teoría de la ciencia y en propiciar una satisfactoria autarquía a sus distintas ramificaciones en disciplinas diferentes. Esto constituyó una absoluta novedad en la Grecia Clásica, en la que aun regía un ideal de ciencia única (no desligada de la filosofía), especulativa y universal, cuyos primeros principios, aplicados con rigor, podrían explicar la totalidad de lo existente.

Aún habiéndose formado en la academia platónica, en la que llegó a ser uno de sus más aventajados alumnos, Aristóteles no aceptó el dualismo ontológico de su maestro, por el cual se establecía un *Chorismos* (una separación radical, un abismo) entre el mundo sensible del devenir que podemos observar y conocer a través de la experiencia (*empeiría*) y el mundo de las ideas, conocido por intuición racional y por reminiscencia (*anamnesis*). El verdadero objeto del conocimiento para Platón era lo universal (el *eidos*), y concebía a éste como existente por sí y separado ontológicamente del mundo sensible, que sólo tenía existencia en tanto que copia del mundo de las ideas⁹. Para Aristóteles, estos universales (que definen *qué* es la cosa, esto es: los rasgos esenciales e imprescindibles mediante los cuales podemos reconocer, delimitar y definir cualquier ser) no tienen existencia separada de las entidades a las que se refieren. Antes bien, son inherentes a las cosas. Por este motivo, nuestro conocimiento de la realidad siempre ha de partir de las cosas mismas, comenzando a formarse en primer lugar de la percepción (*aísthesis*). A partir de ésta, el hombre y otros animales pueden formarse un conocimiento momentáneo y fugaz para desenvolverse con eficacia en el mundo. El innatismo se da en la conducta, no en el conocimiento, como afirmaba Platón.

9 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melgno, «Astronomía y Física en Platón» (*comps.*).

Las percepciones pueden quedar registradas o grabadas en la memoria (*mneme*), de manera que podamos formarnos una noción o esquema muy general y rudimentario de lo allí almacenado, algo así como un *boceto* esquemático, cuya función consiste en unificar el caos de lo dado en la sensación bajo una misma y única experiencia (*empeiria*). A partir de esta experiencia ya unificada, podemos entonces abstraer y llegar a los conceptos universales.

De la percepción surge el recuerdo y de los recuerdos repetidos de lo mismo surge la experiencia, pues una multitud numérica de recuerdos constituye una única experiencia. De la experiencia, en que el universal entero ha alcanzado su reposo en el alma como una unidad distinta de los muchos e idéntica en todos sus casos particulares, proviene el principio de la técnica y de la ciencia (Aristóteles, *Segundos Analíticos*, 1964, II, 100-103).

El concepto universal (*katholou*), no obstante, siempre pertenece a las cosas singulares y concretas, y no tiene existencia objetiva separada de las cosas mismas. Se trata de una noción abstracta, formada en nuestro pensamiento al ir despojando de todas las cualidades y atributos superfluos a lo unificado en nuestra experiencia. El pensamiento «ve» el esquema bajo el cual se agrupan las impresiones sensibles. Se trata, por lo tanto, de un proceso cognoscitivo que necesita de la experiencia como condición de posibilidad.

Ahora bien, ¿qué clases de saberes podemos diferenciar y qué caracteriza a ese tipo de conocimiento denominado ciencia? La filosofía nace de nuestra relación con el mundo, de nuestro asombro como espectadores conscientes del devenir. Es el asombro el que nos lleva a preguntarnos por las cosas, sus procesos y por nuestro lugar en esta compleja urdimbre. Poseer cultura es, precisamente, hacer uso del asombro con sutileza y discernimiento. Algo así como ser poseedores de un buen juicio combinado con un sano sentido común.

La ciencia, no obstante, no es sinónimo de cultura, porque añade un requisito imprescindible para que pueda definirse como tal: ha de proporcionar un conocimiento verdadero y objetivo, independiente del ámbito al que se aplique. Así, podemos hacer una primera división de las ciencias:

- *Episteme poietike o techne*: las diferentes artes y oficios orientados a la producción. Su fin (*telos*) está subordinado a la producción o fabricación de algo según unas reglas o principios. Medicina, arquitectura, escultura, o la retórica son saberes productivos regidos por un principio de utilidad.
- *Episteme praktike*: se trata del saber práctico, de aquel que configura el territorio de la ética y la política. Como tales, no buscan una finalidad externa a sí misma, siendo ellas mismas su propio fin: comportarse individual o colectivamente de una manera adecuada y bella.
- *Episteme theoretike (ciencia teórica)*: cuyo objeto de saber es puramente teórico o especulativo. Este tipo de saber no busca producir algo, ni tiene como finalidad optimizar y regular nuestra conducta. Es por lo tanto, el único saber desinteresado y deseable por sí mismo. Buscamos en este caso el conocimiento como un fin en sí mismo, independientemente de su posible aplicación o de su ulterior utilidad.

Aristóteles nos da algunas notas características que ha de cumplir la ciencia teórica:

- Ha de proporcionar un saber general.
- Sus nociones y conceptos han de ser más exactos y objetivos que en otras ramas del saber.
- Su conocimiento ha de ser transmisible y capaz de evidenciar la estructura (las causas) de los fenómenos a los que se aplica.
- Ha de ser demostrable en sí, independientemente de sus resultados o aplicaciones.

- Su saber ha de mostrar con claridad los primeros principios (*archai*) sobre los que se fundamenta cada ciencia.

El saber teórico es, por todo lo dicho, el que presenta un mayor grado de autonomía y autoridad, comparado con aquellos saberes orientados a la producción y la utilidad. Ahora bien ¿qué son esos primeros principios a los que ha de llegar la *episteme theoretike* y cómo podemos acceder a ellos? Contestar a esta pregunta requiere dilucidar cómo podemos reconocer lo universal y común en la multiplicidad fenoménica y cómo podemos demostrar (*apódeixis*) que algo es y se comporta como decimos. En los *Analíticos Primeros*, Aristóteles desarrollará una teoría de la ciencia deductiva (o demostrativa) de la que más tarde surgirá su lógica formal o silogística.

Para poder hacer ciencia necesitamos razonar y argumentar de una manera correcta. El punto de partida de nuestros razonamientos ha de ser verdadero, indubitable, necesario y tener un carácter universal. Para ser tomados como *premisas*, los axiomas o primeros principios deben ser evidentes por sí mismos, y estar libres de la necesidad de ser demostrados a partir de otros principios. Aristóteles postuló la necesidad de un «comienzo» de todo saber. La cadena de principios que han de ser demostrados no puede proceder *ad infinitum*, pues careceríamos de un punto de partida sólido y fiable sobre el que construir la serie de premisas y silogismos bien formados que establece en su lógica.

Los primeros principios o los axiomas (*axiomata*) han de ser más inteligibles que lo que puede ser demostrado mediante ellos. Su conocimiento no ha de provenir directamente de la percepción, sino de una intuición racional, pura, que puede equipararse al *nous* de Platón. Además, los axiomas deberán ser anteriores a la conclusión, ya que tienen que determinar la estructura y la causa de ésta.

Son estos principios más universales los que contienen en potencia la conclusión y constituyen el punto de partida de la demostración que convertirá nuestra mera constatación inicial en un saber científico definitivo. Por eso, las premisas son anteriores y mejor conocidas que la conclusión. No sólo la implican, sino que también la explican. Son causas o explicaciones de la conclusión. Todo saber, y en especial el saber científico, es un saber causal o explicativo. Por ello no cualquier deducción a partir de premisas verdaderas, primeras e inmediatas constituye una demostración. Las premisas de la demostración deben expresar el porqué del qué expresado en la conclusión, deben expresar la causa o explicación del hecho expresado en la conclusión. La labor de la ciencia no consiste tanto en descubrir nuevas verdades, cuanto en explicar de un modo causal y necesario las verdades que ya previamente conocíamos por experiencia (Mosterín, 2007, 200-2001).

Ahora bien, las reglas de la ciencia deductiva tratada en los *Analíticos Posteriores*, no pueden, sin más, «importarse» a otros tipos de saberes, como por ejemplo a aquellos que han de explicar los fenómenos naturales o físicos. La ciencia demostrativa es un ideal metodológico que puede aplicarse con rigor a cierta clase de saber teórico: las matemáticas (aritmética y geometría). Esto es posible porque la matemática no trata con entidades substanciales y vivas, sino con el concepto de cantidad abstraído de las cosas concretas a las que se refiere; es decir, trata de la cantidad, discreta o continua, considerada en si misma¹.

También la teología es considerada una ciencia teórica, junto con la matemática y la Física. Como veremos más adelante, al estudiar la Física aristotélica, la teología se convierte en la condición de posibilidad de las demás ciencias, pues retrotrae su objeto de estudio a

1 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melgón, «Los Elementos de Euclides y el desarrollo de la matemática griega» (*comps.*).

la causa primera en la jerarquía de las causas: el Proton kinoun akineton, el primer motor inmóvil, el punto de anclaje de todo principio y de todo ser; primer principio, eterno e inmóvil sobre el que reposan el resto de los principios que podemos conocer observando el mundo del devenir.

La necesidad de un comienzo del «saber» conlleva, en el plano de la existencia, la necesidad de un comienzo del ser no en un sentido temporal (pues el primer principio es eterno), sino ontológico y lógico. Podríamos decir, incluso, que la aplicación del ideal metodológico deductivo hace necesario postular a Dios (un Dios muy diferente de las religiones monoteístas posteriores) como punto de arranque de todo el cosmos conocido y de toda posibilidad de conocimiento.

También la metafísica es especulativa. Pero no vamos a resolver ahora si trata de entes inmóviles y separados, aunque está claro que algunas ramas de las matemáticas los consideran en cuanto inmóviles y separados. Y, si hay algo eterno e inmóvil y separado, es evidente que su conocimiento corresponde a una ciencia especulativa, pero no a la física (pues la Física trata de ciertos seres movibles) ni a la Matemática, sino a otra anterior a ambas. Pues la Física versa sobre entes separados, pero no inmóviles, y algunas ramas de la Matemática, sobre entes inmóviles, pero sin duda no separables, sino implicados en la materia. En cambio, la Ciencia Primera versa sobre entes separados e inmóviles. Ahora bien: todas las causas (aitiai) son necesariamente eternas, y sobre todo éstas; porque éstas son causas de los entes divinos que nos son manifiestos.

Por consiguiente, habrá tres filosofías especulativas: la Matemática, la Física y la Teología (pues a nadie se le oculta que, si en algún lugar se halla lo divino, se halla en tal naturaleza, y es preciso que la más valiosa se ocupe del género más valioso. Así, pues, las especulativas son más nobles que las otras ciencias, y ésta («la teología»), más que las especulativas (Aristóteles, Metafísica, 1082, VI, 1, 1026a).

Vemos, por lo tanto, que el ideal de ciencia en Aristóteles sigue tomando como modelo la *episteme* platónica. La teología no sólo es una de las ciencias teóricas, sino que además se configura como la ciencia o «filosofía primera», el más bello y necesario de los saberes, tanto por su objeto (Dios), como por su necesidad metodológica.

El criterio para establecer una jerarquía de las ciencias se basa en su mayor proximidad a la axiomática y al conocimiento intuitivo de los *archai*. Sin embargo, Aristóteles muestra su genuina independencia de los científicos y filósofos de su época al extender los dominios de la *episteme* a otros campos del saber que habían sido despreciados y considerados como mera *doxa*, lugares sobre los que sólo pueden conjeturarse opiniones, sin pretensión de verdad (*alétheia*). De hecho, Platón nunca aplicó el término *episteme* al conocimiento de la Naturaleza o del mundo fenoménico, como sí lo hizo Aristóteles, que concedió a la Física el estatus de una ciencia en pleno derecho y delimitó otros dominios del saber científico en base a sus diferentes objetos de estudio o sus distintos métodos de investigación. Le debemos enteramente a él el mérito de haber inaugurado la física, la zoología o la psicología, entre otras disciplinas, y el haberlas dotado de una considerable autonomía.

Esta progresiva independización de las ciencias le ocasionó a nuestro filósofo ciertas discordancias con sus postulados lógicos, ya que necesitaba saber cómo aplicar el conocimiento deductivo a los procesos naturales, caracterizados por la heterogeneidad y el cambio constantes. Si el ideal de toda ciencia era el conocimiento de los primeros principios (*archai*), Aristóteles necesitará aceptar principios especiales para la Física, que es la ciencia de los seres móviles que tienen en sí su principio de movimiento y desarrollo y no dado por causas externas o meramente accidentales. A estos primeros principios de las ciencias de la

naturaleza no se podrá acceder por vía demostrativa, sino a partir de los fenómenos mismos, mediante *epagogé*, esto es: a través de un procedimiento inductivo:

La exactitud matemática del lenguaje no debe ser exigida en todo, sino tan sólo en las cosas que no tienen materia. Por eso, el método matemático no es apto para la Física; pues toda la naturaleza tiene probablemente materia. Por consiguiente, hay que investigar primero qué es la naturaleza, pues así veremos también claramente de qué cosas trata la Física, y si corresponde a una ciencia o a varias estudiar las causas y principios (Metafísica, 1982, II, 3, 995a).

Podemos acceder al conocimiento de los conceptos universales a partir de los datos suministrados por la experiencia mediante inducción, generalizando y abstrayendo lo facilitado por la experiencia hasta llegar, intuitivamente, a ciertos principios evidentes que posteriormente serán utilizados como axiomas con los que operar demostrativamente, utilizando las reglas del razonamiento y la argumentación lógica o silogística. «Es evidente que hemos de llegar a conocer las premisas primarias por inducción, pues el método por el que aun la percepción sensible siembra en nosotros el universal es inductivo.» (Aristóteles, *Segundos Analíticos*, 1964, II, 19, 415)

Así pues, queda abierto un camino que permite el conocimiento de lo universal partiendo de lo verdaderamente existente: la pluralidad de seres que constatamos a través de los datos que nos suministra la experiencia. En el contacto con el mundo del devenir, de las cosas y fenómenos sensibles y singulares, encontramos una vía de acceso a esos primeros principios (*archai*) «fácilmente inteligibles», que luego constituirán el «comienzo» y fundamento del saber científico. La inducción, además, resuelve otra dificultad añadida que presenta la ciencia estrictamente deductiva o demostrativa: no poder ofrecernos un progreso continuado del saber. El método inductivo nos salva de este aprieto, pues permanece abierto al reconocimiento futuro de nuevos fenómenos y de otras formas de conocimiento.

Todas las cuestiones comentadas hasta ahora han llevado al debate la pregunta de si puede considerarse a Aristóteles como un pensador (y científico) empírico o meramente especulativo. No es fácil resolver esta cuestión, ni podemos zanjarla tajantemente decantándonos por uno u otro bando. Aristóteles es empírico en tanto que se aferra a los hechos y a lo dado en la experiencia sensible para tratar de interpretar los fenómenos de la naturaleza. Pero dicha observación se halla previamente mediada por presupuestos teóricos que delimitan y determinan de manera «circular» no sólo el marco de la investigación y su objeto, sino también, sus propios fundamentos (fuera ya de la cadena deductiva).

Aún cuando [Aristóteles] acentúa tan enfáticamente su distancia de los métodos de Platón, a su parecer puramente especulativo, termina, en realidad, en un grado mucho mayor que aquel, en generalizaciones especulativas. Esto conduce, a veces, a la formulación de una teoría genial y correcta; a veces, a cosas absurdas (Düring, 1990, 806).

IV. La Física de Aristóteles

El término *physis* proviene de la raíz griega *phýsis*, que en su sentido originario significaba: brotar, surgir, salir a la luz, aparecer (manifestarse). En nuestro idioma *Phýsis* es traducido como «Naturaleza», aunque, como veremos en este apartado, en la Grecia clásica esta denominación era mucho más radical y omniabarcante.

La Naturaleza (*phýsis*) es un modo peculiar de ser de las cosas que se caracteriza fundamentalmente por poseer en sí mismo, espontáneamente, un principio de movimiento y

de reposo; de operatividad y desarrollo intrínseco. Lo que distingue a la *phýsis* de otros dominios de la realidad es su devenir constante, esto es: el cambio y el movimiento (*kínesis*).

El conjunto de todos los seres (*onta*) que poseen ese principio espontáneo de movimiento y desarrollo no es «la naturaleza», pues ésta es un principio (*arché*) que está más allá de los seres individuales a los que determina y no se agota en su multiplicidad. No hay «menos Naturaleza» si hay menos seres naturales (si pisamos una hormiga, por ejemplo). Aristóteles contrapone los seres artificiales (*ta techné onta*) a los seres naturales (*ta physei onta*). Los primeros no tienen en sí mismos un principio por el cual se comporten y lleguen a ser lo que son. Una copa, un edificio o un ordenador son producidos por la técnica (*techné*) y el saber especializado de un artesano, un arquitecto o un técnico. Todos dominan un conocimiento productivo que se rige por el principio de utilidad. El material (cristal, cemento, silicio) con el que se construyen los objetos artificiales, sí es «Natural», pero los objetos mismos fabricados (copa, edificio, ordenador) deben su ser a la acción productiva y el conocimiento de un «artesano» (*technités*) externo a ellos y no a un principio intrínseco y espontáneo de generación y desarrollo (de una copa no se genera espontáneamente otra copa).

Sin embargo, la producción constante de seres naturales (generación), su «llegar a ser lo que son» y su desaparición conforme a unas reglas y ciclos, es interna e inmanente a ellos mismos, es por *phýsis*. Nada externo a la semilla hace que ésta se desarrolle y convierta en un roble. Por eso, una semilla en un *ta physei onta*, un ser natural, y una mesa, fabricada con la madera de ese mismo roble, no lo es sino accidentalmente: sólo en tanto que es madera de roble (material) y no en tanto que es mesa.

Pues todas las cosas que existen naturalmente parecen poseer en sí mismas un principio de movimiento y de reposo, las unas bajo la relación de lugar, otras en el aspecto del aumento o la disminución, otras bajo el aspecto de la alteración. En cambio, el lecho y el vestido y cualquier otra cosa posible de este mismo género, en cuanto vienen significadas por estas denominaciones individuales o particulares, y en cuanto son producto de un arte, no poseen ninguna fuerza interna que los impela al cambio o al movimiento, mientras que sí lo poseen en cuanto accidentalmente son de piedra, de tierra o de una mezcla de estos elementos (Aristóteles, *Física*, 1964, II, 1).

La Física es, por lo tanto, una clase especial de ciencia cuyo ámbito de saber consiste en el esclarecimiento de la estructura y el funcionamiento de la *phýsis* y de los seres que son por *phýsis*, cuyas características esenciales son el movimiento y el cambio.

IV.a. Los primeros principios de la Física

Ya hemos mencionado antes que la postura aristotélica es sumamente independiente de sus antecesores, y que no puede ser clasificada, sin más, ni como empirista ni como estrictamente racionalista. Como afirma Düring (1990), Aristóteles llega a un «inteligente compromiso» entre la experiencia y la abstracción. No existe nada universal separado de las cosas singulares. En pureza, sólo éstas existen en el sentido propio del término. Lo universal, en tanto *eidós* o concepto abstracto, tiene existencia lógica, pero no objetiva y separada.

Cuando nos relacionamos con el mundo fenoménico, constatamos de hecho, que éste existe. Esto no hay que demostrarlo. Tenemos experiencia indubitable de un mundo externo diverso y primario en relación a nuestra percepción, y que está ahí dado, independientemente de que lo percibamos. Aristóteles, sin embargo, no postuló nunca una separación tajante entre sujeto y objeto. El concurso del alma modifica cualquier investigación «pretendidamente objetiva», debido a su papel manifestativo. En *De Anima* (1978, III 8, 432 b 21 y ss.), nos revela el filósofo que «el alma es en cierto modo todas las cosas».

Existir es, primariamente, ser manifestado como algo: esta casa, ese árbol, con estas cualidades distintivas o superfluas: dimensiones, colores, olores, textura... Existir es estar ya *establecido* en un aspecto. El verbo «ser» (en griego, *eînai*) se aplica a todo aquello a lo cual podemos atribuir algo (esta manzana es roja. Esta mujer es bella. La radio está arriba, el hombre está nadando...), pero no de la misma manera. *Eînai* se aplica a toda esta pluralidad de cosas, incluso a sus contrarias: todas son. Tienen ser. Sobre todo lo que pensamos podemos afirmar su existencia, aun de lo fabuloso e imaginario: las sirenas, los ovnis, los centauros son, de alguna manera.

Pero si todo tiene *ser* de alguna manera, ¿Lo poseen con idéntico sentido? ¿Se trata de la misma forma de ser? ¿Hay un solo ser o una sola forma de ser de la que participamos o hay múltiples formas de ser? ¿Tiene el mismo sentido la cópula «ser» en las proposiciones «yo soy un hombre» y en «yo soy impuntual»? ¿Puede un hombre dejar de ser hombre a ratos? ¿Y un impuntual no serlo más o, por lo menos, caritativamente dejar de serlo alguna vez?

Según Aristóteles, todos los sentidos del verbo ser se deducen de un análisis de las *proposiciones copulativas*, es decir aquéllas que conectan un predicado con un sujeto: «Sócrates es hombre»; «Alejandro es músico»; «Mónica es mayor que José»; «El alquiler es muy caro», etcétera. La estructura es la misma: *A (sujeto) es B (predicado)*, pero los tipos de predicación, no se refieren al sujeto de la misma manera, esto es, unívocamente. *Sócrates es hombre* responde a la pregunta ¿qué es Sócrates? Es decir, nos muestra los rasgos esenciales (hombre) de un sujeto (Sócrates), definiéndolo. Sin embargo, «Alejandro es músico» o «el alquiler es caro» no responde a la esencia de ese sujeto, ni lo define: Alejandro esencialmente es hombre y accidentalmente es músico. Uno puede dejar de ser impuntual o músico pero, hasta que muera, no puede dejar de ser hombre.

Todos estos sentidos del ser o tipos de predicación son denominadas por Aristóteles *kathégoríai*, (categorías), palabra griega que significa atribución, predicado. El predicado «hombre» no se refiere al sujeto de la misma manera que el predicado «caro» o «músico». *Hombre* hemos visto que responde a la pregunta ¿qué es algo?: es una *ousía*, una entidad de la cual pueden predicarse muchas otras cosas: está callado, está enfermo, está en África, está enfadado, etcétera. La *ousía* es, por lo tanto, la categoría elemental y sin ella no serían posibles los otros modos de predicación, que Aristóteles estipula en nueve, de una manera más bien provisional: cantidad (*posón*), cualidad (*poión*), relación (*prós ti*), lugar (*pou*), tiempo (*potè*), posición (*keîsthai*), posesión (*ékhein*), acción (*pioein*) y pasión (*páskhein*).

La *ousía* es la substancia concreta, la entidad, lo ente que, en tanto permanece como tal, puede ser sujeto de una serie limitada de predicados, sin restringirse ni reducirse a ellos. La tarea de la Física consistirá en determinar los principios que rigen a todas las *ousiai* (substancias concretas) que son naturales o por naturaleza (*phýsis*). Buscará el esclarecimiento de los *archai* (principios) que rigen la región de lo ente denominada por Aristóteles *ta physei onta*.

Podemos distinguir cuatro factores fundamentales en todo proceso natural:

- la materia;
- la forma;
- el movimiento;
- la finalidad del movimiento.

Todas las *ousiai* o entidades concretas son compuestos (*synolon*) de materia (*hylé*) y forma (*morphé*), siendo estos dos compuestos funcionales y relativos, separables tan sólo operativamente por el pensamiento. Mediante la forma (*morphé*), la substancia es un «algo», un

«qué» (caballo, hombre, bellota). Se trata, por lo tanto, de un principio de determinación y configuración esencial. Todos los caballos tienen la misma *morphé* invariable de ser «tales». El caballo lo es en virtud de esa determinación formal que, en sí, es eterna (muere este o ese caballo, pero no la posibilidad de ser caballo).

La materia (*hyle*) es un principio indeterminado que se hace manifiesto (sale a la luz) como presencia en virtud de la forma. La materia es pura potencialidad e indeterminación, y por lo tanto, incognoscible en tanto sólo *hyle*. Para ser conocida (percibida) debe recibir en sí algo diverso: una forma que la determine a ser esto o aquello (caballo, hombre). Es, por lo tanto, el substrato (*hypokeimenon*) último en el que toma origen toda manifestación y salir a la luz. La *hyle* es eterna.

La materia sólo puede conocerse *Kat' analogian*, por analogía, siendo únicamente el compuesto (*synolon*) de materia y forma (la ousía concreta y sensible), existente y perceptible. No debemos confundir la materia con el material (*eschate hyle*) de que está hecho algo (por ejemplo, madera, hierro, plástico...). Los materiales son ya sustancias compuestas de materia y forma porque contienen una determinación que permite reconocerlas y definir las como algo que puede ser conocido o percibido. Como principio material primario, la *hyle* es el fondo inagotable de indeterminación del que se nutre el devenir constante de seres, por ello mismo es incorruptible, eterno e incognoscible.

El *synolon*, que se corresponde con las *ousiai* sensibles y realmente existentes, es indivisible salvo por el pensamiento. Los coelementos que lo conforman, no pueden ser conocidos objetivamente por sí mismos, ya que aislados no tienen existencia real. Ambos principios eternos se hallan indisolublemente unidos el uno al otro.

IV.b. El movimiento

Si las *ousiai* que pertenecen a lo *ta physei onta* se caracterizan por tener en sí mismas su propio principio de movimiento y de reposo (*stásis*), será necesario estudiar el movimiento y el cambio si queremos saber qué es la naturaleza (*Phýsis*).

Aristóteles distingue dos tipos de movimiento observable en el mundo fenoménico:

1. *El cambio substancial (metabolé)*: se trata de aquel tipo de cambio mediante el cual aparecen nuevas sustancias (*génesis*) o desaparecen (*phthorá*), es decir, el nacimiento y muerte de las *ousiai* concretas.
2. *El cambio accidental o movimiento (kinesis)* propiamente dicho. Éste no afecta a la sustancia misma, sino a sus propiedades, cualidades y estados. En este tipo de cambios, la sustancia permanece como substrato permanente, adquiriendo o perdiendo ciertas determinaciones. Dependiendo de la clase de determinaciones que sean modificadas, pueden establecerse tres clases de cambios accidentales:
 - 2.1. *Cambio cuantitativo*: afecta a la cantidad. Consiste en un aumento o disminución de alguna propiedad de la *ousia*: por ejemplo, el crecimiento de un niño o el aumento del agua del cauce de un río.
 - 2.2. *Cambio cualitativo o alteración*: lo observamos cuando la sustancia cambia alguna de sus cualidades: una fruta madura, un árbol florece; en la vejez, encanecemos.
 - 2.3. *Cambio de lugar o traslación*: la sustancia cambia el lugar que antes ocupaba. Se trata del movimiento propiamente dicho: traslación o cualquier otro cambio espacial.

En su estudio del movimiento, Aristóteles trata de salvar el escollo en que se hallaban sus predecesores que, o bien afirmaban que ningún cambio era posible (Parménides, Zenón), ya que del no-ser no podía surgir nada, o bien mantenían la postura de que el cambio observado era una pura apariencia (Platón), e incluso una ilusión producida por nuestra propia alma (*phyché*). Esta polémica, vigente en época de Aristóteles, nuestro filósofo intentará zanjarla introduciendo dos series de conceptos totalmente innovadores:

- la forma (*eidós*, *morphé*), el substrato (*hypokeímenon*) y la privación (*stéresis*); y
- la potencia (*dýnamis*) y el acto (*enérgeia*).

El cambio (*kínesis*) puede explicarse con los tres primeros conceptos: El llegar a ser algo que todavía no se es no consiste en un tránsito de la nada al ser, ya que contamos con algo que permanece y sirve de sustrato a aquello que cambia: la *ousía* o substancia permanece en el cambio y se convierte en el sujeto (*hypokeímenon*) que padece o lleva a cabo ciertas transformaciones al perder, ganar o modificar alguna de sus determinaciones o formas. El árbol es el sujeto de la floración, que permanece como sujeto cuando pierde las hojas o regala sus frutos.

El sustrato puede estar privado de una forma (José no es músico) y llegar a adquirirla (José estudia y se hace músico). La privación (*stéresis*) no es un puro no-ser, sino un no-ser relativo: esto es: el poder ser potencialmente algo que aún no se ha manifestado, pero que se halla latente como posibilidad. José es potencialmente músico y, mediante una buena instrucción, llega a desplegar y cumplir ese talento. El cambio consiste en la adquisición por el sustrato de una forma (*morphé*) de la que inicialmente estaba privado, mas no imposibilitado. El niño llega a ser anciano, la fruta verde termina por madurar y la semilla acaba convirtiéndose en un esplendoroso roble. Todos ellos adquieren nuevas formas de las que estaban privados de una manera relativa. De esta forma, queda solventado el problema del cambio en Parménides: no se produce el paso de un no-ser al ser (lo cual es una imposibilidad lógica), ya que el sujeto del cambio permanece, y la privación no lo es en sentido absoluto, sino relativo: es privación de algo que de alguna manera se posee germinalmente. Aquí llegamos a la otra pareja de términos definida por Aristóteles, que permite explicar el cambio: la potencia y el acto.

Por potencia (*dýnamis*) entiende Aristóteles una capacidad pasiva de llegar a ser algo. Se trata de una posibilidad latente de ser lo que todavía no se es. Una semilla no es todavía un árbol, pero tiene esa forma de árbol en potencia. La semilla es un árbol en potencia y, si se dan las condiciones adecuadas, terminará por serlo en acto.

Acto (traducción escolástica, *actus*, del término griego *enérgeia*) es el cumplimiento efectivo de lo que se hallaba sólo potencialmente en la substancia. El acto se refiere a lo que se hace vigente, a lo que se manifiesta como tal, ya cumplido y perfecto. Actualizar es desarrollar una potencia, manifestarla como tal, en todo su acabamiento. Las flores potenciales de un membrillo desnudo en invierno, se actualizan, llegan a ser flores manifiestas en primavera. La posibilidad de ser «membrillo con flores» se actualiza efectivamente cuando la flor se ha desplegado y ya no queda, como tal, nada potencial en el ser flor.

A veces, también se utiliza el término *entelecheia* para designar el estado de completud y perfección alcanzado por un ente concreto. *Entelecheia* expresa un nivel de perfección aún mayor que *enérgeia* e indica que una entidad concreta o un proceso ha alcanzado su *telos*, su fin, el punto culminante al que naturalmente tiende.

Si relacionamos el par materia y forma, con el otro de potencia y acto, tenemos que la forma es el elemento actual del compuesto y la materia el elemento potencial. Pero ambos

son conceptos relacionales. Lo que en un momento dado es materia, en otro contexto diferente es forma. El bronce es materia respecto a la escultura, pero forma respecto a los materiales que lo constituyen (hierro y cobre). La escultura misma es materia respecto a la forma representada: Venus.

A partir de estos elementos o primeros principios de la *phýsis*, queda definido el movimiento como: «el acto imperfecto de lo que está en potencia en tanto sigue estando en potencia».

Todo devenir (*kinesis*) es un proceso inconcluso en sí mismo: se trata de un estado intermedio entre la potencia y el acto, no siendo ni lo uno ni lo otro, sino el tránsito de lo uno (lo potencial) a lo otro (al acto). Algo que está sólo en potencia no tendrá movimiento, a no ser que la potencialidad vaya gradualmente actualizándose y dejando de ser potencia. Tampoco habrá movimiento cuando ya no quede ninguna potencialidad por actualizar y se esté en un estado de total cumplimiento (acto). En los movimientos locales esto es fácil de ver: Un objeto que se traslada desde el punto A al punto B sólo estará en movimiento cuando no esté en ninguno de los dos, sino yendo del uno al otro: por ejemplo, el coche se traslada hacia B, alejándose de A.

En los cambios no locales que padecen los seres naturales, el movimiento es mucho más sutil, porque unos cambios se encadenan unos a otros en una serie indefinida, formando un continuo: la maduración de una fruta no tiene un punto de arranque definido y tampoco acaba tajantemente en un momento concreto; la fruta va madurando mientras va dejando de ser fruta para convertirse en semilla. El niño va creciendo hasta tomar una forma adulta paulatinamente.

El movimiento, característica esencial de todos los seres naturales, consiste en la actualización progresiva, pero sin llegar a término, de lo que está en potencia mientras sigue estando en potencia. Si la potencia está ya plenamente actualizada (en estado de *énérgεια*), ya no hay movimiento. Y si lo potencial sólo existe como potencial (Pedro es sólo francófono potencialmente, pero no habla ni entiende una palabra de francés porque no ha estudiado este idioma), el movimiento (aprender francés) no puede producirse. Por ello, Aristóteles caracteriza al movimiento como «acto incompleto» o imperfecto.

IV.c. La noción de causa (Aitía)

Con Aristóteles la Física adquiere pleno valor científico, dedicándose al estudio de los principios y de las causas (*aitiai*) que rigen a los seres naturales. No obstante, la noción de causa es, en este autor, bastante más compleja y amplia que la que utilizamos hoy en día y el término utilizado por él, *aitía*, hace referencia a todo aquello que explica el porqué (*tò diá ti*) algo es y se comporta como tal; aquello a lo cual se debe que algo sea. Como muy bien nos advierte Ingemar Düring:

Nosotros traducimos casi siempre *aitia* por causa. Inconscientemente suponemos que nuestro pensar causal se halla detrás del término. Pero, como ya he advertido, para todo el que reflexiona sobre las llamadas cuatro causas de Aristóteles, *aitia* tiene manifiestamente otro sentido. K. v. Fritz ha señalado que el pensamiento causal antiguo terminaba en un conocimiento de la estructura (Düring, 1990: 165).

Mediante un análisis de las *aitiai* de los fenómenos podemos llegar al conocimiento de la estructura de la realidad. Aristóteles distinguió cuatro clases principales de *aitiai*:

1. Materia (*hýle*): aquello de lo que procede algo. Responde a la pregunta *ex hou* (de qué se compone). Se refiere, por lo tanto, a la materia, a los materiales de los que algo está compuesto, por ejemplo, el bronce de una estatua.

2. Forma (*eîdos-morphé*): lo que determina a la cosa a ser lo que es. La forma, el modelo o arquetipo al que se ajusta. Lo que define a la cosa. Por ejemplo, la estatua representa la Venus Anadiomena.
3. Lo que inicia (*kinoum*): el comienzo de una transformación (*metabolé*). Aquello por medio de lo cual la cosa llega a ser. La causa eficiente. Por ejemplo, el escultor Lisipo.
4. El fin (*telos*): por el que algo llega a ser o el para qué (*hoû héneka*), el propósito o la meta. En este ejemplo la estatua se crea para adornar.

Para nosotros, que ya no somos aristotélicos, sólo el tercer *aition* es una *causa* en sentido moderno. Las dos primeras se corresponden con los pares materia-potencia y forma-acto. En los seres artificiales estas cuatro causas son heterogéneas y se diferencian totalmente: la causa material de una estatua es el bronce; la formal es la imagen que representa; la eficiente es el escultor que la produce y la causa final es el adorno y la conmemoración.

En los seres naturales, las *aitiai* formal, eficiente y final coinciden o se imbrican unitariamente: la forma (el *eidós*) es, a la vez, fin y agente, porque en la determinación de algo, la forma que le hace ser lo que es, está implícito todo el movimiento y transformación que le llevará hacia su fin, que no es otro que manifestarse plenamente como tal (como esa forma). El fin (*telos*) es el *eidós*. La meta hacia la que se encamina cada ser no es otra cosa que su propia realización y manifestación, en toda la plenitud y con todas las potencialidades desplegadas para alcanzar ese fin.

El fin (*telos*) de un ente rige de antemano todo su desarrollo y manifestación, como aquello en vista de lo cual algo cumple (actualiza, lleva a término) su forma o *eidós*. En el fuego, el itinerario (meta) ascendente que recorren sus llamas está determinado por su ser (*morphé*) que naturalmente tiende hacia arriba como a su lugar natural.

Si la golondrina hace su nido natural y teleológicamente, y natural y teleológicamente teje la araña su malla, y brotan igualmente las plantas sus hojas para proteger sus frutos, y las raíces no se desarrollan hacia arriba, sino hacia abajo, para buscar allí su alimento, es evidente que existe una teleología y una causa final en los seres que produce la naturaleza y que existen naturalmente (*Física*, 1964, II, 8, 199a). En esto consiste el llamado teleologismo aristotélico, en que la causa final (*telos*) está previamente presente en la *aitia* formal: la *morphé* o el *eidós* de algo lleva en sí el camino que hay que recorrer para llegar a su propio cumplimiento y desarrollo, a su propia manifestación como ser algo (caballo, por ejemplo). «Luego el existir y venir a ser con un fin determinado es algo inherente a todos los seres que se hacen y existen por obra de la naturaleza» (Aristóteles, *Física*, 1964, II, 8 199a).

El finalismo no sólo recorre todo el pensamiento aristotélico, sino que se convierte en la clave fundamental de toda lectura que pueda hacerse de este autor. Todos los procesos naturales se rigen por un fin que no es otro que su propio autocumplimiento (manifestación). Los procesos naturales son partes de un ciclo mayor, y operan en conjunto para que el fin se realice: el mantenimiento del orden (*taxis*) del cosmos. La Naturaleza se comporta como un organismo vivo en el que sus miembros cumplen al unísono la única tarea posible: llegar a ser lo que tienen que ser, aunque esto sólo sea posible mediante una serie de cambios sucesivos al servicio de este fin armónico y compaginado. El elemento formal, el *eidós* platónico, es ahora un constitutivo inmanente a las substancias (*ousiai*), por lo que el fin mismo se ve abocado a su cumplimiento, por así decirlo, desde dentro.

La jerarquía que se manifiesta en la naturaleza y que discurre de lo inanimado a lo animado hasta llegar al punto culminante que es el hombre, se deja translucir también en cada ente particular. En ellos, el elemento privilegiado es el formal, en tanto que determinante

inmanente al que la materia «aspira» de alguna manera. Lo potencial en ella está al servicio de la manifestación de la forma, al que tiende como a su fin y su Bien: «Y, según esta perspectiva grandiosa, todo el universo se aparece, de grado en grado, como una inmensa aspiración de lo indeterminado a lo más determinado, de la materia a la forma, de la potencia al acto, para encontrar su término, su fin y su explicación última en el Acto Puro, Dios.» (Chevalier, 1968: 292).

El universo es, por lo tanto una unidad funcional, cuyos miembros, sujetos al devenir, forman parte de una estructura que culmina en el *próton kinoun akineton*, en el primer motor inmóvil, Principio primero del que pende todo lo existente y punto cero de todo acontecer.

IV.d. El primer motor inmóvil

El hecho característico de la naturaleza es el paso constante de la materia a la forma o de la potencia al acto. La materia, por sí misma, no puede moverse, y necesita de una causa motora que, en los seres artificiales es extrínseca, e intrínseca o inmanente en los seres naturales. Ahora bien, si el Cosmos es como un organismo vivo, jerarquizado y en constante devenir ¿de dónde procede su movimiento? ¿cuál es la causa primera, la *arché*, del devenir del mundo como manifestación?

Aristóteles parte de la hipótesis de que «todo lo que se mueve es movido por algo». El movimiento, además, ha de producirse por contacto, ya que no se contemplaba la posibilidad de movimientos a distancia, inerciales o gravitacionales en su época. Sin contacto físico, A no puede influir o mover a B. Esto implica que la causa del movimiento (motor) y lo movido tienen que ser continuos y estar en contacto.

Si aceptamos que el universo es una unidad sin fisuras, y que la serie de cosas que mueven y, a la vez, son movidas por otros no puede ser infinita, entonces toda la cadena del movimiento ha de pender de un primer motor que sea él mismo inmóvil, *apathes*, inafectable y libre de proceso: el *Proton kinoun akineton*. El Primer Motor es causa eficiente y final de todo el cosmos, y como tal, es eterno e imperecedero, pues los principios constitutivos de todos los seres, la materia y la forma, también lo son. Este Primer motor mueve todo desde la eternidad, sin ser él mismo algo material, sino forma o acto puro al que todo tiende como a su máximo bien (*agathon*).

IV.e. Espacio y tiempo

Aristóteles maneja un concepto de espacio (*topos*) y tiempo (*khronos*) relacional, continuo y no substancial. El movimiento no es posible sin espacio y tiempo, y éstos son conocidos en tanto hay movimiento.

Si el cambio (*kinesis*) es la actividad de lo movido en tanto puede ser movido, y la actualización del proceso del movimiento ocurre siempre por contacto, el motor y lo movido han de ser contiguos. Este principio fundamentará los conceptos de espacio y tiempo, así como la imposibilidad del espacio vacío. Veámoslo:

Espacio o lugar (*topos*):

El lugar o el espacio no es un elemento físico, a la manera de un gigantesco recipiente, que albergue los seres. Tampoco es aquello *en donde* (*poû*, categoría de lugar) algo está o se mueve, sino que el lugar existe inseparablemente de las cosas, a la manera de un límite (*peras*). Por ello, no puede decirse que el espacio sea algo corpóreo (*hylé*) o substancial, ni que exista por sí mismo independientemente de las *ousiai* o como una propiedad suya

(*morphé*). «Es imposible que el lugar sea un cuerpo, pues habría dos cuerpos en un mismo sitio» (*Física*, 1964, IV, 1, 209a). «El lugar no es una parte ni una característica de los seres, antes es separable e independiente de cada ser» (*Física*, 1964, IV, 2, 209b).

Tampoco es algo incorpóreo, ya que el lugar es precisamente la extensión. Si el lugar fuera algo corpóreo, ocuparía necesariamente un espacio, lo cual es un sinsentido. El lugar pertenece, por lo tanto, a la categoría del «cuánto» referida a las entidades concretas. Como cantidad, puede medirse numéricamente (con cantidades discretas o números), a pesar no ser «ningún cuerpo». El espacio es una cantidad continua, o lo que es lo mismo, una cantidad (cuánto) que es susceptible de ser divisible ilimitadamente.

Aristóteles define el lugar como *el límite inmóvil más interno del cuerpo que contiene* y que está ahí siempre junto con el cuerpo:

Concebimos, pues, el lugar, como aquello que inmediatamente envuelve y contiene aquel ser de quien él se dice lugar. Entendemos que el lugar no es nada que forme parte del ser contenido; además que el lugar primero e inmediato no es ni mayor ni menor que la cosa localizada. Y, en fin, que puede ser abandonado por cualquier ser y que es separable de él (*Física*, 1964, IV, 4, 210b).

El límite inmediato de lo que rodea a algo es su lugar, lo que está en contacto con la cosa, circunvalándola, de manera totalmente contigua: el lugar de una casa, es la superficie aérea inmediata que la rodea. El lugar que ocupa nuestro cuerpo, es la periferia limítrofe con nuestra piel, y si vamos cubiertos, la cara interna de las ropas que llevamos. Ahora bien, si nuestro cuerpo se mueve, esto es, cambia de lugar, el espacio en sí no cambia, pues como límite, es inmóvil: tan sólo podemos determinar el movimiento de los cuerpos o su lugar por la relación que puedan tener dos o más de ellos entre sí. Un único cuerpo en el espacio haría imposible determinar su movimiento.

No existe, por lo tanto, un espacio fuera de las cosas, ya que éste no es más que su límite (*peras*) adyacente. En este sentido, Aristóteles fue absolutamente innovador, acercándose de una manera genial a una concepción del espacio afín a la moderna concepción espacial de la teoría general de la relatividad:

[El lugar] no es el concepto espacial de Newton; el espacio de Aristóteles no es una caja en la que se mueven las cosas. Él vincula el cuerpo y lo que lo rodea de manera que el cuerpo determine la geometría de lo que lo rodea y esta geometría no puede ser desligada del cuerpo. Lugar físico es un punto fijado por el pensamiento en un campo métrico que lo rodea. En sí este campo no es nada; no es un «espacio vacío», sino que se origina sólo mediante la cosa (Düring, 1990: 497).

Una vez demostrado que el espacio no existe fuera de las cosas o, lo que es lo mismo, que no tiene existencia por sí mismo, de ello se sigue que el espacio vacío tampoco puede existir². Contra los atomistas, que afirmaban su existencia como una necesidad lógica en la que se sustentaba su teoría materialista y cuantitativa del orden y generación del cosmos, Aristóteles argumenta su imposibilidad: no hay un espacio vacío fuera de las cosas, ya que como hemos visto, lugar es un concepto relacional, un límite (*peras*) de las *ousiai* tangibles. Tampoco hay espacio vacío entre los átomos, ni pueden explicarse los cambios materiales como cambios cuantitativos en su composición (rarefacción, condensación, etcétera). La materia en sí no existe, sino en tanto recibe una forma para manifestarse como esto o aquello. Por lo tanto, ni los átomos ni el espacio vacío pueden existir. Lugar es siempre lugar ocupado por algo en relación con algo y no tiene sentido intentar absolutizar conceptos que

2 «Si no existe el lugar, considerado como un intervalo sustancial, tampoco existirá el vacío» (Aristóteles, *Física*, 1964, IV, 8, 214b).

son relacionales, y menos aun, sustantivizarlos como entidades existentes por sí. La noción de espacio y de *hylé* aristotélica es incompatible con las teorías atomistas. El universo que conocemos está lleno, generosamente colmado de cuerpos, a la manera de una gran red viviente, en la que los seres en vecindad dialogan unos con otros para servir al conjunto. La naturaleza teme al vacío.

El tiempo (Khrónos):

Existe una clara conexión entre el espacio, el movimiento (*Kinesis*) y el tiempo (*Khrónos*). En cualquier movimiento local, A recorre un trecho hasta llegar a B. El tramo recorrido (observado espacialmente) es un continuo y por lo tanto, es susceptible de ser dividido en magnitudes discretas. Cualquier extensión puede ser dividida en tramos y medida como distancia recorrida.

Con el tiempo ocurre también algo parecido, aunque esta vez referido a la categoría del «cuándo» (*póte*). «El tiempo nos permite determinar el más y el menos del movimiento; el tiempo es, por tanto, una especie de número» (*Física*, 1964, IV, 11, 219b).

Con el tiempo no medimos espacialmente el movimiento, sino temporalmente, respecto a un «antes» y un «después». Mientras se da el movimiento y porque se da el movimiento (entendiendo por éste cualquier tipo de cambio o modificación local, cuantitativa o cualitativa) tenemos vivencia del tiempo. Al igual que el lugar está indisolublemente unido a las cosas, el tiempo es inseparable de lo que «le ocurre» a las cosas, de su devenir, puesto que no es más que un aspecto de este acontecer: aquel bajo el cual podemos medir y ordenar consecutivamente los «ahoras».

Nos encontramos, por lo tanto, con una definición de tiempo relacional y continua, que Aristóteles expresa de la siguiente manera: el tiempo es «el número del movimiento con respecto a un «antes» y un «después». En consecuencia, el tiempo no es idéntico al movimiento, sino que es el movimiento, en cuanto que tiene un número».

No hay tiempo sin movimiento, pero el tiempo no es idéntico al movimiento, sino aquel aspecto de él que es conocido y medido con ayuda de un número, según el antes y el después o lo que es lo mismo, el movimiento que es medido y situado entre dos «ahora». El *ahora*, no obstante, no es algo substancial, algo así como un corte en el movimiento o su unidad mínima. El «ahora» es algo que muta constantemente, y por ello, fundamenta la continuidad del tiempo (y del movimiento). Si el ahora fuese una medida unitaria, el antes y el después serían indiscernibles el uno del otro, y no podríamos percibir el movimiento. Como de hecho sí lo percibimos, cada ahora debe ser distinto. Tiempo y movimiento se miden mutuamente. Donde hay movimiento, hay tiempo.

¿Piensa Aristóteles que el tiempo es una medida subjetiva o que dependa del sujeto observador del movimiento, a la manera de una forma pura *a priori* kantiana? Ciertamente es el alma (*psyché*) la que mide el tiempo, y se presupone su actividad para medirlo. Pero el tiempo existe independientemente de que el alma lo perciba o no, al igual que ocurre con el movimiento. La postura aristotélica no es, por lo tanto, ni puramente subjetiva ni estrictamente objetiva, sino una sabia mezcla de ambas. La naturaleza nos ofrece un movimiento regular y circular del cielo que sirve como telón de fondo para toda actividad medidora del alma. El ciclo regular del movimiento de las estrellas y planetas nos proporciona la estabilidad suficiente como para que el alma tome su movimiento como unidad de medida.

V. Cosmología aristotélica

Ya hemos visto que la física aristotélica es un saber acerca de lo *cuantitativo*, no de lo *cuantitativo*, puesto que su objeto son los seres naturales sujetos a un devenir constante. La heterogeneidad manifestada en el mundo, difícilmente podrá ser matematizada (ideal que persiguen la mayoría de las ciencias actuales), porque nos las habemos con el mundo del movimiento, las cualidades y los fines. La diversidad que manifiesta la naturaleza no es una apariencia ni se debe a un fallo de nuestras lentes sensoriales, incapaces de captar lo permanente (y real) oculto bajo las máscaras del aspecto. Antes bien, la diversidad y el cambio es la intrínseca realidad de lo que se manifiesta como *Physis*.

Esta diversidad permite establecer una jerarquía en el cosmos. No todas sus regiones son homogéneas y presentan el mismo tipo de fenómenos ni los entes que allí habitan están sujetos a las mismas leyes o propiedades. Aristóteles establece una clara distinción entre dos regiones no reductibles la una a la otra, aunque sí comunicadas y abrazadas a una aspiración común: el *proton kinoun akineton*. Estas dos demarcaciones del cosmos son denominadas el mundo sublunar y el mundo supralunar.

V.a. El mundo sublunar

Es aquella región del cosmos en la que vivimos, nuestro mundo terrestre, y abarca aquella parte del universo situado por debajo de la luna, sin incluir a esta última. Como hemos ido viendo, lo que caracteriza a esta región es el cambio (*kinesis, metabolé*), sea substancial o accidental. Continuamente nacen y perecen multitud de seres; otros modifican su tamaño, peso, posición, temperatura o alguna otra cualidad. No hay quietud, ni vacío en nuestro mundo móvil y heterogéneo, ni seres eternos que no sufran alguna modificación. Mas sí observamos detalladamente, nos daremos cuenta de que en el mundo que habitamos, los movimientos tienen determinadas características y que hay ciertas reglas bajo las cuales se ordenan los fenómenos. Una de ellas es la finitud de los movimientos y de los seres.

En tanto que pura potencialidad e indeterminación, la materia existe siempre bajo tal o cual aspecto, como compuesto (*synolon*). En el mundo sublunar todos los cuerpos están compuestos de cuatro elementos primarios o formas elementales de organizarse la *hylé* indeterminada: tierra, agua, aire y fuego. Estos elementos no son lo que literalmente designan (la tierra real o el agua que bebemos, etcétera), sino designaciones para los elementos físicos constitutivos de todo compuesto, es decir, aquellos elementos que entran en su composición y que ya no pueden descomponerse en elementos más sencillos. Tierra, agua, aire y fuego tienen distintas cualidades primordiales y su distinta mezcla o el paso de unos elementos a otros (*metabolé*) es lo que explica la diversidad del mundo sensible, sus diferencias y distintas cualidades, así como los lugares naturales que ocupan y a los que tienden espontáneamente.

Así, la tierra es el elemento más pesado y su cualidad o fuerza primaria es lo frío y sólido (lo seco) que tiende a ocupar su lugar natural: el centro de la tierra que coincide en Aristóteles con el centro del universo. Por ello, si alzamos una piedra (ejerciendo sobre ella un cambio hacia un lugar que no le corresponde) y luego la soltamos, ésta simplemente tiende a caer, restaurando así su orden esencial.

El agua es el elemento que se sitúa inmediatamente por encima de la tierra y tiene como cualidad el ser frío y líquido (húmedo). Después se halla el aire, que es caliente y líquido (húmedo) y por último el fuego, el elemento más ligero del mundo sublunar, caliente y sólido (seco), cuya tendencia intrínseca le lleva a dirigirse hacia la periferia del mundo.

Las *ousiai* que encontramos en el mundo sublunar presentan mezclas (*meixis*) de los distintos elementos y tienen potencialmente cualidades opuestas en su composición, lo que explica el cambio continuo o el paso de una cualidad en su contraria, transformándose unos elementos en otros (por ejemplo, el agua del mar, fría y húmeda, se evapora o se convierte en hielo porque posee la potencia de ser caliente y húmeda). En los cambios accidentales el sustrato permanece, actualizando distintas formas que se hallaban en él potencialmente. En los cambios substanciales (generación y corrupción), es la materia última (*prote hylé*) la que permanece como substrato omnirreceptivo, capaz de contener en sí como pura potencialidad todas las cualidades afines o contrarias que vemos desplegarse en el universo. Es la *hylé* la que garantiza que el ciclo de la generación y de la corrupción se mantenga ininterrumpidamente, siendo la materia eterna, incorruptible e ingenerable. Los seres sublunares son finitos, corruptibles y sujetos a nacimiento y muerte, pero el ciclo en el que continuamente se manifiestan es un proceso eterno, mantenido por el *proton kinoun akineton*, principio último de todo devenir y de toda existencia:

Pues yo afirmo que la naturaleza tiende siempre a lo mejor, existir es indudablemente mejor que no existir. Pero no todo puede llegar a la existencia, porque algunas cosas están demasiado lejos de la fuente y del origen de la vida. En la existencia de los individuos se alternan la vida y la muerte; pero Dios encontró un camino para realizar la eternidad, al hacer eterna la generación. Porque así podría estar asegurada para todo el ser la mayor consistencia posible, porque la continuidad ininterrumpida del devenir es el acercamiento más próximo a la existencia eterna (*ousia*). Este ciclo eterno reproduce la rotación eterna del cielo y explica también lo que para muchos pensadores fue un problema, a saber, que en el tiempo ilimitadamente largo los elementos no han sido dispersados; esto tiene su razón en que ininterrumpida y alternativamente se convierten unos en otros; y porque se cambian constantemente, ninguno de ellos puede permanecer siempre en algún espacio dispuesto [por la naturaleza] (Aristóteles, Sobre la Generación y la Corrupción, II, 336b-337a, tomado de Düring, 1990: 590-1).

En el mundo sublunar, los seres están sujetos a un devenir constante que mantiene el ciclo, pero ese devenir está sujeto a unas reglas. Así, los movimientos que observamos en los distintos seres se deben a la tendencia intrínseca de cada elemento del compuesto a ocupar su lugar natural. La tierra tiende a moverse en línea recta hacia abajo (centro del universo) y el fuego en línea recta hacia arriba (hacia la periferia del universo) naturalmente, sin necesitar de un impulso que los lleve en esa dirección. El agua mantiene también un movimiento natural rectilíneo descendente, su lugar natural se sitúa por encima de la tierra y el aire un movimiento rectilíneo ascendente de menor intensidad que el fuego, situándose entre éste y el agua. De esta manera, los movimientos que percibimos en el mundo sublunar son todos finitos y rectilíneos, ascendentes (fuego, aire) y descendentes (tierra, agua). Los movimientos no rectilíneos observados en esta región del cosmos son siempre violentos o forzados por algo exterior al cuerpo que así se mueve, e implican, por lo tanto, una violación del orden natural al que todo tiende constitutivamente en virtud de su forma (*morphé, eidós*) y de cómo inhiere ésta en el compuesto (*synolon*). El telos rige de antemano para mantener el ciclo eterno y si el orden se altera, la naturaleza tiene los mecanismos necesarios para su restablecimiento. El teleologismo aristotélico vertebró toda su cosmología.

Dentro del conjunto total del cosmos, la tierra (que no es un planeta para Aristóteles, aunque sí tiene forma esférica) ocupa el centro y se mantiene inmóvil en él. Al estar compuesta del elemento tierra en su mayor parte, su lugar natural es el centro del universo. Estamos, por lo tanto, en una concepción geocéntrica del universo.

Ahora bien, ¿por qué el movimiento del mundo sublunar no cesa y termina reposando cada ser en su lugar natural, cesando así todo devenir? Ya vimos que Aristóteles consideraba que todo movimiento se produce por contacto. El cosmos es un continuo pleno, sin vacío y sin fisuras, a la manera de un gran organismo vivo. La causa (*aitia*) de que los ciclos se mantengan y se cumpla el orden establecido en nuestro mundo no depende de cada uno de los seres particulares que lo habitan, sino de una causa externa a él, jerárquicamente superior al mundo sublunar: el cosmos superior.

V.b. El mundo supralunar

Es la región del cosmos que abarca la Luna y todo lo que se halla más allá de ella: los cinco planetas o cuerpos errantes conocidos entonces (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), el sol y las estrellas fijas o constelaciones.

Esta región presenta un orden más perfecto y elevado que nuestro mundo, debido a que su constitución material no se compone de ninguno de los cuatro elementos del mundo sublunar, sino de un quinto elemento de naturaleza mucho más sutil, óptima e imponderable: el éter (*aithér*), material incorruptible y eterno que compone los cuerpos celestes y que mantiene el orden del cosmos gracias a su movimiento circular y constante. De éter, (*lo que siempre corre*), están compuestos los planetas y las esferas celestes y su movimiento se convierte en origen y medida de todo movimiento terrestre.

Los cuerpos celestes no vagan por el espacio vacío, que es inexistente, sino que están sujetos a unas esferas de este material transparente e incorruptible que son movidas por motores inmóviles, desplazando a los cuerpos que en ellas se encuentran en un movimiento circular perpetuo. Giran las esferas etéreas, y no los planetas en un espacio vacío.

Aristóteles no podía explicar los movimientos a distancia o gravitacionales, y todo movimiento debía producirse, en última instancia por contacto entre lo que mueve (motor) y lo movido. Para construir su cosmología se sirvió del modelo geométrico de Eudoxo de las esferas homocéntricas. Según este astrónomo, matemático y médico, nacido en Cnido (Turquía actual) y discípulo de Platón, el cosmos presenta una forma esférica y está compuesto de 27 esferas concéntricas agrupadas en siete grupos donde están fijados los cinco planetas conocidos entonces, el sol, la luna y las estrellas, manteniendo como punto central la tierra, que permanece inmóvil en el centro del universo. En este modelo geocéntrico, las esferas giran siguiendo ejes rotatorios distintos, que explican fenómenos irregulares, como los aparentes movimientos retrógrados de los planetas.

El esquema de Eudoxo sigue el siguiente modelo (véase la figura 1):

- Centro ocupado por la Tierra.
- Un primer grupo de 3 esferas rodea la Tierra y en ella se asienta la Luna.
- Le siguen dos grupos de 4 esferas para Mercurio y Venus.
- Un grupo de tres esferas para el Sol.
- Tres grupos de 4 esferas para Marte, Júpiter y Saturno.
- Una última esfera en la que están fijadas las estrellas fijas o constelaciones.

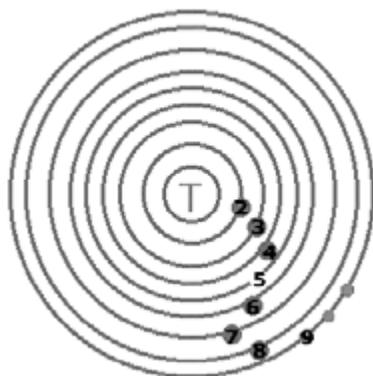


Figura 1. Sección del cosmos homocéntrico de Aristóteles.
T: Tierra; 2: Luna; 3: Mercurio; 4: Venus; 5: Sol; 6: Marte; 7: Júpiter; 8: Saturno.

El modelo de Eudoxio fue ampliado por su discípulo Calipo, que aumentó el n^o de esferas en 33, y más tarde por Aristóteles, que elevó a 55 su número para poder explicar movimientos irregulares planetarios y otras anomalías. Este modelo, no obstante, utilizaba las esferas sin otorgarles realidad física ni dotarlas de consistencia material alguna. Aristóteles insertó dicho modelo en el contexto de su teoría de la *Physis*, donde el movimiento sólo podía producirse por contacto, por lo que tuvo que conferir realidad material (el éter) al modelo geométrico de sus predecesores. Este material supralunar tiene un movimiento natural circular y uniforme, de máxima perfección y regularidad, por no tener comienzo ni fin (eterno). Su lugar natural, es la equidistancia al centro del mundo ocupado por la tierra, lo que explica que el cosmos no colapse o se destruya y permitiendo, además, la existencia del tiempo como la serie infinita de los «ahora».

Debido a que la rotación de las esferas etéreas es circular y uniforme («siempre igual»), queda garantizada una cadena inagotable de movimientos, transmitidos desde el *Protón Kinoun Akineton*, que mueve sin ser movido la esfera más exterior del universo (la esfera de las estrellas fijas), propagándose entre las distintas esferas planetarias hasta llegar a nuestro mundo, donde el movimiento, alejado ya de la fuente original, presenta la impureza de ser naturalmente rectilíneo (ascendente o descendente). Este deterioro paulatino del movimiento encuentra su justificación tanto en los elementos constitutivos de los seres terrestres (tierra, agua, aire, fuego), como en el inevitable despliegue de potencialidades contrarias insitas en la materia. Sólo el ser que es acto puro e inmaterial goza del atributo de la perfección, y permite que confiemos en la eternidad del universo.

Era de suma importancia elaborar una ciencia del cielo (astronomía) para poder perfeccionar los calendarios solares o lunares que regulaban importantes actividades humanas, como la agricultura, la cría del ganado, la pesca y la regulación de las fiestas religiosas. La tierra no podía ofrecer ese punto de referencia estable y permanente que sí nos ofrecía el cielo, verdadero asidero de regularidad y orden, medida del tiempo y de los acontecimientos.

De todo lo dicho hasta ahora se deduce que Aristóteles otorgó eternidad al universo: éste es inengendrado y existe desde siempre. No hay un comienzo del universo porque el *protón kinoun akineton* existe desde siempre, y como vimos, el tiempo es indisociable de los seres sujetos al devenir.

También se desprende de lo anterior que el universo tiene límites, tanto físicos (la esfera de las estrellas fijas) como inmateriales (el *protón kinoun*). Este universo finito, eterno e inengendrado tampoco se halla en ningún espacio. Si esto fuera así, y el cosmos ocupara un espacio, habría un algo, que no es el universo, más allá del universo mismo, conteniéndole, lo cual es imposible. La pregunta sobre el más allá del universo o sobre dónde está situado es ilegítima en el contexto cosmológico aristotélico, así como también lo es cualquier pregunta sobre su origen o historia, y más aún pretender establecer una cosmogonía.

Podemos resumir, por tanto, las ideas principales de la cosmología aristotélica en las siguientes:

1. El universo es esférico, finito, eterno, geocéntrico y geostático.
2. En él no existe vacío, sino cinco elementos que constituyen los cuerpos de las diferentes regiones: tierra, agua, aire, fuego y éter. En el cosmos, todo está lleno de materia, produciéndose una cadena ininterrumpida de movimientos.
3. No existen los movimientos a distancia o gravitacionales y los planetas no se mueven en el vacío, sino que giran adosados a las esferas de éter.
4. El cosmos tiene una estructura dualista que delimita dos regiones heterogéneas entre sí: el mundo supralunar, compuesto de éter, cuyo movimiento circular uniforme se convierte en el transmisor perpetuo de los movimientos rectilíneos terrestres.
5. Los seres que componen el cosmos quedan jerarquizados de la siguiente manera:
 - Seres inmateriales inmóviles (el *protón kinoun* y los motores inmóviles de las esferas)
 - Seres materiales móviles, pero eternos, regulares e incorruptibles: esferas, estrellas y planetas.
 - Seres finitos y móviles: el mundo sublunar de los cuatro elementos.

VI. Las ciencias biológicas

Se dice que Aristóteles se encontraba realmente a sus anchas cuando se dedicaba a estudiar los fenómenos biológicos, y se justifica esta predilección por su juvenil formación como médico, profesión que ya practicaba su padre con gran reconocimiento. Algunos estudiosos consideran que en este dominio del saber Aristóteles saboreaba su verdadera vocación. Sea o no cierto, lo que sí podemos afirmar sin ningún género de dudas es que nuestro filósofo fue el fundador de las ciencias biológicas: zoología, anatomía comparada, botánica y psicología surgieron todas ellas como ciencias autónomas de sus geniales investigaciones, que han quedado recogidas en sus obras: *Historia de los animales*, *Partes de los animales*, *Sobre el alma*, *Sobre la sensación y lo sensible* y *Sobre la generación de los animales*.

En *Partes de los animales* encontramos una de las más bellas defensas de las ciencias biológicas (que, como vimos, estaban categorizadas como un pseudosaber por sus antecesores):

Las cosas perecederas tienen la prioridad en la ciencia, porque adquirimos sobre ellas un conocimiento amplio y más variado. Como se hallan más cerca de nosotros y son más afines a nuestra naturaleza, ofrecen un sustituto valioso del deficiente conocimiento de las cosas divinas [...] La naturaleza, al descubrir su fuerza creadora en la observación científica, ofrece alegrías indescriptibles a aquellos que son capaces de reconocer la estructura del acontecer en la naturaleza y tienen una disposición natural para la investigación (Aristóteles, *De Partibus Animalium*, tomado de Düring, 1990: 780).

Desde su estancia en Asos (347 a.C.) Aristóteles recopila cuanta información hay disponible sobre la estructura anatómica de los seres vivos. Muchas de las fuentes provienen de observaciones directas de pastores, pescadores, cazadores, agricultores, veterinarios y otras

gentes del campo. Otras veces echa mano de fuentes poco fiables para fines científicos: historiadores antiguos (Heródoto, Hecateo), filósofos renombrados (Alcmenón, Anaxágoras, Empédocles) e incluso literatos como Homero. Estas fuentes no siempre son testadas y comprobadas experimentalmente, por lo que encontramos bastantes imprecisiones y errores en algunos de sus escritos biológicos. A pesar de ello, concederá una importancia fundamental a la investigación empírica, diferenciándose claramente de sus antecesores:

Así también debe uno acercarse a la investigación de cualquier animal sin arrugar la nariz, sino más bien con la certidumbre de que en todos ellos hay dentro algo natural y bello. Digo «Bello», porque en las obras de la naturaleza y precisamente en ellas, domina la determinación según un fin, y no el azar ciego (*De Partibus Animalium*, tomado de Düring, 1990: 799).

Aristóteles examina los datos aportados para su investigación teniendo en mente la idea central que vertebró toda su obra: el *télos*. En los procesos biológicos observa su regularidad e irreversibilidad, tendente a un fin que es intrínseco a ellos mismos, y que dirige el proceso desde dentro. Cada ser cumple un *ergón* (trabajo, obra), una tarea propia y prediseñada que, si puede ser desempeñada, llevará al ser a su perfeccionamiento: llegar a ser lo que tiene que ser. Por ello, Aristóteles se afanará en dejar clara la tarea del investigador: dilucidar la estructura (*aitía*), el *fin* y las funciones que realizan los seres vivos, y elaborar una clasificación de los mismos de acuerdo a sus características funcionales esenciales.

En *Historia de los Animales* establecerá la primera anatomía descriptiva coherente de nuestra historia. Para ello, dejará de lado los métodos dicotómicos de la Academia platónica, que dividía los seres en géneros y subgéneros según poseyeran ciertas características más o menos arbitrarias, por lo que cualquier animal podría pertenecer a varias clasificaciones distintas: una oveja podría entrar en la clasificación de animales terrestres no alados y también en la de animales domésticos, junto con el pato, por ejemplo, que sí es alado.

Aristóteles impone una nueva metodología y exige que la clasificación se fundamente en un orden funcional y anatómico facilitado por la disección animal y no basado en meras distinciones externas. Su conclusión fue absolutamente genial y perdura actualmente. Dividió a los animales en dos grandes grupos:

- animales provistos de sangre (enaimos): sinónimo de vertebrados;
- animales sin sangre (anaimos): invertebrados.

Luego estableció las determinaciones añadidas (ovíparo-vivíparo), obteniendo una taxonomía que resistió prácticamente hasta Linneo. En la siguiente tabla esquematizamos la taxonomía aristotélica:

Figura 2. Algunas de las clasificaciones zoológicas de Aristóteles	
Según presencia o ausencia de sangre	
Animales con sangre	Hombre, cuadrúpedos con pelo, cetáceos, aves, cuadrúpedos escamosos y ápodos, y peces, ciertos insectos (saltamontes, arañas, avispas y hormigas)
Animales sin sangre	El resto de los insectos, malacia, crustáceos, testáceos, zoófitos
Según modo de locomoción	
Bípedos	Hombres, aves.
Cuadrúpedos	Escamosos (reptiles excepto serpientes) con pelo (mamíferos excepto hombre y cetáceos)
Ápodos	Serpientes, cetáceos, peces, seláceos, testáceos
Según modo de reproducción	
Vivíparos	Hombre, aves
Ovovivíparos	Seláceos, algunas víboras
Ovíparos	Los que producen un huevo acabado (aves, reptiles, insectos sanguíneos), los que producen un huevo inacabado (peces, crustáceos, cefalópodos)
Generación de larvas y/o generación espontánea	Los que copulan y engendran larvas (algunos insectos no sanguíneos); los que no copulan ni engendran, apareciendo por generación espontánea (la mayoría de los insectos no sanguíneos, testáceos)

Esta clasificación, sin embargo, no fue sistematizada por el propio Aristóteles, aunque su esquema se desprende de sus escritos biológicos:

La arquitectura de la clasificación aristotélica, que se abordará más adelante, nunca se declara sistemáticamente en los tratados —y no obstante se puede deducir muy claramente de sus textos, con toda la novedad científica que comporta. Esto es señal de que se produce una clasificación, por así decirlo, automáticamente, al escribir el tratado, más allá incluso de las intenciones que declara el autor; y se produce a partir del choque entre la racionalidad científica y la anatomía del animal, investigada en virtud del conocimiento puro (Vegetti, 1981: 43-44).

El detallado estudio de la anatomía y fisiología animal sigue un modelo jerárquico en el que la cúspide está ocupada por el hombre (sobre todo el varón, como veremos), prototipo ejemplar para el estudio de los seres vivos. El resto, «*comparados con el hombre, son como enanos.*» Muy resumidamente, sus observaciones y presupuestos teóricos aceptados de antemano le llevan a afirmar lo siguiente:

1. Todo en la naturaleza sigue un fin, y las partes, órganos y funciones de cada ser vivo deben entenderse subordinadas a él, que no es otro que el mantenimiento regular del ciclo eterno de nacimientos y muertes³. Asimismo, los fines conforman una cadena jerarquizada y continua, sin saltos bruscos o eslabones perdidos entre lo inanimado, lo animado no animal, los animales y el hombre. Entre el reino de lo animado y lo inanimado, los pasos intermedios nos son desconocidos. Entre el reino vegetal y el animal, Aristóteles encuentra ejemplos de eslabones intermedios, como por ejemplo, las esponjas marinas y las anémonas.
2. La jerarquización de las especies puede desprenderse de un estudio detallado de sus estructuras anatómicas, y de la fisiología de sus diversos sistemas: digestivo,

3 «Mediante este dispositivo, lo mortal participa de la inmortalidad, tanto el cuerpo como todo lo demás» (Aristóteles, Sobre el alma, II 4, 415a-26, tomado de Düring, 1909: 822).

cardiovascular, o respiratorio. Será el calor interno uno de los criterios distintivos fundamentales para establecer esa ordenación gradual de los seres vivos, lo que lleva a Aristóteles a priorizar el corazón sobre cualquier otro órgano. A mayor temperatura, mayor grado de perfección y prominencia tendrá el ser vivo y mayores y complejas serán las funciones que podrá ejercer: vegetativas (todos los seres vivos), perceptivas y motoras (reino animal y el hombre) y racionales (sólo el ser humano).

3. Esta cadena continua en la que se ordenan los seres vivos no implica, de ninguna manera, que Aristóteles acepte la idea de una evolución de las especies. Criticando las tesis de Empédocles, según las cuales los organismos han ido surgiendo evolutivamente de un primigenio caos de materia elemental (átomos), nuestro filósofo establece la eternidad de las especies, por lo que éstas no han podido generarse a partir de formas evolutivas inferiores, sino que han existido desde siempre.
4. Los órganos de los seres vivos están especializados, cumpliendo cada uno de ellos una función determinada y no varias a la vez. El corazón es el *fogón* encargado de producir el calor interno necesario para el resto del cuerpo, y el que lo mantiene vivo. En este órgano sitúa la sede de la inteligencia y del alma (entendida en este caso como calor vivificante, o Pneuma). Para Aristóteles, el alma, *psyché*, es indisoluble del cuerpo y no puede diferenciarse de sus funciones. El alma nutritiva y sensorial perece con la muerte del cuerpo. Sólo el alma racional que es intuición activa (*nous*) tiene procedencia divina y es eterna. Sobre este tema se puede consultar su obra *Sobre el alma*, fundamentalmente la parte III.
5. La naturaleza sigue una ley de compensación, y mediante la adición de contrarios, ejerce un efecto nivelador de los excesos. El cerebro es uno de estos contrarios, y tiene como finalidad refrigerar el exceso de calor producido por el corazón. Aristóteles no liga el cerebro con la inteligencia ni con las facultades senso-perceptuales y su tesis de que es un órgano frío y húmedo y sin sangre, perdurará casi hasta el siglo XVII. La actividad pensante se debe a una mezcla proporcionada entre el calor del corazón y la «frialdad» del cerebro.
6. De la primacía del calor se servirá Aristóteles para justificar ciertos prejuicios sexistas, que relegan a la mujer (y a las hembras animales) a un papel pasivo en la procreación: el elemento masculino representa la forma (*morphé*), el principio activo y móvil que, debido a que su alta temperatura corporal, es capaz de «cocer» (*pepsis*) suficientemente la sangre y producir la semilla (*semen*) que será depositado en la hembra, mero principio material y receptivo. Así, según su teoría, la transmisión hereditaria queda a cargo de los machos de todas las especies: «La mujer tiene por naturaleza un calor más escaso que el hombre, y por ello, en el aspecto fisiológico, se halla detrás del hombre. [...] La mujer no aporta ningún semen a la procreación.» (Aristóteles, *Generación de los Animales*, I, 19, 726b/ 30, 727a, tomado de Düring, 1990).

En el semen el individuo se encuentra el individuo preformado, es decir, con todos sus órganos y funciones ya desarrollados pero con un tamaño extremadamente pequeño, imposible de observarse. Si la reproducción ha sido la adecuada y la sangre ha tenido la *cocción* necesaria, el descendiente será un macho animal o un varón de especie humana. Si es ligeramente imperfecta, dará a luz una hembra o mujer. En el caso de que la reproducción o sus condiciones hayan sido aún más defectuosas, el resultado será un ser malformado. La hembra es, por lo tanto el primer eslabón de un deterioro reproductivo que conduce al monstruo. «El que no se

parece a sus padres ya es en cierto modo un monstruo, pues en esos casos la naturaleza se ha desviado de alguna manera del género. El primer comienzo de esa desviación es que se origine una hembra y no un macho.» (*Generación de los animales*, 767b, tomado de Düring, 1990)

VI. A modo de conclusión

La separación y autonomía que concedió Aristóteles a las distintas ciencias no debe llevarnos a la suposición de que el filósofo llevara a cabo algún tipo de reduccionismo con el que eludir las contradicciones y dificultades inherentes a un estudio serio de la naturaleza y mucho menos, que le llevara a rechazar todos aquellos factores y procesos de índole fundamentalmente cualitativa, y por ello mismo, a duras penas matematizables. Al contrario, Aristóteles es plenamente consciente del escollo que supone un acercamiento pretendidamente objetivo a la naturaleza, y más bien se esfuerza en llevar a cabo un cabal y comprometido acercamiento fenomenológico a la misma. El resultado es de una actualidad sorprendente, acercándose su modelo de investigación natural a las concepciones más holistas y sistémicas actuales. Revisando su obra, nos damos cuenta de que Aristóteles se adelantó a la modernidad, permitiendo que estructuras, fines y cualidades entraran a formar parte de una causalidad mucho más omniabarcante que la meramente eficiente. Su negación del dualismo pitagórico y platónico, devolvió al mundo del devenir el meritorio lugar que le correspondía: el ser genuina y satisfactoriamente real.

Platón y la Academia tomaron como punto de partida una escisión radical (*Chorismós*) entre el mundo absolutamente objetivo y verdadero de las ideas, y el mundo subjetivo y conjeturable del acontecer natural, que condujo a la investigación científica por una vía de depuración y aislamiento de todas aquellas determinaciones cualitativas que estorbaban: sólo lo permanente y no mutable es real, susceptible de ser aislado y convertido en elementos simples con los que operar matemáticamente y establecer leyes. Este racionalismo objetivista se convirtió en el fundamento de la investigación científica que luego emprenderían investigadores como Kepler, Galileo o Newton⁴ con grandes resultados, pero a costa de reducir nuestro mundo a un amasijo de números y fórmulas mucho más exactas, pero que nos desproveían de sentido, dejándonos simplemente ser entre otras cosas.

Aristóteles arremete contra este calculador y eficaz reduccionismo. Su compromiso con los procesos naturales «en bruto», observados sin añadiduras y sin restas, tal y como se presentan a nuestra conciencia, le permitieron adelantarse a muchos de los postulados de la ciencia contemporánea, por ejemplo a la mecánica cuántica, donde para acercarse comprensivamente al universo, hay que partir de una totalidad abrumadoramente compleja que explique sus partes, y no a la inversa. Las nociones de movimiento, estructura y sistema han de vertebrar cualquier comprensión de la realidad:

Bohm, Prigogine, Eigen, Jantsch y otros han comentado los inconvenientes de la mecánica clásica (incluyendo algunos aspectos de la mecánica cuántica) y han pedido una filosofía en la que el cambio no fuera una apariencia periférica, sino un fenómeno fundamental. Aristóteles ha desarrollado precisamente una filosofía de este género y podemos aprender mucho de él. Incluso en los detalles, Aristóteles va bastante más lejos que sus modernos sucesores (Feyerabend, 1987: 9).

4 Véase en este mismo volumen los artículos de Inmaculada Perdomo Reyes, «J. Kepler (1571-1630): la creatividad y el rigor en la búsqueda de la armonía del mundo», y Godfrey Guillaumin, «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*).

VII. Bibliografía

Obras de Aristóteles en castellano

Aristóteles (1985-2005), *Obras Completas*, Madrid, Gredos. Lo componen 21 títulos publicados:

Metafísica de Aristóteles. Edición trilingüe (griego, latín y castellano) de V. García Yebra. *Metafísica*. Trad. y notas T. Calvo. *Poética de Aristóteles*. Edición trilingüe de V. García Yebra. *Acerca del Alma*. Trad. Tomás Calvo. *Tratados de Lógica*. Traducción M. Candel. Volumen I: *Órganon I*. Volumen II: *Órganon II*. Aristóteles/ Pseudo Aristóteles. *Constitución de los atenienses/ Económicos. Ética Nicomáquea. Ética Eudemia. Acerca de la generación y la corrupción. Tratados de historia natural*. Trad. Ernesto La Croce. *Política*. Trad. J. Pallí. *Retórica*. Trad. Q. Racionero. *Investigación sobre los animales*. Trad. J. Pallí. *Reproducción de los animales. Física. Acerca del cielo. Meteorológicos*. Trad. M. Candel. Pseudo Aristóteles/ Anónimo. *Fisiognomía/ Fisiólogo*. Aristóteles/ Euclides. *Sobre las líneas indivisibles. Mecánica/ Óptica. Catóptrica. Fenómenos. Partes de los animales. Marcha de los animales. Movimiento de los animales*. Trad. E. Jiménez y A. Alonso. *Problemas. Fragmentos*.

_____ (1999), *Categorías, De Interpretatione*, Madrid, Tecnos. Incluye además Porfirio: *Isagoge*. Introducción, traducción y notas de A. García Suárez, L. M. Valdés Villanueva y J. Velarde Lombraña.

_____ (1964), *Física/ Segundos Analíticos*. En *Obras*, Madrid, Aguilar. Traducción y notas de F. P. de Samaranch.

_____ (2007), *El hombre de genio y la melancolía (problema XXX)*, Barcelona, Cuadernos del Acanalado 23. Traducción de C. Serna, prólogo y notas de J. Pigeaud y revisión de J. Pòrtulas.

Bibliografía sobre Aristóteles

Anscombe, G. E. M.; Geach, P. T. (1961), *Three Philosophers*, Ithaca, Cornell University Press.

Barnes, J. (1995), *The Cambridge Companion to Aristotle*, Cambridge, CUP.

Bekker, I. (1831-1870), *Opera*, Berlín, Academia Regia Borussica.

Bröcker, W. (1963), *Aristóteles*, Santiago de Chile, Ediciones de la Universidad de Chile. Traducción de F. Soler Grima. Prólogo de A. Wagner de Reyna.

Cherniss, H. (1944), *Aristotle's Criticism of Plato and the Academy*, Baltimore, The John Hopkins Press.

Chevalier, J. (1968), *Historia del Pensamiento, Tomo I, El pensamiento Antiguo*. Madrid, Aguilar. Traducción y Prólogo de J. A. Miguez.

Crubellier, M.; Pellegrin, P. (2002), *Aristotele: Le philosophe et les saviors*, París, Éditions du Seuil.

Cuvier, G. (1836), *Le règne animal distribué d'après son organisation, Chez Crochard et Cib Libraires*, París, France.

Düring, I. (1990), *Aristóteles*, México, UNAM.

Feyerabend, P. (1987), *Adiós a la Razón*, Madrid, Tecnos.

Guthrie, W. K. C. (1933), *Historia de la Filosofía Griega. Volumen VI: Introducción a Aristóteles*, Madrid, Gredos.

Guy, A. (1968), *Ortega y Gasset, crítico de Aristóteles. La ambigüedad del modo de pensar peripatético, juzgada por el raciovitalismo*, Madrid, Espasa-Calpe. Traducción de M. L. Pérez Torres.

Heidegger, M. (2002), *Interpretaciones fenomenológicas sobre Aristóteles. Indicación de la situación hermenéutica. Informe Natorp*, Madrid, Trotta. Trad. de J. A. Escudero.

Jaeger, W. (1946), *Aristóteles, bases para la historia de su desarrollo intelectual*, México, Fondo de Cultura Económica.

Laercio, D. (2007), *Vidas y opiniones de los filósofos ilustres*, Madrid, Alianza. Traducción, introducción y notas de C. García Gual.

Lynch, J. P. (1972), *Aristotle's School: A study of a Greek Educational Institution*, University of California Press.

Mariás, J. (1980), «El sentido de la filosofía en Aristóteles». En *Biografía de la Filosofía*, Madrid, Alianza.

- Mosterín, J. (2006), *Aristóteles. Historia del pensamiento*, Madrid, Alianza.
- Marcos, A. (2000), *El testamento de Aristóteles: memorias desde el exilio*, Leon, Edilesa.
- Nuyens, P. (1948), *L'évolution de la psychologie d'Aristotle*, Lovaina.
- Simpson, G. C. (1961), *Principles of animal taxonomy*, New York, Columbia University Press.
- Vegetti, M. (1981), *Los orígenes de la racionalidad científica*, Barcelona, Península. Traducción de C. San-Valero.

3. Los Elementos de Euclides y el desarrollo de la matemática griega⁵

I. Contexto histórico-biográfico

Poco y nada es lo que se sabe de la vida y la personalidad de Euclides, matemático alejandrino —o que al menos trabajó en Alejandría— que a través de su obra *Elementos* condujo a la matemática griega a un proceso de consolidación teórica seguramente no experimentado hasta entonces por ninguna rama del saber científico. Teniendo poco para consignar de los hechos de Euclides en tanto personaje histórico, comenzaremos este capítulo con una somera reseña de la época helenística, el singular período en que surge y se consolida la geometría euclídea.

En junio del año 323⁶ se produce la muerte del conquistador macedonio Alejandro Magno, dividiéndose en distintos reinos el imperio que se había forjado bajo su mando, en una campaña militar que comenzó en Grecia en el 334, y que llevó a los ejércitos macedonios hasta el corazón de Asia. Luego de una serie de intrigas, asesinatos y conspiraciones, Pérdicas —veterano general macedonio— es designado regente del imperio. Buscando asegurar un equilibrio entre las distintas facciones del ejército imperial, decide otorgar a los principales generales de Alejandro el control de las distintas provincias del imperio, en el marco del *Consejo de Babilonia*. De este modo se impone como regente de Egipto Ptolomeo I Soter, general de las tropas de Alejandro y cronista de sus campañas militares, tomando a la ciudad de Alejandría como sede de gobierno e inaugurando una dinastía que perdurará alrededor de 300 años —hasta el treinta—, célebre por el impulso y la relevancia que desde sus comienzos otorgó a la actividad científica (Préaux, 1984).

Ptolomeo llega a Egipto en el mismo 323, originalmente investido como sátrapa por el Consejo de Babilonia. Sus primeras actuaciones una vez tomado el mando fueron la anexión de Cirene en el 322, y poco después, la condena a muerte de Cleómenes, antiguo gobernador del desierto arábigo designado por Alejandro, que había también sido adscrito al gobierno de

5 Una versión preliminar y abreviada del presente artículo fue incluida en Melogno (2008).

6 En cuanto la mayoría de las fechas referidas son anteriores a Cristo, se evitará la abreviatura a.C. En fechas de la antigüedad posteriores a Cristo, se utilizará la abreviatura d.C.

Egipto por el *Consejo*. En el 317 logró la anexión de Siria, tomándose atribuciones de soberano nacional más que de gobernador de provincia. Desde su llegada y hasta entonces, cierto éxito en sus emprendimientos expansionistas, más un adecuado manejo de las relaciones con el clero egipcio, sumados a la cancelación prácticamente definitiva de la sucesión de Alejandro, le permitieron poco a poco consolidarse como soberano absoluto del país. Fue proclamado rey luego de su derrota frente a Demetrio Poliorcetes en la batalla de Salamina, durante el año 306, momento en que toma el título de *Soter* (salvador).

Todo el reinado de Ptolomeo I —hasta el 283 en que asume el trono su sucesor Ptolomeo II Filadelfo— está atravesado por las continuas luchas entre los *diádocos*, ex-generales de Alejandro, ahora reyes o emperadores, cada uno en busca de someter a sus vecinos y reunificar el imperio bajo su mando. Sólo en los años 311 y 301 la situación político militar del disuelto imperio alejandrino presenta algo de estabilidad (Rostovtzeff, 1967).

A pesar de este clima de guerra casi constante —que no se aminoró con la entrada en el s. III a.C.— los sucesivos reyes Ptolomeos que gobernaron Egipto fueron capaces de construir un estado relativamente sólido desde el punto de vista militar y solvente en lo económico, aunque sólo a costa de una marcada separación entre las clases alta y baja, que no dejaba de sumar conflictos internos. Asimismo, la administración de los Ptolomeos incorporaba elementos culturales típicamente griegos al tiempo que mantenía tradiciones propias de Egipto, particularmente en lo que se refiere al aparato de Estado —seguridad interna, recaudación, finanzas, comercio— ya existente desde la época de los faraones. La prosperidad del imperio se sostenía en un fuerte control estatal del comercio, las finanzas y la producción, marcado entre otras cosas por la modernización de los medios de transporte y las técnicas del cultivo, así como la construcción del puerto de Alejandría y la monopolización del comercio fluvial a través del Nilo.

Otra variable de importancia fue la centralización demográfica. Preocupados por frenar el impulso helenizador preconizado por Alejandro, los Ptolomeos limitaron al máximo la fundación de nuevas ciudades, dándole a su imperio una estructura única centralizada en Alejandría, que concentraba todos los ingresos del territorio imperial. Esta concentración de población y de ingresos generó una situación económica por demás favorable a la clase privilegiada de griegos alejandrinos, sostenida por el monopolio estatal de los principales sectores productivos y por algunas medidas como la creación de un banco estatal o la implementación de un sistema monetario, por primera vez en Egipto (Rostovtzeff, 1967).

Todos estos factores, sumados a una política de comercio exterior basada en la importación de materia prima y la exportación de manufactura, otorgaron al régimen de los Ptolomeos suficiente solvencia económica para llevar a cabo un sostenido proyecto de financiación estatal de la investigación científica. Por otra parte, la unidad idiomática que había alcanzado la cultura griega en torno la lengua *koiné* permitió la fluida convergencia y concentración de los principales sabios de la época en la ciudad de Alejandría.

El centro de la vida cultural y de la investigación en todas las ramas en las que se practicó en Alejandría fueron la *Biblioteca* y el *Museo*. Parece altamente probable que la acumulación de libros y el trabajo intelectual hayan sido patrocinados por Ptolomeo Soter, antes aún de que ambos centros comenzaran a existir oficialmente, sin embargo no es posible distinguir con claridad los hechos ocurridos bajo Soter de los ocurridos bajo Filadelfo. Sí puede establecerse que la fundación de la Biblioteca se apoyó particularmente en el monopolio egipcio en la producción de papiro, lo que la habría llevado a tener alrededor de 400.000 rollos en el año 250, en coexistencia con el Museo, un centro de investigación organizado en principio

en torno a cuatro especialidades: literatura, matemática, astronomía y medicina. En este marco, el Museo y la Biblioteca de Alejandría constituyen el primer antecedente de una política organizada de financiación estatal de la actividad intelectual, que se compagina con un afán de compilación y sistematización de conocimientos como la antigüedad no había conocido hasta entonces.

Es necesario señalar también la fuerte influencia que la filosofía aristotélica ejerció en todo el proyecto fundacional de ambas instituciones, en cuanto dos de sus principales impulsores, Demetrio de Falera (345-283) y Estratón de Lampsaco (330-ca. 270), mantenían fuertes vinculaciones con el Liceo. El primero había sido educado en el Liceo, siendo amigo y discípulo de Teofrasto (372-287), a su vez sucesor de Aristóteles en la dirección de la institución. El segundo también había sido educado en el Liceo bajo la tutoría de Teofrasto, y habría llegado a Alejandría alrededor del año 300, permaneciendo hasta el 288, momento en que volvió a Atenas para tomar el lugar de su maestro en la dirección de la escuela aristotélica (Plutarch, 1952).

Entre los bibliotecarios de la época dorada de Alejandría son de mención Zenódoto de Efeso (325-234), literato y filólogo, biógrafo, editor y comentarista de Homero; Apolonio de Rodas, segundo bibliotecario, quien ocupa el puesto cerca del 194; y Eratóstenes de Cirene, Astrónomo, matemático y geógrafo (275-195), célebre por haber sido el primero en calcular con gran exactitud la circunferencia de la Tierra, que ocupa el puesto entre el 245 y el 201. Otras figuras de destaque son Calímaco (310-245), personaje fundamental de la poesía alejandrina, Aristófanes de Bizancio (ca. 257-180), discípulo de Eratóstenes, a quien se le atribuye el haber introducido mejoras en los métodos de puntuación de la lengua griega, destinados a facilitar la lectura de los a veces difíciles textos clásicos, y finalmente Aristarco de Samotracia (ca. 220-145), último de los grandes bibliotecarios alejandrinos, quien criticó y trató de mejorar el trabajo de sus sucesores, realizando ediciones completas de la *Iliada* y la *Odisea*. Otros como Arquímedes (287-212) no parecen haber tenido una vinculación tan estrecha con el Museo y la Biblioteca, pero igualmente se mantuvieron en contacto con los sabios alejandrinos (Escolar Sobrino, 2001).

Sabemos que en este contexto desarrolló su obra Euclides. Las dos fuentes principales para el poco conocimiento que podemos tener de su vida son la *Colección Matemática* de Pappus de Alejandría (1933), escrita hacia el 340 d.C., y el comentario de Proclo (Proclus, 1948) al primer libro de los *Elementos*, realizado en el siglo V d.C. De Proclo se desprende que Euclides floreció en Alejandría alrededor del año 300, trabajando en lo que habría sido la sección de Matemáticas del Museo. Es probable que haya nacido en Atenas, y haya sido alumno de la Academia de Platón y partidario de su filosofía⁷.

Debemos también a Proclo la famosa anécdota según la cual Ptolomeo I habría preguntado a Euclides si no había un camino más corto que los *Elementos* para aprender geometría, ante lo cual Euclides respondió que para la geometría no hay camino *real*. Pappus mientras tanto, hace un inventario de sus obras, y lo coloca como maestro de Apolonio de Perga (ca. 262-190). Dado este desconocimiento histórico de su figura, durante la antigüedad y aún hasta el siglo XVI el autor de los *Elementos* fue confundido con Euclides de Megara (ca. 450-380), discípulo de Sócrates y fundador de la escuela megárica, a tal punto que varias ediciones de los *Elementos* llevan el nombre del Euclides megárico. El primero en subsanar el error distinguiendo a los dos Euclides fue Federigo Commandino, en su traducción al latín de los *Elementos* en 1572 (Sarton, 1927).

7 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno, «Astronomía y Física en Platón» (*comps.*).

La edición de los *Elementos* realizada por Teón de Alejandría (ca. 335-ca. 405 A.D.) fue el texto base de las ediciones de la obra, incluida la de Robert Simson en 1756 (Euclid, 1838). Sin embargo en 1808, F. Peyrard descubre en la Biblioteca del Vaticano un manuscrito más antiguo, que dio lugar a la edición crítica de Johan Heiberg y Heinrich Menge, la cual a partir de entonces ha sido tomada como base de las ediciones de la obra, incluida la de Sir Thomas Heath de 1908 (*Euclid, 1952*)⁸. A lo largo del siglo XX la edición de Heiberg y Menge, lo mismo que las ediciones inglesas de Heath, tuvieron un amplio consenso entre historiadores de la matemática y estudiosos del tema en general, no obstante las divergencias puntuales marcadas entre otros por Abel Rey (1962), Egmont Colerus (1943) y Juan David García Bacca en su edición en español de los *Elementos* (Euclides, 1944). Sin embargo, en los últimos años Wilbur R. Knorr ha vuelto a poner en debate la fiabilidad de la edición Heiberg/ Menge, aduciendo razones de diversa índole en favor de la posición de Martin Klamroth, académico alemán que a fines del siglo XIX se enfrentó sin éxito a la interpretación defendida por Heiberg (Knorr, 2001).

Además de los *Elementos*, se han conservado otras obras de Euclides, o que al menos se le atribuyen. Los *Datos*, una serie de 94 proposiciones acerca de magnitudes, formas y posiciones de las figuras geométricas, estrechamente relacionadas con los primeros cuatro libros de los *Elementos*. *Sobre la división de las figuras*, dedicada al estudio de la división de las figuras geométricas en otras del mismo tipo o de un tipo diferente, de modo que puedan establecerse relaciones determinadas entre las partes de la división. *Sobre los fenómenos*, una introducción a la astronomía matemática enfocada en el estudio de la geometría esférica y las posiciones de las estrellas, con el objetivo de explicar las posiciones planetarias. Finalmente la *Óptica*, primer tratado griego sobre los fenómenos asociados a la perspectiva, enmarcado en las teorizaciones platónicas sobre la visión.

También se le atribuyen (Pappus, 1933), aunque no se conservan, *Sobre los Porismas* (proposiciones matemáticas), compuesta de 38 lemas y 171 teoremas, y dedicada probablemente a cuestiones de geometría proyectiva; *Sobre los sofismas*, dedicada a proporcionar ilustraciones prácticas sobre errores en el razonamiento matemático y en la demostración de teoremas. *Sobre cónicas*, es algo anterior al famoso trabajo de Apolonio sobre el tema (Apollonius, 1957), y para el tiempo de Pappus ya había sido totalmente suplantado por éste en los estudios matemáticos. No parece tratarse de un aporte original de Euclides, sino más bien una compilación de hallazgos de matemáticos previos (Pappus, 1933). Finalmente *Sobre los lugares superficiales*, trabajo del que Pappus recoge dos lemas, ambos dedicados también a las secciones cónicas.

Quedan por último los escritos de autenticidad cuestionada o dudosa. La *Catróptica*, un trabajo sobre la teoría de los espejos atribuido a Euclides por Proclo, y según Heath (Euclid, 1952) probablemente escrito por el editor Teón de Alejandría. También le atribuye Proclo unos *Elementos de Música*, de clara raíz pitagórica y muy probablemente apócrifos (Proclus, 1948).

II. El proceso de sistematización de la Geometría

Euclides desarrolla su labor de investigación en el Museo de Alejandría, con seguridad teniendo a su disposición la mayor parte del trabajo de los matemáticos griegos anteriores. Sobre esta base construye los *Elementos*, pieza considerada como el primer tratado

8 Para una enumeración más exhaustiva de las ediciones de las obras de Euclides, véase Sarton (1927).

sistemático de matemáticas de la historia. Según puede verse a partir del comentario de Proclo (Proclus, 1948), Euclides recopila y organiza los descubrimientos de los matemáticos griegos anteriores, en su mayoría pertenecientes a la tradición platónico-pitagórica. Entre ellos estarían el mismo Pitágoras de Samos, el pitagórico Arquitas de Tarento, matemático, político y filósofo, amigo de Platón, y su discípulo Eudoxio de Cnido, a su vez maestro de Menechmo y de Hermótimo de Colofón. También en vinculación directa con la Academia platónica aparecen Teeteto de Atenas, Teodoro de Cirene, Amiclas de Heraclea, Leodamas de Tasos y Teudios de Magnesia, a quien se atribuyen unos *Elementos*, en los que según Rey (1962) se habría basado Aristóteles para sus consideraciones acerca de la geometría. Como matemáticos algo posteriores Proclo incluye a Neoclides y su discípulo León, Dinóstrato, hermano de Menechmo, y Filippo de Medma, último de los matemáticos conocidos en la tradición anterior a Euclides.

La enumeración de los predecesores de Euclides y su inclusión en la tradición platónica por parte de Proclo, permite entrever que los *Elementos* constituyen la culminación y sistematización de la tradición matemática generada en Grecia en los siglos V y IV a.C., y que tiene en el pitagorismo y en la Academia platónica sus principales centros de desarrollo. Si bien parece poco probable que alguno de estos matemáticos haya producido una obra de la magnitud de la de Euclides, es verosímil pensar que la obra de este no hubiera sido posible sin los antecedentes generados por sus predecesores.

Asimismo, estos antecedentes constituyen indicadores parciales aunque por demás atendibles de la continuidad entre la ciencia griega clásica y ciencia del período helenístico, continuidad que puede verse igualmente en el tratamiento de algunos problemas centrales de la obra de Euclides. Por mencionar algunos ejemplos, puede señalarse que el estudio de las secciones cónicas, al que se dedicaron tanto Euclides como Arquímedes, pero que llega a su punto máximo con Apolonio de Perga (Apollonius, 1957), ya había sido tratado por Menechmo. Asimismo, el interés de los matemáticos alejandrinos en las cónicas tiene sus orígenes en el estudio de la duplicación del cubo, uno de los problemas fundamentales de la matemática griega en el período clásico. En los *Elementos*, los indicios de continuidad con la matemática anterior son numerosos; cabe sólo mencionar como los más nítidos la demostración del teorema de Pitágoras incluida en el libro I, el tratamiento del teorema de Tales en el libro VI, y el cuidadoso examen —característico de la tradición platónico-pitagórica— de los poliedros regulares en el libro XIII.

Pero más allá de sintetizar los conocimientos de matemáticos anteriores, lo relevante de los *Elementos*, es que todo el acervo de conocimiento matemático generado por los griegos aparece por primera vez presentado como un *sistema formal axiomático deductivo*. Por tal entenderemos a modo genérico un conjunto de proposiciones ordenadas de tal modo que, partiendo de algunas de ellas, llamadas *axiomas* —que se aceptan como autoevidentes, no demostrables— se deduce mediante ciertas reglas otra serie de proposiciones, no autoevidentes y sujetas a demostración, denominadas *teoremas*. La organización en un sistema de este tipo fue a partir de Euclides —y lo sigue siendo hasta hoy— un requisito central para la corrección de un sistema matemático, si bien es necesario acotar que el concepto actual de sistema axiomático no es enteramente aplicable al sistema presentado en los *Elementos*.

Los matemáticos previos a Euclides habían descubierto procedimientos para construir una amplia serie de figuras geométricas con regla y compás, y habían determinado varias propiedades de las figuras en el plano, pero no contaban con una definición clara del concepto de *plano*. Del mismo modo hablaban de puntos, líneas y superficies, pero sin contar con una definición

de estos conceptos, ni con una idea precisa del lugar que ocupaban dentro del sistema de conocimientos de la geometría. A pesar de ello, lograron establecer entre estos conceptos relaciones lo suficientemente complejas como para dar lugar a sistemas geométricos ciertamente elaborados, que según recuerda Proclo (Proclus, 1948) vieron la luz en la publicación de algunos *Elementos* previos a los de Euclides, como los de Hipócrates de Quíos y Teudios de Magnesia. En este sentido, el mérito de Euclides consistió en discriminar distintos tipos de proposiciones matemáticas, además de ordenarlas en un sistema formal.

Podemos considerar asimismo que con Euclides se produce la delimitación de la matemática como disciplina independiente de la filosofía, dando comienzo la separación entre el conocimiento matemático y la especulación metafísica sistemática. La renuencia a la especulación filosófica y la especialización disciplinar constituyen las características salientes no sólo de la matemática, sino de todas las ramas del conocimiento cultivadas en Alejandría durante la época helenística. Pero si bien el sistema de Euclides definió a la matemática como un campo *especializado* independiente de la filosofía, no dejó de lado, como ninguna teoría científica puede hacerlo, algunos de los presupuestos metafísicos básicos de su época. Euclides parece haber asumido la concepción inspirada en Platón (*Filebo*, 1972, 55c-59d) y predominante entre los griegos, de acuerdo a la cual la *aritmética*, entendida como teoría general de los números, era cualitativamente diferente y a la vez superior a la *logística*, entendida como el conjunto de técnicas de cálculo vinculadas a procedimientos prácticos. Del mismo modo, la *geometría* era entendida como el saber propiamente científico acerca de las líneas, superficies, volúmenes y sus propiedades, por definición superior a la *geodesia*, entendida como el conjunto de técnicas de medición vinculadas a procedimientos prácticos (Colerus, 1943).

Según la interpretación ya clásica de Rey (1962), los *Elementos* suponen la superioridad de la geometría frente a la aritmética, debido a dos razones: en primer término, el descubrimiento de los números irracionales habría causado un profundo impacto en la concepción pitagórica de las matemáticas (Platón, *Leyes*, 1972, 819d-820c), lo que provocó que los griegos le confirieran a los cuerpos geométricos un status superior que a los números. Las cantidades inconmensurables no pueden ser representadas a través de un número, o sólo lo son parcialmente —un número irracional sólo se puede escribir de modo aproximado—, mientras que una recta inconmensurable —por ejemplo, la hipotenusa de un triángulo cuyos catetos valen 1— sí puede representarse. En suma, existe un fenómeno matemático dado, la existencia de magnitudes inconmensurables, que sólo puede ser representado geométrica y no aritméticamente, por lo que la geometría puede captar este orden de fenómenos matemáticos mejor que la aritmética; de ahí su superioridad.

En segundo lugar, el número —aún en su consideración aritmética, diferente a la logística— continúa vinculado a procedimientos de cálculo de carácter particular, relativos a casos concretos —o resoluciones de *problemas*— por lo que las aserciones de la aritmética sólo pueden obtener el carácter universal e incondicionalmente verdadero del conocimiento matemático una vez que han sido expresadas de forma geométrica. No obstante, es necesario recordar que en la clasificación de las ciencias expuesta en *República*, Platón colocó a la aritmética en un nivel superior a la geometría (*República*, 1972, VII, 523c-526e). De todas formas, en los *Elementos* es frecuente el tratamiento de problemas aritméticos en términos geométricos. No obstante esto, no pueden ser considerados un tratado exclusivamente dedicado a la Geometría; Euclides se acerca por momentos al álgebra y se adentra de forma clara en la teoría de los números, no obstante plantea y resuelve en términos geométricos los problemas de ambos campos.

Desde el punto de vista metodológico, esta distinción entre geometría y aritmética se traduce en la oposición entre *demostración* y *cálculo*; los números como tales son insusceptibles de un tratamiento demostrativo como el que permiten las figuras geométricas, prestándose sólo a procedimientos de cálculo, que ya respondan a necesidades prácticas —logística— o tan sólo a problemas teóricos —aritmética— no alcanzan el grado de consistencia, evidencia y universalidad obtenido mediante la demostración geométrica.

Puede pensarse que este menosprecio de lo práctico frente a lo teórico marca un rasgo distintivo de la cultura griega, que en el contexto de Alejandría se vio particularmente apuntalado por la creciente separación de clases, en el marco de la cual las diferencias entre el hombre culto-teórico y el hombre práctico-ignorante se presentaban como insalvables. Por otra parte, el status de la matemática como ciencia *pura* e independiente de los intereses prácticos servirá como base a una concepción de la naturaleza del conocimiento matemático que sólo comenzará a ser revisada en el Renacimiento.

III. Estructura de los Elementos

Los *Elementos* tal como han llegado a nosotros se dividen en 13 libros. El primero comienza con las proposiciones básicas del sistema: *definiciones*, *axiomas* y *postulados*, seguidos de un tratamiento de geometría plana, principalmente triángulos y paralelas, y termina con una demostración del teorema de Pitágoras. El libro II se centra en las aplicaciones de dicho teorema, con tratamientos relativos a las transformaciones geométricas. El III está íntegramente dedicado a la geometría del círculo, y el IV a los polígonos regulares. Los libros V y VI se ocupan de la teoría de las proporciones, el primero en sus aplicaciones a magnitudes conmensurables e inconmensurables, el segundo en sus aplicaciones a la geometría plana.

A partir del libro VII comienzan los tratamientos de aritmética. Incluye definiciones de importancia, como las de unidad, número, par e impar, y se centra mayoritariamente en el estudio de algunas propiedades de los números primos. El libro VIII se dedica al estudio de las cantidades en progresión geométrica, o *proporción continua*. El IX complementa el estudio de las proporciones geométricas, y demuestra que existen infinitos números primos, explorando algunas relaciones entre números primos, pares e impares. Finalmente el libro X está dedicado a los números irracionales. A diferencia de los demás libros, se compone de tres grupos de definiciones y tres de proposiciones, seguramente a causa de lo intrincado de la temática.

El libro XI retorna al tratamiento de las relaciones entre puntos, rectas y planos en el espacio, dentro de la geometría de los sólidos. El XII demuestra los teoremas sobre el área y el volumen del prisma, la pirámide, el cilindro, el cono y la esfera. El libro XIII, finalmente, se dedica a los sólidos regulares, demostrando que son solamente cinco, demostración formulada inicialmente por Teeteto en el siglo IV, y exponiendo la forma de construirlos. Este último libro es el que muestra con mayor claridad la raíz platónico-pitagórica de Euclides, en cuanto los cinco sólidos tenían una alta significación tanto para los pitagóricos como para la filosofía platónica. Esto se refuerza si tenemos en cuenta la afirmación de Proclo (Proclus, 1948), de que el fin último de los *Elementos* era la construcción de los cinco sólidos regulares tratados por Platón (1952) en el *Timeo*.

El valor místico y cosmológico que los poliedros regulares poseían para los platónico-pitagóricos posteriores a Euclides, generó que posteriormente se agregaran dos libros más a los 13 originales. El libro XIV, escrito por Hipsicles de Alejandría en el siglo II d.C., y el

XIV, escrito por un discípulo de Isidoro de Mileto en el siglo VI d.C. Por mucho tiempo fueron tomados como parte auténticos, hasta que se estableció su carácter apócrifo (Sarton, 1960).

El sistema diseñado por Euclides especifica cuatro tipos de proposiciones matemáticas: *definiciones*, *axiomas*, *postulados* y *teoremas*. Esta estructura habría sido ya esbozada por Aristóteles en su obra *Analíticos posteriores* (1973)¹, pero cabe pensar que la influencia de Aristóteles en Euclides se restringe al diseño metodológico del sistema, mientras que la influencia conceptual respecto a la naturaleza misma del conocimiento matemático se sitúa en Platón.

La agrupación de *definiciones*, *axiomas* y *postulados*, contenida en el libro I, no está exenta de problemas de tipo historiográfico, derivados en parte de las diferencias de las ediciones tomadas como base y de los criterios de los editores. Este tema se vuelve particularmente espinoso al intentar discernir la diferencia entre *axiomas* y *postulados*, asunto sobre el que se volverá más adelante. Sin introducirnos de forma exhaustiva en los detalles de un debate que aún está abierto y que involucra aspectos conceptuales, históricos y filológicos que trascienden ampliamente los objetivos de este trabajo, daremos un panorama de las principales diferencias tomando como referencia cuatro ediciones. La de Robert Simson de 1756 (Euclid, 1838), que incluye los seis primeros libros más el XI y el XII, por ser de las más elaboradas entre las que se realizaron tomando como referencia el manuscrito de Teón de Alejandría. La de Thomas Heath de 1908 (Euclid, 1952), que incluye los 13 libros, en cuanto mantiene su vigencia hasta la actualidad. La edición de Juan David García Bacca (Euclides, 1944), que incluye los dos primeros libros, dada su amplia circulación en el mundo académico de habla hispana; y la de María Luisa Puertas Castaños (Euclides, 1991), que incluye los libros I a XIII, basada en la de Heiberg y Menge, por ser de las más recientes en español.

La edición de Simson (Euclid, 1838) presenta el libro I con 35 definiciones, 3 postulados y 12 axiomas. La edición de Heath (Euclid, 1952), presenta 23 definiciones, 5 postulados y 5 axiomas. La de García Bacca (Euclides, 1944) mantiene las 23 definiciones y los cinco postulados de Heath, pero incluye un total de 9 axiomas. Por último, la edición de Puertas Castaños (Euclides, 1991) sigue la de Heath, con 23 definiciones 5 postulados, y 5 axiomas.

De las 35 definiciones de Simson, Heath mantiene las primeras 18 con pocos cambios, y a partir de la XIX introduce una serie de modificaciones que comprimen y reordenan las restantes, por lo que en cuanto al número y contenido de éstas, no se registran entre los editores posteriores diferencias de significación.

Desde el punto de vista conceptual, la función de las *definiciones* consiste en distinguir y caracterizar el tipo de entidades que serán objeto de una determinada ciencia. No obstante, para entender el lugar que ocupan en los *Elementos*, es indispensable remitirnos brevemente al tratamiento que de ellas hizo Aristóteles. En sus *Analíticos Posteriores*, Aristóteles (1973) había discriminado las *hipótesis* de las *definiciones*, señalando que éstas solo permiten la comprensión del nombre que designa un determinado objeto —no importa si se trata de un objeto material como en las ciencias naturales, o un objeto geométrico como en los *Elementos*, en cuanto la caracterización aristotélica pretende valer para todas las ciencias—, sin que ello implique la postulación de su existencia. En el caso de la geometría, si ésta es el estudio de entidades tales como el punto, la línea y la superficie, será necesario plantar los cimientos del edificio geométrico definiendo estos objetos, en cuanto Aristóteles (*Analíticos Posteriores*, 1973) había

1 Véase en este mismo volumen el artículo de Elena Díez de la Cortina Montemayor, «Ciencia y método en Aristóteles» (comps.).

establecido igualmente que toda demostración matemática supone la definición de las entidades involucradas en ella. Incluimos aquí solo algunas de las definiciones de los objetos de la geometría que Euclides presenta en el libro I, desde los más primitivos hasta los más complejos (Euclides, 1991):

- I. Un punto es lo que no tiene partes.
- II. Una línea es una longitud sin anchura.
- III. Los extremos de una línea son puntos.
- IV. Una línea recta es aquella que yace por igual respecto de los puntos que están en ella.
- V. Una superficie es lo que solo tiene longitud y anchura.
- VI. Los extremos de una superficie son líneas.
- VII. Una superficie plana es aquella que yace por igual respecto de las líneas que están en ella.
- VIII. Un ángulo plano es la inclinación mutua de dos líneas que se encuentran una a otra en un plano y no están en línea recta.
- IX. Cuando las líneas que comprenden el ángulo son rectas, el ángulo se llama rectilíneo.
- X. Cuando una recta levantada sobre otra recta forma ángulos adyacentes iguales entre sí, cada uno de los ángulos iguales es recto y la recta levantada se llama perpendicular a aquella sobre la que está.

Las definiciones son anteriores tanto a los axiomas como a los postulados, ya que unos y otros se construyen presuponiendo los conceptos expuestos en ellas. Su valor de verdad es asumido sin demostración, ya que lo único que hacen es designar objetos y determinar características que son inmediatamente captadas por la intuición, como ser la indivisibilidad del punto o la unidimensionalidad de la línea. Sin embargo, sólo son *anteriores* a los postulados desde el punto de vista metodológico, y no en función de su importancia conceptual. Desde el momento en que solamente designan objetos matemáticos, y no establecen relaciones de objetos como los postulados, las definiciones no pueden ser consideradas como afirmaciones de conocimiento en el sentido estricto de la palabra. Señalan cuáles son los objetos de la geometría, pero no establecen qué tipos de relaciones pueden darse entre ellos, al modo en que si lo hacen axiomas y postulados.

Las definiciones son la base del sistema de Euclides, sólo desde el punto de vista metodológico, así como los axiomas y postulados lo son desde el punto de vista conceptual. Su importancia estriba en el hecho de que clarifican toda una serie de conceptos tales como punto, línea, superficie, etcétera cuyo uso, frecuente en la matemática griega, se daba de modo intuitivo, sin sustentarse en una caracterización matemáticamente aceptable. Si bien Euclides mantiene el respaldo intuitivo para la aceptación de lo que la definición afirma, propone un sistema que ordena, limita y sistematiza el número de definiciones posibles, insertándolas en un cuerpo organizado y diferenciándolas de otras proposiciones matemáticas posibles.

Pasando a los axiomas, presentaremos primero los 12 de la edición de Simson (Euclid, 1838):

- I. Las cosas iguales a una misma cosa son iguales entre sí.
- II. Y si a cosas iguales añadimos cosas iguales, las sumas son iguales.
- III. Y si substraemos cosas iguales de cosas iguales, las restas son iguales.
- IV. Y si a cosas desiguales se añaden cosas iguales, las sumas son desiguales.
- V. Y si de cosas desiguales quitamos cosas iguales, las restas son desiguales.
- VI. Y los dobles de una misma cosa son iguales entre sí.
- VII. Y las mitades de una misma cosa son iguales entre sí.

- VIII. Y las cosas que coinciden una con otra son iguales entre sí.
- IX. Y el todo es mayor que la parte.
- X. Dos rectas no circundan región.
- XI. Todos los ángulos rectos son iguales entre sí
- XII. Si una recta incidente sobre dos rectas, hace ángulos internos y de la misma parte menores que dos rectos, prolongadas esas dos rectas al infinito coincidirán por la parte en que estén los ángulos menores que dos rectos.

La edición de García Bacca es la que presenta menos variaciones respecto de la Simson, incluye el XI y el XII entre los postulados, y suprime el V, obteniendo así el número de 9, a pesar de que considera a Dos rectas no circundan región, como una probable interpolación posterior. Como se señaló, estas divergencias son resultado de lo problemático que resulta establecer tanto los orígenes de la distinción entre postulados y axiomas como su función en el sistema de Euclides. La interpretación clásica de Rey (1962) apuntaba a que la distinción puede no haber sido introducida por Euclides, sino por comentaristas alejandrinos posteriores influenciados por Aristóteles, por lo que axiomas y postulados sólo se distinguirían por su grado de generalidad y no por su estructura conceptual o su importancia dentro del sistema.

Sin embargo, nótese que los primeros 9 axiomas no se refieren específicamente a la geometría ni a la matemática, sino que se presentan como principios con pretensión de validez para cualquier ciencia, de ahí su denominación como *nociones comunes*. Los axiomas aparecen como nociones innatas *implantadas* en la mente humana, a las cuales se tiene un acceso inmediato por medio de la razón; de aquí que se trataría por definición de enunciados extrageométricos y no propios de la geometría.

Una idea de esta clase es la que seguramente llevó a Proclo (Proclus, 1948) a considerar que Dos rectas no circundan región está implícito en el postulado I: Postúlese el trazar una línea recta desde un punto cualquiera hasta un punto cualquiera (Euclides, 1991), por lo que debía ser considerado como un caso innecesario de multiplicación de axiomas, lo mismo que el IV, V, VI y VII en la lista de Simson. Ateniéndose a Proclo, Heath suprime el axioma de las rectas, y bajo la idea de que las afirmaciones geométricas deben ser consideradas como postulados y no como axiomas, desplaza los axiomas XI y XII de Simson al grupo de los postulados, llegando así a 5 axiomas, criterio que sigue la edición de Puertas Castaños (Euclides, 1991):

- I. Las cosas iguales a una misma cosa son también iguales entre sí.
- II. Y si se añaden cosas iguales a cosas iguales, los totales con iguales.
- III. Y si de cosas iguales se quitan cosas iguales, los totales son iguales.
- IV. Y las cosas que coinciden entre sí son iguales entre sí.
- V. Y el todo es mayor que la parte.

Los *axiomas*, son afirmaciones indemostrables, cuyo valor de verdad es *incondicionado*, en el sentido de que poseen un carácter *autoevidente* que los hace verdaderos más allá de la experiencia. Si nos atenemos al criterio de la edición de Heath, los axiomas son afirmaciones extrageométricas, que ofician como principios lógicos reguladores de toda producción de conocimiento, de modo que cualquier ciencia —y no sólo la geometría— que viole estos principios caerá inmediatamente en contradicción.

Pasando a los postulados, los tres primeros no presentan divergencias sustantivas entre las diferentes ediciones más allá de las diferencias de traducción. La de Simson mantiene tres postulados; las tres restantes incorporan los axiomas XI y XII como postulados IV y V respectivamente. Estos serían así los 5 postulados resultantes (Euclides, 1991):

- I. Postúlese el trazar una línea recta desde un punto cualquiera hasta un punto cualquiera.
- II. Y el prolongar continuamente una recta finita en línea recta.
- III. Y el describir un círculo por cualquier centro y distancia.
- IV. Y el ser todos los ángulos rectos iguales entre sí.
- V. Y que si una recta al incidir sobre dos rectas hace los ángulos internos del mismo lado menores que dos rectos, las dos rectas prolongadas indefinidamente se encontrarán en el lado en el que están los (ángulos) menores que dos rectos.

Desde el punto de vista conceptual, puede tomarse como base la idea de que los postulados constituyen el conjunto de principios básicos de la geometría, del mismo modo que los axiomas constituyen el conjunto de principios básicos comunes a todas las ciencias. Un *postulado* puede tomarse como una relación elemental entre ciertas entidades geométricas, como punto, recta, plano o circunferencia, de tal modo que el postulado no sólo incluye entidades sino que afirma su existencia, estableciendo entre ellas relaciones geoméricamente determinables. Al igual que los axiomas, los *postulados* son afirmaciones indemostrables, pero que no poseen un valor de verdad *incondicionado*, ya que éste depende de su relación con el espacio: un postulado es una proposición sobre las propiedades esenciales del espacio.

Dado que Euclides no escribió —o no ha llegado hasta nosotros— ninguna obra clarificando la naturaleza de las diferentes proposiciones que componen su obra, es necesario tomar como referencia influencias previas o comentaristas posteriores para esclarecer cuestiones que resultan significativas desde el punto de vista metateórico. Bajo esta estrategia, Eves y Newsome (1958) proponen una comparación entre la distinción entre axiomas y postulados introducida por Aristóteles en los *Analíticos Posteriores* (1973), que plausiblemente haya sido de referencia en el diseño de los *Elementos*, y la misma distinción incluida en el comentario de Proclo, realizado nueve siglos después de la obra de Aristóteles.

En Aristóteles pueden encontrarse las siguientes distinciones entre axioma y postulado: 1. un axioma es común a todas las ciencias, mientras que un postulado es específico de una ciencia; 2. un axioma es autoevidente, un postulado no lo es; 3. un axioma no es objeto de demostración; un postulado sí lo es, en cuanto la demostración de las proposiciones obtenidas a través suyo coinciden con las propiedades del espacio; 4. un axioma es asumido por el estudiante de matemáticas sin necesidad de prueba; un postulado puede ser asumido para facilitar el proceso de enseñanza, pero sin el sentimiento de evidencia que inspira el axioma (Aristóteles, 1973: 72a).

En Proclo mientras tanto, las diferencias son tres: 1. un axioma es una proposición autoevidente; un postulado es una construcción autoevidente; 2. un axioma es común a todas las ciencias, mientras que un postulado es específico de una ciencia; 3. un axioma es una afirmación obvia y aceptable para el estudiante de matemáticas, mientras que un postulado no necesariamente lo es (compárese el postulado I con el V).

Más allá de la distancia temporal que separa a Aristóteles y Proclo, ambos proporcionan indicios relevantes para comprender el sentido que en la obra de Euclides podría tener la distinción entre axiomas y postulados. Más allá de la distinción primaria entre el carácter general de los axiomas y el carácter específico de los postulados, resulta interesante la idea, presente en ambos, de que si bien un postulado no es demostrable en el mismo sentido en que lo es un teorema, tampoco es evidente en el mismo sentido en que lo es un axioma. Así, un postulado sería verdadero si al compararlo con nuestra experiencia del espacio, coincide con ésta. La única forma de efectuar la comparación es a través de la construcción, lo que explica el hecho

de que las formulaciones de los postulados sean imperativas, en el sentido de que ordenan o prescriben la realización de un determinado procedimiento geométrico con regla y compás. En su introducción a los *Elementos*, dice García Bacca: «El plan básico y típico de la geometría euclídea consiste y se cifra en construir objetos *delimitados* para que así resulten perfectamente visibles y abarcables con un golpe de vista.» (Euclides, 1944: LX).

Sin embargo, la construcción no puede ser el criterio de verdad definitorio de un postulado. En primer término resulta problemático interpretar los postulados IV y V como indicando construcciones, cuando más bien señalan propiedades o relaciones. En segundo término, el tomar la construcción como criterio de verdad implicaría equiparar su valor intuitivo al de las definiciones, lo cual no es posible entre otras cosas porque los postulados no definen objetos geométricos sino que los relacionan. Asimismo, y en el marco de una interpretación muy singular de la geometría euclídea, Jody Azzouni (2004) ha señalado que en el libro I de los *Elementos* puede identificarse la mezcla de dos sistemas; un sistema de tipo *pictórico*, en el que la construcción es parte fundamental de la prueba, y un sistema de tipo *lingüístico*, en el que las construcciones tienen sólo un valor heurístico o ilustrativo.

Por último, si nos atenemos a situar a Euclides en la tradición platónico-pitagórica, podemos considerar que la construcción geométrica no puede ser un proceso de validación directa de las entidades relacionadas en los postulados, ya que si esto fuera así los objetos de la geometría no serían más que *construcciones* de la mente humana, lo cual es inaceptable para cualquier platónico, en cuanto en términos de Platón la geometría es conocimiento de lo que es, y no de lo que está sujeto a la generación y la muerte (*República*, 1972, VII, 526e). Cabe pensar más bien, que la construcción oficia como un paso intermedio en el acceso a la verdad matemática, de modo que los postulados que resultan imposibles de construir pueden ser descartados, y aquellos que aceptan la construcción pueden ser aceptados, pero no por el solo hecho de poder ser construidos, sino porque a través de la construcción, el intelecto del geómetra está accediendo al conocimiento de objetos que en cuanto tienen existencia propia no son construidos, sino descubiertos a través de la construcción, que siempre puede distinguirse del objeto matemático propiamente dicho (Platón, *Carta VII*, 1972, 342b-343e).

En este sentido, aparece como presupuesto básico de la geometría griega lo que Azzouni (2004) ha denominado una *teoría sustancial de la verdad*: una vez que las afirmaciones de la geometría, y particularmente los teoremas, se aplican al mundo físico, deben ser verdaderos, pero si son verdaderos, deben serlo acerca de algo, a saber de objetos matemáticos reales, con propiedades reales, tal como los entendía la tradición platónico-pitagórica. Así, la construcción en la geometría de Euclides oficia como un procedimiento para conocer objetos geométricos, sin que ello signifique que los objetos de la geometría sean nada más que construcciones.

IV. Procedimientos operativos

En un lenguaje más cercano a la matemática contemporánea que a las bases platónicas de Euclides, se puede vincular el criterio de verdad de un postulado con su funcionalidad respecto de la cadena demostrativa del sistema en el que se inserta: si su aceptación permite derivar teoremas que puedan ser demostrados sin caer en contradicción, el postulado es válido. Por ejemplo, el teorema *Dada una recta delimitada construir sobre ella un triángulo equilátero* supone el postulado I acerca de la construcción de una recta. Si este teorema puede ser demostrado, el postulado que lo respalda puede ser incluido en el sistema. A su

vez, las relaciones establecidas en los postulados se valen de los términos de las *definiciones*, por lo que también una demostración debe recurrir a éstas. Cabe revisar la proposición 1 de libro I de los *Elementos* para ver como en ella se insertan las definiciones I, II, III, IV, XV, XVI, los postulados I y III y el axioma I. Para las dos proposiciones que analizaremos, optamos por la traducción de García Bacca (Euclides, 1944), en cuanto su división numérica de los pasos de la demostración facilita la comprensión del texto:

Proposición 1:

dada una recta delimitada construir sobre ella un triángulo equilátero.

- I. 1. La recta delimitada dada sea la AB . (La delimitación de una recta se apoya en el postulado I, sustentado en las defs. I, II, III y IV).
- I.2. Hay que construir sobre la recta AB un triángulo equilátero.

Demostración

- I.3.1. Con centro en A y con el radio AB describese un círculo BGD (la construcción de un círculo se apoya en el postulado III, sustentado en la def. XV).
- I.3.2. Y de nuevo con centro B y con el radio BA describese el círculo AGE (nuevamente apoyada en el postulado III y la def. XV).
- I.3.3. Y desde el punto G , en que se cortan uno a otro tales círculos, trácese hasta los puntos AB las rectas GA y GB (nuevamente la delimitación de una recta, apoyada en el postulado I).
- I.4.1. Y puesto que el punto A es centro del círculo (Def. XVI) GDB , la recta AG es igual a la AB (Def. XV).
- I.4.2. Y de nuevo, puesto que el punto B es centro del círculo (Def. XVI) GAE , la recta BG es igual a la BA (Def. XV).
- I.5.1. Pero se demostró también que la GA es igual a la AB .
- I.5.2. Por tanto cada una de las rectas GA y GB es igual a la AB .
- I.5.3. Más cosas iguales a una y la misma son también iguales entre sí (axioma I).
- I.5.4. Luego la GA será igual a la GB .
- I.5.5. Por tanto las tres rectas GA , AB , BG , son iguales entre sí.
- I.1.2. Según esto, pues, el triángulo ABG es equilátero y está además construido sobre la recta delimitada dada AB (fórmula final).

La construcción resultante es la siguiente:

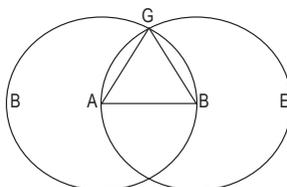


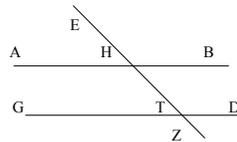
Figura 1.

Como puede verse, a los *teoremas* de esta clase Euclides les asigna una serie metodológica constituida por la *hipótesis*, la *demostración* y la *fórmula final*, o aquello que se quería demostrar. Podemos distinguir al respecto dos tipos de pruebas, ninguna de ellas equivalente sin más a una demostración: la directa y la de *reducción al absurdo*. La proposición

ya revisada constituye un tipo de demostración directa. La reducción al absurdo mientras tanto, consiste en aceptar la negación de la hipótesis inicial del teorema, y derivar de ella una contradicción, lo cual obliga a aceptar la hipótesis opuesta; a saber la inicial del teorema. Como ejemplo de reducción al absurdo, podemos tomar la proposición 29 del libro I, conocida por el hecho de que Euclides se vale del postulado V para realizar la demostración (Euclides, 1944):

Proposición 29:

una recta que cae sobre dos rectas paralelas hace ángulos alternos iguales entre sí y el externo igual al interno y opuesto y los internos del mismo lado igual a dos rectos.



- 29.1. Sea el EZ la recta que cae sobre las dos paralelas AB, GD.
- 29.2. Digo que hace los ángulos alternos AHT y HTD iguales y el ángulo externo EHB igual al interno y opuesto HTD y los internos del mismo lado BHT, HTD igual a dos rectos.

Demostración.

- 29.31. Porque si el ángulo AHT no fuese igual al HDT, uno de los dos sería el mayor.
- 29.32. Sea AHT el mayor.
- 29.33. Añádese el ángulo común BHT.
- 29.34. Serán, por tanto, los ángulos AHT, BHT mayores que los BHT, HDT.
- 29.35. Mas los ángulos AHT, BHT, son igual a dos rectos.
- 29.36. Luego, los BHT, HDT serán menores que dos rectos.
- 29.37. Ahora bien: dos rectas con dos ángulos internos menores que dos rectos, prolongadas al infinito, coincidirán.
- 29.38. Luego, las AB, GD, prolongadas al infinito, coincidirán.
- 29.39. Pero no coinciden, porque se supuso que son paralelas.
- 29.40. Luego el ángulo AHT no es desigual con el HDT.
- 29.41. Es, por tanto, igual.
- 29.51. Por otra parte: el ángulo AHT es igual al EHB.
- 29.52. Luego también el AHB será igual al HDT.
- 29.53. Añádese el ángulo común BHT.
- 29.54. Serán, por tanto, iguales los ángulos EHB, BHT con los BHT, HDT.
- 29.55. Mas los EHB, BHT son igual a dos rectos.
- 29.56. Luego también los BHT, HDT son igual a dos rectos.
- 29.12. Por tanto una recta que cae sobre dos rectas paralelas hace ángulos alternos iguales entre sí y el externo igual al interno y opuesto y los internos del mismo lado igual a dos rectos.

Que es lo que se quería demostrar.

Aquí puede verse la estructura característica de la reducción al absurdo. Luego de enunciada la proposición, en 29.1 se establece la construcción que da base al proceso demostrativo, y en 29.2 las condiciones en que la proposición rige para la construcción particular propuesta. En 29.31 se niega la tesis que se quiere demostrar, a saber la igualdad entre los ángulos AHT y HDT, y desde 29.32 en adelante se exploran las consecuencias lógicas de esta negación. En 29.37 se introduce el postulado V, y en 29.38 y 29.39 se arriba a que la aceptación de la desigualdad de los ángulos en cuestión conduce a una contradicción —que dos paralelas coinciden en un punto—, y a partir de 29.40 se deduce la tesis a probar, una vez establecido que la aceptación de la tesis contraria conduce a una contradicción.

La diferencia entre este tipo de pruebas y una demostración propiamente dicha radica en que en esta última el proceso deductivo de obtención de los teoremas se realiza recurriendo únicamente a los axiomas y reglas de inferencia; mientras que en una *prueba* se obtiene un teorema pero recurriendo no solo a axiomas y reglas, sino también a otros teoremas demostrados previamente (Datri, 1999). La proposición 1 del libro I muestra un proceso estricto de demostración, ya que sólo se apoya en definiciones, postulados y axiomas, no en otros teoremas ya demostrados.

Sin embargo, comparando el ejemplo precedente con el teorema de Pitágoras, podemos establecer igualmente una diferencia entre *teoremas propiamente dichos* y *problemas* (Rey, 1962). Los primeros son relaciones *necesarias* —en el sentido de que no pueden ser de otra manera— entre entidades matemáticas, que son *descubiertas* en la investigación de las propiedades esenciales de los entes geométricos. Los segundos son relaciones *contingentes* —variables— entre estos objetos, que son *construidas* para despejar incógnitas concretas.

En este sentido, la proposición *Sobre toda recta dada es posible construir un triángulo equilátero* constituye la resolución de un problema, ya que sobre una recta dada se pueden construir también triángulos que no sean equiláteros u otras figuras, la relación es *contingente*. Sin embargo la proposición *Dado un triángulo rectángulo, la suma de los cuadrados de los catetos equivale al cuadrado de la hipotenusa* es un teorema, ya que no existe otra posibilidad de relación entre los catetos y la hipotenusa de un triángulo rectángulo, la relación es por tanto, *necesaria*.

V. De los elementos a las geometrías no euclidianas

Según señala Heath (Euclid, 1952), los *Elementos* probablemente se hayan transformado en un texto clásico y ampliamente popular a poco tiempo después de su publicación. Ya en tiempos de Arquímedes, son constantemente referidos y usados como libro de texto básico para el aprendizaje de la geometría.

Pero más allá de su popularidad, la obra de Euclides no dejó de generar problemas y controversias, una de las cuales lograría con el tiempo un status de privilegio entre los episodios estelares de la historia de la ciencia: el problema del quinto postulado. Las primeras dificultades generadas en torno a la geometría euclidea afectaban en principio los límites de la distinción entre axiomas y postulados por una parte y teoremas por la otra. Se supone que los axiomas y postulados se diferencian de los teoremas por su carácter evidente y su simplicidad —siendo los axiomas aún más simples y generales que los postulados—, pero el ya famoso postulado V o *postulado de las paralelas* nunca resultó para los matemáticos tan simple y autoevidente como las restantes proposiciones de los *Elementos*.

Cabe recordar la formulación: *si una recta al incidir sobre dos rectas hace los ángulos internos del mismo lado menores que dos rectos, las dos rectas prolongadas indefinidamente se encontrarán en el lado en el que están los (ángulos) menores que dos rectos* (Euclides, 1991). El afirmar que las rectas prolongadas *indefinidamente*, coincidirán por la parte en que los ángulos sean menores que dos rectos atenta contra el carácter intuitivo del postulado, ya que el infinito no es un concepto dado a la intuición de la misma manera en que puede pensarse que lo es —por ejemplo— la igualdad de los ángulos rectos. Es así que desde la antigüedad se multiplicaron los intentos por demostrar el postulado V deduciéndolo de los otros cuatro, proporcionar una versión más evidente que lo volviera tan aceptable como los restantes, o establecer que su negación conducía a un absurdo; sin embargo por diferentes motivos todas estas tentativas fracasaron.

Entre los griegos, Posidonio (s. I) propuso la versión más simple *Las rectas paralelas son equidistantes*. El célebre astrónomo Claudio Ptolomeo² (ca. 85-165 d.C.) postuló *Por un punto exterior a una recta sólo cabe trazar una paralela*, y finalmente Proclo (410/412-485 d.C.), propuso *Dos rectas paralelas guardan entre sí una distancia finita*. Entre los medievales, los persas Omar Khayyám (1050-1123) y Nasir al Din al Túsi (1201-1274), trataron de probar el postulado demostrando que su negación conducía a una contradicción. En occidente, el franco-judío Levi Ben Gerson (s. XIV), realizó un comentario de los *Elementos* intentando también una demostración del postulado, lo mismo que Federigo Commandino (1509-1575), traductor de Euclides al latín, quien esbozó una demostración basada en Proclo (Sarton, 1927).

Finalmente entre los modernos, Christopher Clavius (1538-1612), opositor de Galileo en la disputa sobre el sistema heliocéntrico, y editor de los *Elementos* en 1574, propuso *Todos los puntos equidistantes de una línea recta, situados a un lado determinado de ella, constituyen una línea recta*. Otro editor de *Euclides*, el italiano Giordano Vitale (1633-1711) buscó ofrecer una definición de paralelismo que solucionara el problema, pero no logró mayor aceptación. El inglés John Wallis (1606-1703) y el escocés John Playfair (1748-1819) propusieron igualmente postulados que sustituyeran la versión original, siendo el de Playfair uno de los más populares hasta nuestros días: *Por un punto exterior a una recta dada solo pasa una recta paralela a la recta dada*. Finalmente, el francés Adrien-Marie Legendre (1752-1833) retomó el camino de convertir el postulado en teorema, pero sin mayor éxito (Sarton, 1927).

Pero quien dio un nuevo enfoque al asunto —contando los antecedentes árabes— fue sin duda el italiano Girolamo Saccheri (1667-1733). Su estrategia consistió en negar el V postulado y obtener de sus negaciones una contradicción, demostrando así su consistencia. Obtuvo una serie de teoremas extraños, que consideró contradictorios, reafirmando su posición a favor del sistema euclideo. Influenciado probablemente por el trabajo de Saccheri, el suizo Johann Lambert (1728-1777) escribe en 1766 su obra *Teoría de las paralelas*, en la que maneja la posibilidad de construir geometrías alternativas a la de Euclides (Datri, 1999).

La imposibilidad de demostrar el postulado V, más los sugestivos resultados obtenidos de sus negaciones, terminarán dando lugar en el siglo XIX al surgimiento de las geometrías no-euclideas, desarrolladas entre otros por los alemanes Karl Friedrich Gauss (1777-1855) y Bernhard Riemann (1826-1866) el húngaro Janos Bolyai (1802-1860) y el ruso Nikolai

2 Véase en este mismo volumen el artículo de Cristián C. Carman, «La teoría planetaria de Claudio Ptolomeo» (*comps.*).

Lobachevsky (1793-1856)³. A pesar de los problemas asociados al postulado V, para el comienzo de los trabajos de Gauss la geometría de Euclides era tomada como la representación verdadera de las propiedades del espacio, de modo que esta correspondencia de sus postulados con el mundo exterior hacían del sistema euclideo la única geometría posible. Incluso en una época de severas revisiones del saber de la antigüedad, como lo fue la revolución científica de los siglos XVI al XVIII, el modelo euclideo no fue sometido a cuestionamiento. Por el contrario, fue insertado en la naciente concepción moderna de la ciencia: en la física clásica, el espacio era considerado como un medio homogéneo que existía objetiva e independientemente de su contenido físico, cuya rígida e intemporal estructura ya estaba contenida en los postulados y teoremas de la geometría de Euclides (Datri, 1999: 24).

El filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804) llegó a establecer que el espacio tal como lo describe la geometría de Euclides se corresponde con la forma en que los seres humanos nos representamos el espacio como intuición *a priori*, es decir como condición formal de posibilidad de nuestras percepciones. Si se le niega a la geometría euclidea esta aplicación a la realidad, la geometría misma es imposible, concluía Kant (1952). De este modo, la filosofía de Kant y la física de Newton se desarrollaron en coherencia con la geometría de Euclides y bajo su aceptación incondicional, lo cual contribuyó fuertemente a que la gran mayoría de los matemáticos se resistieran a buscar soluciones al problema de la paralelas fuera del marco euclideo.

Gauss por el contrario, partió de la idea de que el postulado de las paralelas no podía demostrarse deduciéndolo de los otros cuatro, es decir que era *independiente*. Si esto es así, era posible construir una geometría sustituyéndolo por otro postulado sin que el sistema entrara en contradicción. Diseñó de este modo la llamada *geometría astral*, un primer tipo de las que posteriormente se denominarían *Geometrías no-euclidianas*, en la cual por un punto exterior a una recta dada puede trazarse más de una paralela.

Por desconfianza de la reacción de la comunidad matemática ante un descubrimiento tan revolucionario, Gauss nunca publicó sus resultados, aunque los comunicó en una carta a Bessel en 1829. Quien sí lo hizo fue Lobachevsky, que en el mismo año edita su obra *Sobre los principios de la Geometría*. En 1832 Bolyai publica *Ciencia absoluta del espacio*, y finalmente en 1854 ve la luz *Sobre las hipótesis en que se apoyan los fundamentos de la Geometría*, de Riemann. Cada una de estas obras proponen distintos sistemas de Geometría no euclidiana internamente coherentes, en los que no vale el postulado V. Las geometrías *hiperbólicas* de Lobachevsky y Bolyai desarrollan las consecuencias lógicas de sustituir el 5^o postulado por otro según el cual por un punto exterior a una recta puede trazarse *más de una* paralela, mientras que la geometría *elíptica* de Riemann postula que por un punto exterior a una recta no puede trazarse *ninguna* paralela.

Los trabajos de Lobachevsky y Bolyai no recibieron demasiada atención por parte de la comunidad matemática al momento de su publicación. Gauss hizo llegar su apoyo a ambos, pero mantuvo la tesitura de no publicar sus resultados. Sólo a su muerte, en 1855, se descubrieron entre sus materiales inéditos los trabajos sobre Geometría astral, lo cual sumado a la reciente edición del trabajo de Riemann, dará comienzo definitivo a una crisis que afectará las bases más fundamentales de la concepción moderna de las matemáticas.

3 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Rodríguez, «El problema del V Postulado y el surgimiento de las Geometrías no Euclidianas» (*comps.*).

Si bien el surgimiento de las geometrías no euclidianas está estrechamente vinculado a los problemas del postulado V, una vez consolidadas provocaron una crisis que llevó a la revisión de los conceptos de axioma y postulado, y de los criterios de aceptación de las proposiciones indemostrables que dan base a los sistemas matemáticos. Esto responde por ejemplo a que el carácter contraintuitivo de la noción de infinito no afecta sólo al postulado de las paralelas, sino también a otras proposiciones básicas del sistema euclideo. De aquí que el criterio de autoevidencia como condición de aceptación de los axiomas y postulados de los sistemas matemáticos será primero severamente cuestionado y finalmente abandonado por la comunidad matemática. Un comentario de Peter Strawson sobre el concepto de recta en Euclides es bastante ilustrativo al respecto:

Entre dos puntos cualesquiera de una recta siempre hay otro punto. ¿Cómo podemos, incluso, decidir si esto está de acuerdo con nuestra intuición visual o no? ¿Qué imagen vendría al caso? ¿Nos ayuda el mirar simplemente una recta? Cualquier forma que pudiéramos pensar de confrontarla con nuestra intuición visual, o de confrontar nuestra intuición visual con ella, sugiere más bien que es anti-intuitiva. (Strawson, 1975: 256)

Este problema afecta particularmente a la concepción del status de verdad de los axiomas y postulados que rige desde la antigua Grecia. Si estos son autoevidentes, lo son a causa de la intuición, por lo que si no pueden apoyarse en ésta, pierden su carácter de verdad incondicionada. Una vez que axiomas y postulados han sido despojados de su apoyatura intuitiva, y que las geometrías no-euclideas han desarrollado nuevos modelos en los que no vale el postulado V, la propia distinción axioma postulado pierde sentido, y el grado de aceptabilidad de un postulado —ya no su *valor de verdad*— queda dado no por su *correspondencia* con el espacio, sino por su *coherencia* con las otras proposiciones del sistema. Un postulado es consistente si su aceptación permite derivar teoremas carentes de contradicción.

De aquí que las proposiciones iniciales que fundan un sistema geométrico puedan en primer momento ser establecidas sin un criterio que establezca su aceptabilidad, la que sólo quedará determinada por la coherencia de las derivaciones a las que conduce su aceptación. Uno de los representantes más característicos de esta nueva forma de entender la geometría fue el físico, matemático y filósofo francés Henri Poincaré (1854-1912):

Los axiomas geométricos no son juicios sintéticos a priori, ni hechos experimentales. Ellos son convenciones: nuestra elección, entre todas las convenciones posibles, es guiada por los hechos experimentales, pero se mantiene libre y solamente limitada a la necesidad de evitar cualquier contradicción... En otras palabras, los axiomas de la geometría son simplemente definiciones disfrazadas. ¿Qué debe pensarse entonces acerca de la pregunta: ¿La geometría euclidiana es verdadera? Tal pregunta no tiene sentido. (Poincaré, 1943: 62)

Semejante posición *convencionalista*, en cuanto considera a los axiomas geométricos como convenciones, posibilita la convivencia de distintas geometrías, planteando el problema de las relaciones entre geometría y realidad. Si geometrías contradictorias entre sí pueden coexistir con tal que no presenten contradicciones internas, ¿tiene algo que ver la geometría con el mundo exterior? ¿alguno de estos sistemas internamente coherentes se aplica al espacio mejor que los demás? Estas interrogantes y otras asociadas constituyen parte esencial de la historia y la filosofía de las matemáticas del siglo XX, atravesando hasta la actualidad algunos de los debates más representativos en ambas disciplinas.

Volviendo a Euclides, y más allá de los interminables y ríos de tinta que ha suscitado y sigue suscitando el problema del postulado V, el aporte del autor de los *Elementos* a la historia de la matemática posee una magnitud muy difícil de equiparar. En una época de dispersión y asistematicidad del conocimiento matemático, este ignoto griego del cual poco y nada

sabemos sentó las bases sobre las cuales debe asentarse la construcción de cualquier sistema matemático dado, bajo una forma que si bien no es inmune a severos cuestionamiento de orden conceptual, metodológico y epistémico, ha sido y sigue siendo modelo de inspiración y referencia obligada para el trabajo de matemáticos de todas las épocas.

VI. Bibliografía

Es de referencia el sitio www.euclides.org, en el cual pueden encontrarse artículos sobre Euclides y ediciones de los *Elementos*, entre otros materiales de interés.

Apollonius (1957), «Conics. Preface». En THOMAS, I. (ed.), *Greek Mathematical Works*, London, William Heinemann/ Harvard University Press. 2v.

Aristóteles (1973), *Obras*, Madrid, Aguilar.

Azzouni, J. (2004), «Proof and ontology in Euclidean Mathematics», en Hoff Kjeldsen, T.; Andur Pedersen, S.; Sonne Hansen-HANSEN, L. (eds.), *New Trends in the History and Philosophy of Mathematics*, Odense, University Press of Southern Denmark.

Colerus, E. (1949 [1943]), *Historia de la Matemática*, Buenos Aires, Progreso y Cultura.

Datri, E. (1999), *Geometría y realidad física*, Buenos Aires, Eudeba.

Escolar Sobrino, H. (2001), *La Biblioteca de Alejandría*, Madrid, Gredos.

Euclid (1838 [1756]), *The Elements of Euclid. The first six books*, Philadelphia, Desilver, Thomas & Co. Ed: R. S. Simson.

_____ (1952 [1908]), *The Thirteen Books of Euclid's Elements*, London, William Benton/ Encyclopaedia Britannica, Ed. Th. Heath.

Euclides (1991), *Elementos*, Madrid, Gredos. Ed. M. L. Puertas Castaños. 3v.

_____ (1944), *Elementos de Geometría*, México, UNAM. Ed: J. D. García Bacca.

Eves, H.; Newsome, C. (1958), *An Introduction to the Foundations and Fundamental Concepts of Mathematics*, New York, Rinehart & Company.

Kant, I. (1952 [1781]), *Crítica de la Razón Pura*, Buenos Aires, Sopena.

Knorr, W. R. (2001), «On Heiberg's Euclid». En *Science in Context*, 14.

Melogno, P. (2008), *Platón y Euclides: pilares de la tradición matemática griega*, Montevideo, CEBA.

Pappus d'Alexandrie (1933), *La collection mathématique*, Paris/Bruges, Desclée de Brouwer, 2v.

Platon (1972), *Obras Completas*, Madrid, Aguilar.

Plutarch (1952), *The Lives of the Noble Grecians and Romans*, Chicago, Encyclopaedia Britannica/ William Benton.

Poincaré, H. (1943 [1901]), *La ciencia y la hipótesis*, Buenos Aires, Espasa-Calpe.

Préaux, C. (1984 [1978]), *El mundo helenístico*, Barcelona, Labor, 2v.

Proclus de Lycie (1948), *Les Commentaires sur le premier Livre des Elements D'euclide*, Paris, Abel Blanchard.

Rey, A. (1962 [1943]), *El apogeo de la ciencia técnica griega*, México, UTEHA, 2v.

Rostovtzeff, M. (1967 [1941]), *Historia social y económica del mundo helenístico*, Madrid, Espasa-Calpe. 2v.

Sarton, G. (1960 [1954]), «Euclides y su tiempo». En *Ciencia antigua y civilización moderna*, México, FCE.

_____ (1927), *Introduction to the History of Science*, Baltimore, The Williams & Williams Company, 3v.

Strawson, P. (1975 [1966]), *Los límites del sentido*, Madrid, Revista de Occidente.

Szabó, Á. (1978), *The beginnings of Greek Mathematics*, Budapest, Akademiai Kiadó.

4. La teoría planetaria de Claudio Ptolomeo

I. Vida

De Ptolomeo no se sabe prácticamente nada. La mejor explicación es, probablemente, que simplemente fue un científico genial, y nada más que ello, por lo que no despertó mayor interés entre los escritores antiguos (Plutarco era contemporáneo, pero Diógenes Laercio tampoco lo menciona). Lo poco que sabemos, que se reduce a la época aproximada y el lugar en el que trabajó, debemos extraerlo de sus obras.⁴

La primera observación que Ptolomeo realizó, registrada en el *Almagesto*, es del 5 de abril del año 125, en Alejandría, donde reportó un eclipse lunar (IV, 9; H1, 329; T 206)⁵ y la última que menciona como propia es del 2 de febrero del 141, también en Alejandría, donde registró la posición de Mercurio respecto del Sol (IX, 7; H2, 263; T 450). Sabemos, además, que escribió muchas obras; algunas realmente importantes y extensas luego del *Almagesto*, seguro las *Hipótesis Planetarias* y el *Tetralibros*, y tal vez también la *Geografía*, por lo que al menos unos 20 años más debe haber seguido en actividad⁶. Podemos conjeturar, por lo tanto, que nació cerca del año 100 y murió alrededor del 165, tal vez un poco más tarde. Boll (1894) afirma que murió en 178. No sabemos dónde nació; su nombre, Claudio (Κλαύδιος), es claramente griego y el Ptolomeo (Πτολεμαῖος) podría indicar —como lo señala Pedersen (1974: 12)— que era originario de alguno de los pueblos egipcios que recibieron su nombre luego de los Reyes Ptolemaicos, tal vez *Ptolemaïs Hermeiū*, en el Egipto Medio. Lo que sí está claro es que su vinculación con los reyes ptolemaicos —que lo llevó, por ejemplo, a aparecer

4 Las biografías más completas pueden verse en Boll (1894) y Fisher (1932), en la que se basan todos los demás —pero que también pueden consultarse—: Pedersen (1974: 11-13) y Neugebauer (1975: 834-836). Una buena biografía, más completa y actualizada que las dos primeras se encuentra en Toomer (1975: 186-206).

5 Los textos del *Almagesto* serán citados según el uso habitual, indicando primero el libro y capítulo del *Almagesto* (IV, 9), luego el tomo y la página de la edición crítica de Heiberg (H1, 329) a lo que agregaré, para mayor comodidad, la página de la traducción de Toomer (T 206).

6 Neugebauer (1975: 834) sostiene que el *Almagesto* es, probablemente, la primera obra de Ptolomeo, pero Hamilton, Swerdlow y Toomer (1987) han defendido con fuertes argumentos que la *Inscripción Canónica* es anterior.

con vestidura e insignias reales en algunas imágenes y a ser llamado *divino* (θειότατος)— no es más que una confusión antigua y medieval. Trabajó en Alejandría, a juzgar por el lugar de muchas de sus observaciones y de las muchas otras que cita y que sólo podía encontrar en una biblioteca de la magnitud de esa gran capital, o tal vez en Canopus, un pequeño pueblo vecino a la metrópolis, hacia el este. Sabemos que en algún momento colaboró con él un tal Theón, a quien atribuye algunas observaciones de Venus, y que la mayoría de las obras las dedica a un tal Siro, del cual no sabemos absolutamente nada.

II. Obra

Como dice Pedersen (1974: 13), si bien Ptolomeo es conocido como un gran astrónomo, un repaso rápido del título de sus obras bastará para mostrar que su interés era mucho más universal. En efecto, sus obras podrían formar una especie de Enciclopedia de la Matemática Aplicada, en contraste con los ya existentes trabajos de exposición de la matemática pura, cuyo mejor ejemplo, sin duda, son los *Elementos* de Euclides⁷. Además de sobre astronomía, escribió sobre geografía, climatología, óptica, armónica, y también algunas obras filosóficas y astrológicas.

Sus obras más importantes son, en un probable orden cronológico, primero la *Inscripción Canónica*, una extraña obra que consiste en una lista de parámetros astronómicos (velocidades medias de los planetas, la distancia de la Tierra y del Sol, etcétera) que aparece al comienzo de algunos manuscritos medievales del *Almagesto* y reproduce los datos presentes en un monumento en Canopus, supuestamente levantado el décimo año del reinado de Antonino. Luego el *Almagesto*, del que hablaremos en la siguiente sección. Probablemente le siguieron *Las Hipótesis Planetarias* y las *Tablas Manuales*. Las últimas consisten en un conjunto de instrucciones para utilizar las tablas que permiten calcular las posiciones planetarias y un grupo de tablas que componen lo central de la obra pero que no se han conservado en el formato original de Ptolomeo, sino en una versión revisada por Theón de Alejandría (no confundir con el Theón antes mencionado). Las tablas, sin duda, están inspiradas en las del *Almagesto*, aunque tienen algunas diferencias importantes. Se trata de tablas de cálculos de astronomía esférica, del movimiento medio del Sol, la Luna y los planetas, de sus anomalías, de eclipses, de paralaje de la Luna, de Lunas nuevas y llenas y varias otras. El fin de esta obra, la simplificación de los cálculos para obtener más fácilmente las posiciones planetarias al precio de la precisión, tenía, sin duda, como destinatarios principales a los astrólogos.

Las Hipótesis Planetarias merecen un párrafo aparte. Es una pequeña obra pero con una historia fascinante. Contiene dos libros: al primero lo hemos conservado en griego, pero del segundo sólo tenemos traducciones árabes y hebreas medievales. La obra describe de manera simplificada los modelos planetarios del *Almagesto*, con el objetivo de facilitar la construcción de instrumentos. La edición crítica clásica era la de Heiberg (1907), en la que aparecía la edición griega del primer libro y una traducción del árabe al alemán del segundo libro. Pero luego de un profundo estudio de autores medievales, Hartner (1964) concluyó que las *Hipótesis* debían contener una parte que no aparecía en la edición de Heiberg ni, por lo tanto —supuso Hartner—, en los manuscritos árabes y griegos que los traductores de esa edición habían utilizado. La laguna tenía que ver con toda una tradición que hasta

7 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno «Los Elementos de Euclides y el desarrollo de la matemática griega» (*comps.*).

ese momento se creía de origen medieval, vinculada con el cálculo de las distancias absolutas de los planetas. Se creía que, si bien estaba basada en valores que se encontraban en el *Almagesto* y, probablemente, inspirada por una sugerencia presente en el segundo libro de las *Hipótesis*, el cálculo era de origen medieval. Hartner observó que algunas citas de autores árabes hacían referencia explícita a una obra de Ptolomeo que, en su interpretación, era las *Hipótesis*. En ese artículo, Hartner aseguraba que la búsqueda de la parte faltante del manuscrito en bibliotecas de Oriente y Occidente podía ser fructífera. Goldstein encontró lo que Hartner predijo en un manuscrito hebreo. Luego, revisando el manuscrito árabe que habían utilizado los traductores de Heiberg, descubrió que también en él se encontraba la parte perdida. La razón de la omisión de la edición de Heiberg —se supo después— fue que el primer traductor (L. Nix) murió durante la traducción y los nuevos traductores, Bohl y Heegaard, comenzaron la traducción un poco más adelante, dejando sin traducir lo que ahora se conoce como la parte II del libro I. Justo en esa parte está el cálculo de las distancias absolutas de los planetas que Hartner predijo. En Goldstein (1967) aparece la traducción inglesa de la parte perdida, junto con el manuscrito completo en árabe. Existe una traducción al castellano de la obra completa, editada por Pérez Sedeño (1987), pero lamentablemente tiene numerosos errores. La cuestión sigue siendo intrigante porque parece que la parte omitida involuntariamente en la edición de Heiberg se había perdido también durante la antigüedad, a juzgar por las referencias a la obra que aparecen en Proclo o Simplicio quienes, aun conociendo la obra, no atribuyen el cálculo de las distancias a Ptolomeo.

Otra obra importantísima de Ptolomeo, que gozó incluso de mayor fama que el mismo *Almagesto* durante gran parte de la Antigüedad y Edad Media es el *Tetralibros* o *Liber quadripartitus*, nombre con el que es conocido el *Apostelesmatika* por estar compuesto, evidentemente, por cuatro libros. Si el *Almagesto* sirve para predecir las posiciones de los planetas, el *Tetralibros* —nos dice Ptolomeo— sirve para predecir la influencia de ellos sobre el comportamiento de los cuerpos en la Tierra. Esta obra, por lo tanto, es el complemento astrológico del *Almagesto*. Menos importantes son dos pequeñas obritas, la *Analemma* y el *Planispherium*, que tienen que ver con la solución de problemas de astronomía esférica mediante construcciones geométricas. También hay que mencionar las *Phaesis* o *Parapegma*, que vincula las fases —períodos de visibilidad— de las estrellas fijas con pronósticos climáticos. Finalmente, otra obra importantísima de Ptolomeo es la *Geografía*, en la que describe todo el mundo entonces conocido, dando las coordenadas geográficas de alrededor de ocho mil localidades y es sumamente relevante por los principios cartográficos utilizados en varios mapas. Finalmente, además de las reflexiones filosóficas que aparecen en la introducción de varias de sus obras, por ejemplo el *Almagesto*, Ptolomeo escribió algunos opúsculos dedicados exclusivamente a temas filosóficos, como el *Perí Kriterion kai Hegemonikon*, cuya traducción sería *Acerca de los criterios [de la verdad] y de las [facultades] gubernativas [del hombre]*, en el que parecen juntarse dos breves tratados acerca de lo que su título indica. Además, escribió al menos dos obras que no se han conservado en su totalidad: la *Óptica* y la *Armónica*.

III. El Almagesto

El *Almagesto* es, sin duda, la mayor obra astronómica de Ptolomeo y una de las más maravillosas obras científicas de todos los tiempos. Su nombre deriva de la traducción latina (*Almagestum*) del nombre con el que fue popularizada la obra entre los árabes, *Kitab al-majist*. *Kitab* significa *libro*, pero el significado de *al-majist* no es tan cristalino. El nombre

en griego de la obra es Μαθηματικῆς Συντάξεως βιβλία τγ, que significa *Los trece libros de las colecciones matemáticas*. Hay evidencia de que luego fue llamado, simplemente, Μεγάλη σύνταξις, o sea, *La gran colección*; el superlativo de μεγάλη εσ μεγίστη (*megiste*). Lo más probable es que los árabes hayan agregado el artículo *al*, creando así el *al-megiste* que significaría, simplemente, *El más grande*, un nombre que, quien ha profundizado en la obra, sabrá que no le es desproporcionado.

Existe una edición bilingüe griego-francés, hecha por Abbé Halma en la segunda década de 1800 a partir de algunos manuscritos presentes en París (Halma 1813/1816), pero la edición crítica moderna es la de Heiberg (1898/1903). De ella, existe una excelente traducción al alemán hecha por Manitius (1912/1913) y dos traducciones al inglés, de las cuales la segunda es infinitamente mejor: Taliaferro 1952 y Toomer 1988. Esta última es, hoy en día, la mejor traducción existente, basada en la edición de Heiberg, pero a la que le ha hecho una infinidad de pequeñas correcciones. Como obras introductorias al *Almagesto* sin duda la mejor es Pedersen 1974; también puede verse Neugebauer 1975, pero que no es sólo una introducción al *Almagesto*, sino toda una historia de la astronomía antigua. Una introducción didáctica pero seria a la astronomía antigua puede encontrarse en Evans 1998⁸.

La estructura de la obra, de 13 libros, es explicitada por el mismo Ptolomeo (I, 2; H1, 8-10; T 37-38) luego de un prefacio de contenido filosófico (I, 1; H1, 1-8; T 3,5-37). En primer lugar hay una breve discusión acerca de la Tierra: su posición en el centro del universo y su inmovilidad (I, 3-8; H1 9-30, T 37-47), luego una ya más extensa, instrumental, donde se exponen las soluciones geométricas a problemas de astronomía esférica que luego aparecerán (I, 9-II, 13, H1 31-189; T 47-130). A continuación se desarrollan los modelos del Sol y de la Luna (III a VI, H1 191-546; T 131-320) y luego la teoría de las estrellas, primero la de las fijas (VII y VIII, H2, 1-204; T 321-417) y finalmente la de los cinco planetas (IX-XIII; H2, 207-608; T 419-647). La estructura de la obra sigue un estricto orden axiomático: es mediante la posición del Sol que puede fijarse la de la Luna, y mediante la de ambos que pueden fijarse las posiciones de las estrellas. Con el mapa de estrellas, a su vez, se suele ubicar a los planetas. Afortunadamente, Ptolomeo fue muy escrupuloso en citar a sus predecesores cuando la idea no era suya, lo que permite distinguir claramente cuáles son y cuáles no sus propias contribuciones. La teoría solar, de las estrellas fijas y parte del modelo lunar son heredados por Ptolomeo de astrónomos anteriores (mayormente Hiparco) pero él logra sistematizarlos armoniosamente, integrándolos en un único sistema. En el caso de la Luna, además, propone modificaciones importantísimas a los modelos preexistentes. Pero donde más se manifiesta su originalidad es, sin duda, en la teoría planetaria. Es por eso que dedicaremos lo que resta del capítulo a presentarla de una manera sintética, dejando de lado, en la medida de lo posible, los otros modelos celestes.

Para comprender cualquier teoría científica, hay que poder distinguir entre aquello que se propone explicar (*explanandum*, en latín) y aquello que propone para explicar (*explanans*). Veremos, entonces, primero, lo que la teoría ptolemaica de los planetas se proponía explicar y luego cómo lo hacía. En lo que resta del capítulo, por lo tanto, emplearemos el siguiente orden. En una primera sección (El explanandum...) describiremos y organizaremos los fenómenos de los que la teoría quiere dar cuenta, esto es, el movimiento de los planetas. En una segunda sección (El explanans...) introduciremos el sistema de epiciclos y deferentes,

8 Para la historia del *Almagesto* en el mundo antiguo, medieval latino y árabe y moderno, véase Pedersen (1974: 14-25) y Neugebauer (1975: 836-839).

ya que será este instrumento el que utilizará Ptolomeo para explicar el movimiento planetario. En esta segunda sección nos familiarizaremos con el sistema, entendiendo su mecanismo y sus propiedades más básicas. Una vez conocido el mecanismo utilizado, en la siguiente sección (Las leyes de la Teoría), mencionaremos las principales leyes que regían la teoría planetaria de Ptolomeo. Luego, (Las constantes de cada modelo), mostraremos con el caso puntual de un planeta cómo a partir de esas leyes es posible obtener todos los valores necesarios para alcanzar el modelo propio de cada planeta. Cerraremos el capítulo con una conclusión.

IV. El explanandum: el movimiento de los planetas

Lo primero que uno nota luego de mirar varias noches seguidas el cielo nocturno es que las estrellas mantienen su distancia relativa —el mapa de estrellas no cambia— pero van rotando sobre un eje —que en el hemisferio norte coincide prácticamente con una estrella llamada *Polar*— dando una vuelta cada 23 horas y 56 minutos. Es decir, el cielo podría ser considerado como una calesita y cada estrella uno de los lugares fijos para que los niños se sienten. La distancia entre ellos nunca cambia, están fijados al piso de la calesita, pero todos giran junto a la calesita que, en este caso, tardaría casi un día en dar una vuelta. La estrella polar estaría ubicada justo en el eje de rotación de la calesita.

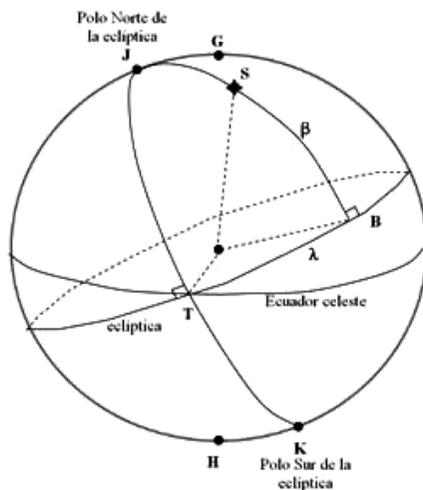


Figura 1. Latitud y longitud celeste.

El Sol acompaña a las estrellas, pero se va atrasando más o menos cuatro minutos por día (dando una vuelta, entonces, cada 24 horas). A lo largo de un año se atrasa una vuelta y vuelve a estar ubicado delante de la misma estrella. La trayectoria que va trazando el Sol con su atraso está inclinada cerca de 24 grados respecto del ecuador celeste. Esa trayectoria es llamada *eclíptica*, pues sobre esa trayectoria se producen los eclipses. Siguiendo nuestra analogía de la calesita, el Sol sería un controlador de boletos que sube a la calesita mientras está girando para controlar que todos tengan su entrada. Así, a diferencia de los asientos, él sí va cambiando su distancia relativa respecto de ellos y no siempre está ubicado en el mismo lugar de la calesita, es decir, del mapa celeste. El controlador va cambiando de posición de una manera muy metódica, en el sentido contrario al giro de la calesita y con un ritmo más o

menos estable. Y en su recorrido no siempre se mantiene a la misma distancia del borde de la calesita. Media vuelta de atraso la hace más cerca del centro de la calesita y la otra mitad más cerca del borde. Como va en el sentido opuesto al del giro de la calesita, a la larga su atraso implica haber dado menos vueltas que la calesita. Perdería una vuelta cada, más o menos, 364 vueltas de la calesita. La eclíptica sería un trazo imaginario sobre el piso de la calesita que señalara el recorrido habitual del controlador⁹.

La Luna y los cinco planetas entonces conocidos también acompañan a las estrellas atrasándose cada uno a un ritmo diferente. La Luna, por ejemplo, se atrasa una vuelta cada 27 días y un poco. Las trayectorias que trazan los planetas, esto es, sus «propias eclípticas» (aunque, por supuesto, no son llamadas así) no coinciden con la eclíptica pero no se alejan mucho de ella. En nuestra analogía, la Luna y los planetas serían niños inquietos que no se quedan fijos en un asiento mientras la calesita gira sino que van cambiando de asiento, desplazándose dentro de la calesita. Todos hacia el mismo lado, el mismo que el del Sol, es decir, en contra del movimiento de la calesita, pero con trayectorias y velocidades distintas, aunque nunca muy lejos de la que realiza el controlador.

Es posible identificar la eclíptica conociendo las estrellas por las que va pasando. Como todos los planetas siempre están más o menos cerca de la eclíptica, es posible ubicarlos mediante dos valores, el lugar que ocuparían si proyectáramos su posición sobre la eclíptica y su altura, es decir, que tan arriba o debajo de la eclíptica se encuentran. El primer valor es la *longitud celeste* (λ en la figura 1). El cero de ese valor es uno de los puntos en los que se cruza la eclíptica con el Ecuador celeste (punto T), que coincide con el equinoccio de marzo y es la posición que ocupa el Sol más o menos, el 21 de marzo. El segundo valor se llama *latitud celeste*, β en la figura. Para pensarlo desde nuestra analogía, debemos hacer lo siguiente. Tracemos una círculo a lo largo de todo el piso de la calesita, que siempre esté equidistante del centro y del borde de la calesita (ello será el Ecuador celeste). Tracemos también una línea que siga el recorrido del controlador. Esta segunda línea es la eclíptica. Como hemos dicho, el movimiento del controlador a veces está entre la primera línea que hemos trazado (el ecuador) y el centro de la calesita y otras está entre el ecuador y el borde. Las líneas se cruzarán dos veces. A uno de esos puntos (aquel en el que la eclíptica viene de afuera y la cruza para acercarse al centro de la calesita) lo llamaremos equinoccio de marzo y le colocaremos un cero. Luego dividiremos el círculo de la eclíptica en 360 marcas equidistantes y las numeraremos empezando por el cero que ya hemos colocado y siguiendo la dirección del controlador, de tal manera que en su movimiento vaya ocupando cada vez números mayores. Si lo hemos hecho bien, cuando lleguemos al 180 se volverán a cruzar, ése es el equinoccio de septiembre. Las primeras 180 marcas estarán entre el ecuador y el centro de la calesita y las segundas 180 entre el ecuador y el borde de la calesita. Ahora bien, la posición del controlador ya podemos describirla simplemente diciendo qué número está pisando en ese instante. Ese valor es la longitud celeste. Como los planetas y la Luna —los niños inquietos— siempre se desplazan más o menos cerca del controlador, podemos utilizar la traza de su recorrido, la eclíptica, para ubicarlos, aunque ella no es suficiente. Así, la posición de un niño quedará determinada por dos valores. El valor de la eclíptica que

9 Es importante aclarar que la analogía de la calesita tiene una importante limitación: supone aplastar la bóveda celeste sobre el piso de la calesita y, por lo tanto, pasar de tres a dos dimensiones. En este caso concreto, pero no es el único, al tazar el recorrido del controlador sobre el piso de la calesita, el plano de la eclíptica y el del ecuador es el mismo, cuando entre ellos hay una diferencia angular de más de 23 grados.

esté más cercano y la menor distancia que exista entre ese punto de la eclíptica y el niño. Siempre la línea que trace la menor distancia será una que apunte al centro de la calesita. El primer valor (el lugar más cercano de la eclíptica) es, nuevamente, la longitud celeste y la menor distancia entre ese punto y el niño es la latitud celeste que indica que tan alejado se encuentra de la eclíptica.

Ptolomeo, en su exposición del *Almagesto*, primero desarrolla los modelos que le permiten calcular la longitud celeste de los planetas y luego la de las latitudes. Nosotros desarrollaremos aquí sólo su teoría de las longitudes, por problemas de extensión. Esta teoría, entonces, nos permitiría ubicar cualquier planeta sobre la eclíptica, y nos faltaría poder saber qué tan arriba o debajo de ella se encuentra. Es decir, nos permite ubicar el punto *B* de la figura 1 y no el punto *S*.

Un estudio no muy profundo de los planetas muestra que es natural separarlos en dos grupos, el primero formado por Mercurio y Venus y el segundo por Marte, Júpiter y Saturno (en seguida veremos el criterio de la agrupación). Para poder describir el movimiento de los planetas sobre la eclíptica, estudiemos la tabla siguiente, en la que hemos colocado la longitud celeste de un representante de cada grupo, Mercurio y Júpiter, además de la del Sol. De cada uno de ellos hemos registrado su longitud en grados y minutos cada 15 días durante un poco menos de dos años, comenzando el día en que fue registrada la primera observación del *Almagesto*, el 5 de abril del 125. El primer grupo de columnas posee la cantidad de días, comenzando con el 0 en el 5 de abril y luego el año, mes y día. El segundo grupo posee la longitud en grados y minutos del Sol, Mercurio y Júpiter. El tercer grupo posee la elongación de Mercurio y Júpiter, es decir, la diferencia angular entre la longitud solar y la del planeta. El último grupo posee la cantidad de grados (expresado ahora en sistema decimal) que han recorrido entre esa fecha y la anterior los tres cuerpos. Como el tiempo es siempre el mismo (15 días), expresa la velocidad media del planeta durante esos 15 días. Estos registros de longitud señalan el atraso que tienen los planetas respecto de las estrellas fijas y es esto lo que la teoría quiere explicar: su movimiento aparente en el fondo de estrellas, dejando de lado el movimiento de acompañamiento a las estrellas que poseen todos los planetas. En nuestra analogía, lo que la teoría se propone explicar es el movimiento del controlador y los niños inquietos dentro de la calesita, es decir, respecto del piso de la calesita, dejando de lado que la calesita también está girando.

días	Fecha			Longitud						Elongación				Velocidad		
	año	mes	día	Sol		Mercurio		Júpiter		Mercurio		Júpiter		Sol	Merc	Júp
				°	'	°	'	°	'	°	'	°	'			
0	125	4	5	13	12	352	1	355	58	22	49	342	46			
15	125	4	20	27	33	18	20	359	26	9	13	331	53	14.4	26.3	3.47
30	125	5	5	41	50	46	45	2	45	4	55	39	5	14.3	28.4	3.32
45	125	5	20	56	3	74	19	5	48	18	16	50	15	14.2	27.6	3.05
60	125	6	4	70	15	96	51	8	32	26	36	61	43	14.2	22.5	2.73
75	125	6	19	84	28	103	50	10	51	19	22	73	37	14.2	6.98	2.32
90	125	7	4	98	43	90	55	12	36	7	48	86	7	14.3	-13	1.75
105	125	7	19	113	3	95	8	13	47	17	55	99	16	14.3	4.22	1.18
120	125	8	3	127	29	115	44	14	13	11	45	113	16	14.4	20.6	0.43
135	125	8	18	142	4	141	22	13	54	0	42	128	10	14.6	25.6	-0.3
150	125	9	2	156	46	167	28	12	53	10	42	143	53	14.7	26.1	-1
165	125	9	17	171	38	191	1	11	16	19	23	160	22	14.9	23.6	-1.6
180	125	10	2	186	42	207	13	9	20	20	31	177	22	15.1	16.2	-1.9
195	125	10	17	201	52	207	48	7	22	5	56	194	30	15.2	0.58	-2
210	125	11	1	217	11	201	34	5	43	15	37	211	28	15.3	-6.2	-1.7
225	125	11	16	232	32	211	26	4	39	21	6	227	53	15.4	9.87	-1.1
240	125	12	1	247	58	233	7	4	19	14	51	243	39	15.4	21.7	-0.3
255	125	12	16	263	23	259	27	4	42	3	56	258	41	15.4	26.3	0.38
270	125	12	31	278	45	286	45	5	48	8	0	272	57	15.4	27.3	1.1
285	126	1	15	294	0	311	19	7	32	17	19	286	28	15.3	24.6	1.73
300	126	1	30	309	8	325	20	9	48	16	12	299	20	15.1	14	2.27
315	126	2	14	324	7	316	33	12	28	7	34	311	39	15	-8.8	2.67
330	126	3	1	338	57	312	23	15	29	26	34	323	28	14.8	-4.2	3.02
345	126	3	16	353	36	329	40	18	45	23	56	334	51	14.7	17.3	3.27
360	126	3	31	8	8	355	27	22	10	13	19	14	2	14.5	25.8	3.42
375	126	4	15	22	33	23	45	25	42	1	12	3	9	14.4	28.3	3.53
390	126	4	30	36	52	51	36	29	16	14	44	7	36	14.3	27.9	3.57
405	126	5	15	51	5	75	33	32	46	24	28	18	19	14.2	24	3.5
420	126	5	30	65	18	86	42	36	9	21	24	29	9	14.2	11.2	3.38
435	126	6	14	79	30	75	4	39	21	4	26	40	9	14.2	-12	3.2
450	126	6	29	93	43	74	42	42	17	19	1	51	26	14.2	-0.4	2.93
465	126	7	14	108	2	93	50	44	52	14	12	63	10	14.3	19.1	2.58
480	126	7	29	122	25	119	31	47	1	2	54	75	24	14.4	25.7	2.15
495	126	8	13	136	57	146	19	48	37	9	22	88	20	14.5	26.8	1.6
510	126	8	28	151	37	170	56	49	33	19	19	102	4	14.7	24.6	0.93
525	126	9	12	166	25	189	1	49	46	22	36	116	39	14.8	18.1	0.22
540	126	9	27	181	24	192	41	49	17	11	17	132	7	15	3.67	-0.5
555	126	10	12	196	32	185	44	48	6	10	48	148	26	15.1	-7	-1.2
570	126	10	27	211	47	192	43	46	25	19	4	165	22	15.3	6.98	-1.7
585	126	11	11	227	10	212	31	44	26	14	39	182	44	15.4	19.8	-2
600	126	11	26	242	35	237	48	42	33	4	47	200	2	15.4	25.3	-1.9
615	126	12	11	258	1	264	38	41	4	6	37	216	57	15.4	26.8	-1.5
630	126	12	26	273	22	289	38	40	10	16	16	233	12	15.4	25	-0.9

Para familiarizarnos con la tabla, comencemos a reflexionar sobre algunos valores. Si seguimos la longitud del Sol a lo largo de los días, veremos que aumenta a una velocidad constante de más o menos 15 grados por día. Lo podemos ver directamente en la columna correspondiente a la velocidad del Sol. Su promedio es cercano a los 15 grados, siendo un poco menor desde marzo hasta septiembre y un poco mayor desde septiembre hasta febrero. Nótese que estos cambios de velocidad coinciden con los períodos en los que el Sol se encuentra por encima y por debajo del ecuador celeste. En nuestra analogía implicaría que el controlador va un poco más despacio cuando se encuentra más cerca del centro de la calesita y un poco más rápido cuando se encuentra cerca del borde¹. Ello nos señala que la velocidad del Sol no es constante, pero no desarrollaremos aquí el modelo solar. Los cambios de longitud de los planetas, en cambio, son mucho más irregulares. Por lo general es ascendente, pero en algunos momentos retrocede. Es decir, los niños inquietos generalmente van en contra del movimiento de la calesita, pero a veces se frenan y se dirigen por un tiempo a favor del movimiento de la calesita. Veamos de cerca lo que sucede con Mercurio. Comienza con una velocidad de 26.3 grados cada 15 días, aumenta un poco su velocidad el 5 de mayo del 125 pero luego empieza a descender hasta llegar a ser negativa el 4 de julio de ese año, lo cual quiere decir que se dirige hacia el otro lado, que el planeta está retrocediendo. Y es efectivamente lo que ha sucedido, como se ve claramente si seguimos sus movimientos en longitud. El 4 de junio estaba a 96;51² grados, en quince días avanzó hasta 103;50, pero quince días después, el cuatro de julio, retrocedió hasta la longitud 90;55, para luego comenzar a avanzar nuevamente. Este movimiento, en el que los planetas invierten su dirección habitual de oeste a este sobre el fondo de estrellas fijas, se llama movimiento de *retrogradación*. Podría conjeturarse que estos movimientos de retrogradación se producen de manera más o menos periódica. Buscando las velocidades negativas pueden contarse la cantidad de veces que Mercurio ha retrogradado en ese período de tiempo: 5 veces. Entre la primera (día 90) y la segunda (día 210) han pasado 120 días; entre la segunda y la tercera (315) han pasado 105 días; entre la tercera y la cuarta (día 435) han pasado, nuevamente 120 días; y entre ésta y la quinta (día 555) han pasado también 120 días. Podemos suponer, por lo tanto, que Mercurio retrograda cada, aproximadamente, 120 días, probablemente un poco menos. Podemos también calcular cuánto tarda en dar una vuelta sobre la eclíptica. Vemos que entre el día 0 y el 15 ha pasado por el equinoccio de marzo, es decir, por la longitud 0, ya que en el día 0 estaba en 352;1 y en el 15 en el 18;20. La próxima vez que pasa por el equinoccio está entre el día 360 (con una longitud de 355;27) y el 375 (con una longitud de 23;45). Vemos también que el día 0 y el día 360 han tenido prácticamente la misma longitud (352;1 y 355;27), por lo que podríamos suponer que Mercurio tarda en dar una vuelta más o menos 360 días, es decir, prácticamente un año. Ello querría decir que Mercurio tarda lo mismo que el Sol en dar una vuelta, que tienen la misma velocidad media. Y ello lo podemos testear analizando la elongación de Mercurio, ya que justamente muestra la diferencia angular de éste con el Sol y una rápida mirada nos muestra que Mercurio nunca tiene

1 Esta diferencia de velocidad no tiene nada que ver con el aumento o disminución de velocidad tangencial por estar más cerca o más lejos del centro de giro, recuérdese que estamos midiendo velocidades angulares.

2 Utilizaremos la notación habitual en los textos de historia de la astronomía, popularizado por Neugebauer ([1957] 1969: 13, nota 1). Para más detalles, consultar el capítulo 1 de Neugebauer ([1957] 1969) o Newton (1977: 17-20). El punto y coma separa el número entero de las fracciones y cada coma separa una fracción sexagesimal. Así, la hora según este sistema se expresaría como 4; 2, 25, significando 4 horas, 2 minutos y 25 segundos.

una elongación mayor a 26;36 grados, es decir, siempre se encuentra más o menos cerca del Sol, a veces lo pasa y otras veces se deja pasar por él, pero siempre está cerca. Podemos, por lo tanto, concluir que el período de revolución del Sol y de Mercurio es el mismo. Si analizáramos los datos de Venus, veríamos que tiene propiedades similares a las de Mercurio: una elongación limitada y, por lo tanto, un período de revolución igual al del Sol. En nuestra analogía, la elongación mide la distancia angular entre cada niño y el controlador. Lo que vemos en Mercurio y Venus es que son niños que nunca se alejan mucho del controlador, parece que corren un poco más de prisa hasta que lo pasan, empiezan a frenar y van en la dirección contraria, lo vuelven a pasar pero para el otro lado y luego retoman el recorrido, como si corrieran girando alrededor del controlador.

Analicemos, ahora, lo que sucede con Júpiter. Lo primero que salta a la vista es que su velocidad en longitud es mucho menor, nunca superando un poco más que los tres grados cada 15 días. Su velocidad, al igual que en el caso de Mercurio, es irregular y también presenta retrogradaciones. La primera sucede entre el día 135 y el día 240, siendo el momento medio el día 187 (que no figura en la tabla). La segunda retrogradación se produce justo al final de la tabla por lo que no podemos calcular exactamente cuándo es su punto medio. De todas maneras, podemos suponer que se da entre el 585 y el 600, supongamos el 592. Así, el tiempo entre dos retrogradaciones es de (592-187) 405 días. Mucho más difícil es calcular cuál es su período de revolución, pues en los casi dos años registrados en la tabla apenas ha avanzado 45 grados. Veamos cuánto avanza entre el principio de una retrogradación y el de la otra. El día 135 se encuentra en 13;54 y el día 525 en 49;46, o sea que en 390 días avanzó 35;52 grados. Avanzará, por lo tanto, 360 grados —dando una vuelta— en $(360 \cdot 390 / 35;52)$ 3.915 días aproximadamente, es decir, en casi 11 años, pero este cálculo es muy impreciso porque tenemos los datos de una pequeña fracción. Si miramos lo que sucede respecto de su posición con el Sol, veremos que, a diferencia de Mercurio (y Venus), se lo puede encontrar a cualquier elongación. Era de esperar, sabiendo que tiene una velocidad diferente a la del Sol. Pero si miramos con un poco de atención, veremos otro dato curioso: las dos veces que retrograda, lo hace cuando tiene una elongación cercana a 180, es decir, cuando se encuentra en oposición al Sol. Si tuviéramos más datos, confirmarían que ello sucede siempre. Marte y Saturno tienen características similares: ambos tienen un período de revolución distinto (y mayor) a la del Sol y sus retrogradaciones se producen cuando están en oposición al Sol. En nuestra analogía, implicaría que estos niños se mueven por la calesita a una velocidad mucho menor que la del controlador y que cambian de dirección justo cuando están del otro lado de la calesita, esto es, cuando el eje de la calesita les tapa al controlador. Resumiendo: hay dos grupos de planetas, los primeros —que llamaremos interiores— siempre se encuentran en cercanías del Sol, tienen una elongación limitada y un período de revolución medio igual al del Sol; los segundos —que llamaremos superiores— pueden encontrarse en cualquier elongación, tienen un período mayor al del Sol y retrogradan sólo cuando y siempre que se encuentran en oposición al Sol (cfr. H2-207, T 419-420)³. Existe una última regularidad que no es posible obtener a partir de tan pocos datos: en los planetas superiores la cantidad de retrogradaciones más la cantidad de revoluciones siempre es igual a la cantidad de años que han pasado (la cantidad de revoluciones del Sol). Es decir, si, como en el caso de Júpiter, el planeta tarda 11 años en dar una vuelta sobre la eclíptica, en ese período tendrá que haber tenido 10 retrogradaciones.

3 Está claro que Ptolomeo no los llamaba así, los llamaba «planetas que alcanzan cualquier distancia respecto del Sol —para los exteriores— y «planetas que se mueven siempre cerca de él» —para los interiores— (IX, 1; H207; T 419-420).

Podemos ver que, incluso con nuestros valores imprecisos, más o menos, se aplica. En efecto, si, como hemos calculado, tarda 405 días en retrogradar, en 3.915 días —casi 11 años, lo que tarda en dar una vuelta en longitud—, retrogradará 9.6 veces —casi 10—. En nuestra analogía implicaría esta curiosa propiedad: si contamos las veces que un niño «exterior» ha cambiado su dirección y le sumamos las vueltas que se ha atrasado durante ese período, coincidirá con las vueltas que ha dado, también en ese período, el controlador. Finalmente, también se sabía que, en el momento en que retrogradaban, los cinco planetas aumentaban considerablemente su brillo. Esto es lo que la teoría debe explicar.

V. El explanans: el modelo de epiciclos y deferentes

V.a. Contexto histórico

Toda la astronomía griega antigua, medieval y moderna (prácticamente hasta Kepler) puede entenderse como un intento de respuesta a la famosa pregunta de Platón: «¿Qué movimientos circulares y uniformes es necesario suponer para explicar los movimientos aparentes de los planetas?» (Simplicio, *Del cielo*, 498 a). En efecto, puesto que el cambio en general (y el movimiento como un caso particular) era concebido con un signo de imperfección, y puesto también que los astros, por su naturaleza divina, eran perfectos, éstos no podían tener ningún tipo de cambio. El único cambio tolerable sería un cambio local (movimiento) pero absolutamente circular y uniforme, pues, de alguna manera, es como un cambio que no cambia: es un cambio de lugar, pero que vuelve siempre al mismo lugar. Así, las irregularidades que observamos en el movimiento de los planetas —las retrogradaciones, los cambios de velocidad, etcétera— no pueden sino ser apariencias. Ellas tienen que poder ser reducidas a movimientos circulares y uniformes. En la antigüedad hubo dos propuestas diferentes para responder a la pregunta de Platón: la de Eudoxo, discípulo de Platón, en la que se inspiraría Aristóteles, y la de Apolonio de Perga, en la que se inspiraría Hiparco y Ptolomeo llevaría a su plenitud⁴.

No tenemos espacio aquí para desarrollar la propuesta de Eudoxo, baste con decir que en ella el movimiento de cada planeta surge como resultado de la combinación de la rotación de varias esferas que poseen el mismo centro pero ejes de rotación distintos y apoyados sobre la esfera exterior. Una de las grandes dificultades que tuvo esta propuesta es que no podía dar cuenta de los cambios de brillo de los planetas ya que éstos eran naturalmente interpretados como un cambio en la distancia con la Tierra (brillan más cuando están más cerca) y, en la propuesta de Eudoxo, los planetas siempre se mantenían a la misma distancia de la Tierra.

Apolonio, en cambio, propuso un sistema en el cual unas órbitas se montaban sobre otras⁵. La primera órbita, centrada en la Tierra, sería luego llamada *deferente*. La siguiente órbita, llamada ya desde la antigüedad *epiciclo*, gira haciendo centro sobre el punto que gira en la órbita anterior. Ambas órbitas son circulares y sus velocidades son constantes, pero la combinación de sus movimientos puede producir trayectorias (aparentemente) muy irregulares. En particular, puede producir el movimiento de retrogradación que necesitábamos. Es como si, en un baile, un bailarín girara con una velocidad constante sobre un centro y otro

4 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno «Astronomía y Física en Platón» (*comps.*).

5 Entenderemos por 'órbita' las entidades teóricas circulares propuestas por la teoría para dar cuenta del recorrido que hacen los planetas en el cielo. Al recorrido lo llamaremos, en cambio, trayectoria. Así, Ptolomeo introduce 'órbitas' para dar cuenta de las 'trayectorias'.

girara sobre el que está girando, el movimiento que describirá el segundo bailarín, visto desde el centro de la pista, será el de unos bucles, como muestra la figura 2 aunque, *en realidad*, se trata de dos movimientos perfectamente circulares y uniformes, uno centrado en el medio de la pista y el otro centrado en un bailarín.

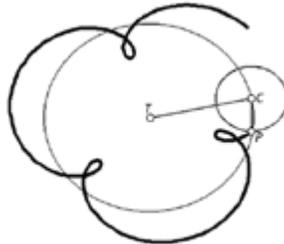


Figura 2. Trayectoria resultante del movimiento de un epiciclo y un deferente.
T= Tierra; C= Centro del epiciclo; P = Planeta.

Nótese cómo en la figura 2, la combinación de los movimientos produce ciertos bucles que, vistos desde el punto T, donde está situado el observador, aparentan ser retrogradaciones. Las trayectorias resultantes dependen del radio del deferente (línea TC, en adelante R), del radio del epiciclo (línea CR, en adelante r) y de las velocidades angulares del deferente (en adelante ω_{def}) y del epiciclo (en adelante ω_{epi}). Pero en realidad, se supone que Apolonio sólo llegó a proponerlo como explicación cualitativa de las retrogradaciones, sin haber desarrollado la geometría suficiente para obtener valores significativos. Hiparco parece haber avanzado en esta dirección para el modelo del Sol y un modelo Lunar que luego Ptolomeo modificará. Pero sin duda la aplicación cuantitativa de este sistema a los planetas se debe a Ptolomeo.

V.b. El sistema de epiciclos y deferentes (versión simple)

Familiaricémonos un poco más con el sistema de epiciclos y deferentes analizando la figura 3.

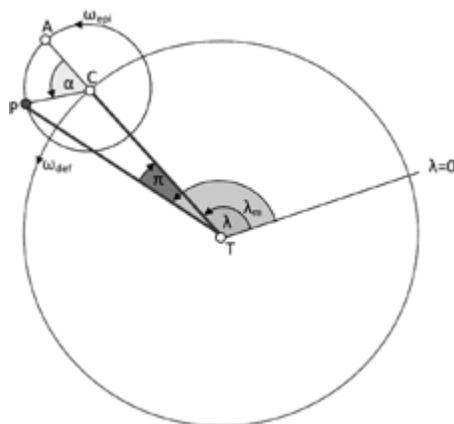


Figura 3. El Sistema de Deferente y Epiciclos, versión simple. T = Tierra; C = Centro del epiciclo; P = Planeta; A = Apogeo de la anomalía; λ = Longitud; λ_m = Longitud media; π = Prostaphairesis de la longitud; A = Anomalía; ω_{def} = velocidad (angular) del deferente; ω_{epi} = velocidad (angular) del epiciclo.

El punto C es el que gira sobre el deferente con una velocidad constante, ω_{def} y es, a la vez, el centro del epiciclo. Es, en el ejemplo que manejábamos recién, el bailarín que gira sobre el centro de la pista. El ángulo λ_m (*longitud media*) mide la posición de ese punto, C, desde algún punto que, arbitrariamente, se elija como o, de una forma similar a cómo medíamos la posición del controlador en la calesita. Conociendo una posición inicial y ω_{def} es sumamente sencillo calcular λ_m . Pero la *longitud verdadera* del planeta (o sea, del segundo bailarín) —que es lo que, en definitiva, queremos conocer— no es representada por λ_m sino por λ , la longitud (a secas). Puesto que el segundo bailarín gira alrededor del primero, siempre estará más o menos cerca (dependiendo de qué tan grande sea el círculo que trace a su alrededor), por lo que el valor de la longitud media nos dará un valor aproximado de dónde se encuentra. Pero sólo aproximado. Así, la longitud media puede ser vista o bien como la posición exacta del primer bailarín, o bien como una posición aproximada del segundo. La diferencia entre ambas posiciones es el ángulo ϖ , llamado *prostaphairesis de la longitud* (*prostaphairesis* en griego significa cantidad que debe ser añadida o substraída y, como veremos, este ángulo es, justamente el que debe ser sumado o restado a la longitud media para obtener la longitud. El ángulo ϖ depende, como puede verse, de la posición que efectivamente tenga el planeta sobre el epiciclo. Así, el ángulo ϖ funciona como un correctivo que señala la diferencia de posición entre los dos bailarines, vistos desde T, el centro del deferente. Evidentemente, el valor de ϖ dependerá de la posición que tenga el segundo bailarín en su giro alrededor del primero. Por ejemplo, si estuviera justo detrás o justo delante, tapando al primer bailarín o siendo tapado por él para alguien que mira desde T, el ángulo ϖ será o pues, en ese instante, las longitudes de ambos bailarines es la misma, están alineados con el centro de la pista. La posición del planeta —o del segundo bailarín— sobre el epiciclo es medida por el ángulo α (que llamaremos *anomalía*) que, centrado en C, mide la distancia angular entre el punto A y el punto P, es decir, el planeta. El punto A se llama *apogeo del epiciclo* o *apogeo de la anomalía* y es el punto más alejado del centro de la pista que puede alcanzar el segundo bailarín, o sea, el punto más alejado que puede alcanzar el planeta respecto de la Tierra. La línea que une a la Tierra con el apogeo pasa, siempre, por el centro del epiciclo. Cuando el planeta se encuentra en ese punto, tiene una anomalía 0° , de la misma manera que cuando pasaba por el equinoccio de marzo tenía una longitud 0° . El ángulo α mide, como decíamos la posición de P sobre el epiciclo y, por lo tanto, el punto P gira sobre C con una velocidad constante de ω_{epi} . Nuevamente, conociendo una posición inicial y ω_{epi} , es sumamente sencillo calcular α .

Por ahora, podríamos afirmar que

Ecuación 1:

$$\lambda(t) = \lambda_m(t) \pm \varpi$$

$$\lambda(t) = \lambda_m(t) + \varpi$$

cuando $0 < \alpha < 180$ y $\lambda(t) = \lambda_m(t) - \varpi$ cuando $180 < \alpha < 360$

Que el ángulo ϖ se sume o se reste a la longitud media depende de que el segundo bailarín, en su recorrido alrededor del primero, esté delante o detrás de él, en el sentido de que tenga una mayor o menor longitud. Evidentemente, cuando la anomalía es 0° ó 180° , $\varpi = 0$ y la longitud verdadera y media coinciden.

El único problema es cómo obtener ϖ . No es difícil darse cuenta que ϖ depende de α , pero también de R y de r . Es decir, depende de la posición del segundo bailarín en su giro sobre el primero (α), del tamaño del círculo que traza el segundo bailarín sobre el primero

(r) y del tamaño del círculo que traza el primer bailarín sobre el centro de la pista (R). Un poco de paciencia geométrica nos permitiría obtener la siguiente fórmula:

Ecuación 2:

$$\pi(\alpha) = \tan^{-1} \left(\frac{r \cdot \sin \alpha}{r \cdot \cos \alpha + R} \right)$$

La ecuación no debe asustarnos, lo único importante es notar que, efectivamente, el ángulo ϖ está en función de α , que varía con el tiempo y de r y R que son constantes para cada planeta. Y, así, el valor de la longitud verdadera sería:

Ecuación 3:

$$\lambda(t) = \lambda_m(t) \pm \tan^{-1} \left(\frac{r \cdot \sin \alpha(t)}{r \cdot \cos \alpha(t) + R} \right)$$

Nótese que el sistema nos permite obtener la longitud verdadera del planeta (que es nuestro *explanandum*), a partir de R , r , α y λ_m . A su vez, α y λ_m se obtienen conociendo ω_{def} , ω_{epi} y unas posiciones iniciales. Es importante retener que la longitud media nos da un valor aproximado y el ángulo ϖ corrige ese valor.

V.c. El sistema de epiciclos y deferentes (versión compleja)

Pero ésta es la propuesta más sencilla. Por ciertas dificultades que aquí no es necesario desarrollar, Ptolomeo tuvo que introducir dos elementos más que complicarían el sistema.

Ecuantes y excéntricas

En primer lugar, para obtener valores precisos Ptolomeo introdujo puntos excéntricos, es decir, tuvo que hacer que el centro del deferente no fuera la Tierra, sino un punto más o menos cercano a ella, llamado *excéntrica*. Ese punto es distinto para cada planeta. En la figura 4 es el punto D, que se encuentra a una distancia e de la Tierra. La línea que une a la Tierra con el centro del deferente se llama *línea absidal*. La longitud de esta línea es llamada *longitud del apogeo* (λ_a) porque, en efecto, cuando el centro del epiciclo pasa por esa línea, se encuentra lo más alejado posible de la Tierra. Hay, entonces, dos apogeos; el apogeo de la anomalía (A_m) que es la posición más alejada de la Tierra que puede alcanzar el planeta girando sobre el epiciclo, y el *apogeo a secas* (A), que es la posición más alejada que puede alcanzar el centro del epiciclo respecto de la Tierra. Cuando ambos coinciden, es decir, cuando en un mismo instante el centro del epiciclo está en la línea absidal y el planeta en su apogeo de anomalía, el planeta está lo más lejos posible de la Tierra. La longitud del apogeo, según Ptolomeo, va variando a razón de un grado cada cien años para todos los planetas.

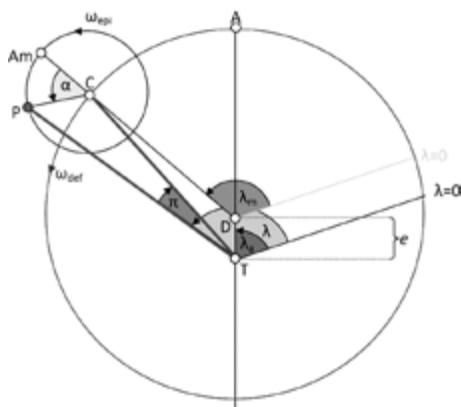


Figura 4. El Sistema de Deferente y Epiciclos con excéntrica. T = Tierra; C = Centro del epiciclo; P = Planeta; D = Punto excéntrico; A = Apogeo; Am = Apogeo de la anomalía; λ = Longitud; λ_m = Longitud media; λ_a = Longitud del apogeo; ϖ = Prostaphairesis de la longitud; α = Anomalía; ω_{def} = velocidad (angular) del deferente; ω_{epi} = velocidad (angular) del epiciclo.

En segundo lugar, Ptolomeo introdujo la *ecuate* —elemento que tanto rechazo produjo siglos después en Copérnico—. Hasta este momento, las velocidades angulares del deferente las medíamos desde el centro del deferente. Ptolomeo advierte, sin embargo, que medidas desde su centro, no hay forma de lograr que las velocidades sean constantes, mientras que si se miden desde otro punto, interior al deferente pero no exactamente su centro, sí puede lograrse la uniformidad⁶. Así, la *ecuate* es el punto desde el cual la velocidad del deferente será constante y, por lo tanto, el punto desde el cual se medirá la velocidad del deferente, para lograr que sea uniforme. En general, aunque Ptolomeo no explica por qué, el punto *ecuate* está ubicado sobre la línea absidal y al doble de la distancia de la Tierra de la que se encuentra el centro del deferente, haciendo, entonces, que el centro del deferente esté justo en el medio de la Tierra y el punto *ecuate*. En la figura 5 es el punto E, ubicado sobre la línea absidal. Desde él se mide la longitud media. En un modelo como éste, con excéntrica y *ecuate*, ya la ecuación para obtener la longitud no es tan sencilla. Haremos, sin embargo, un esfuerzo para seguir al menos cualitativamente la relación que hay entre los distintos ángulos.

6 Una clara explicación de la necesidad de introducir la *ecuate* para compensar los desajustes que produce el punto excéntrico en la amplitud de las retrogradaciones puede verse en Evans 1998: 357-359.

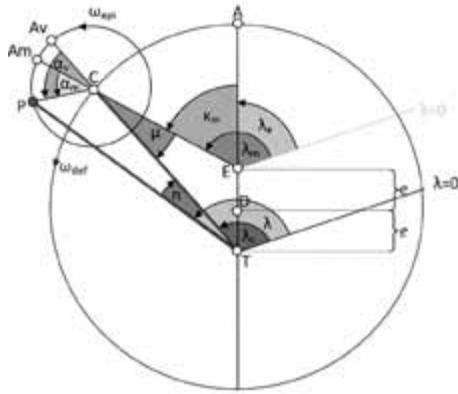


Figura 5. El Sistema de Deferente y Epiciclos con excéntrica y ecuante. T = Tierra; C = Centro del epiciclo; P = Planeta; D = Punto excéntrica; E = Punto ecuante; A = Apogeo; Am = Apogeo medio de la anomalía; Av = Apogeo verdadero de la anomalía; λ = Longitud; λ_m = Longitud media; λ_a = Longitud del apogeo; λ_c = Longitud del centro; κ_m = centro medio; ϖ = Prostaphairesis de la longitud; μ = Prostaphairesis de la anomalía; α_m = Anomalía media; α_v = Anomalía verdadera; ω_{def} = velocidad (angular) del deferente; ω_{epi} = velocidad (angular) del epiciclo.

Los ángulos para ubicar el centro del epiciclo

El centro medio (κ_m), la longitud del apogeo (λ_a) y la longitud del centro (λ_c).

Como ya la velocidad del centro del deferente no se mide desde la Tierra (T), sino desde la ecuante (E), tenemos más ángulos que considerar. La longitud media (λ_m) será medida desde E y, como se ve en la figura 5, la longitud media es igual a la suma del ángulo κ_m y el ángulo λ_a , que es la longitud del apogeo. El primero, llamado centro medio (κ_m), es simplemente la diferencia entre ese ángulo (λ_a) y la longitud media (λ_m) y permite ubicar el centro del epiciclo, con centro en la ecuante, no desde el equinoccio de marzo, sino desde su apogeo.

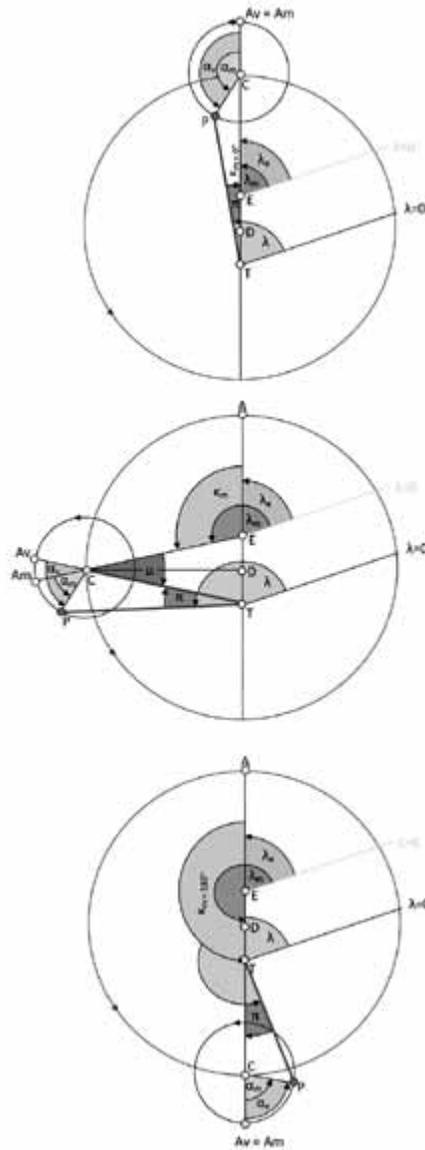


Figura 6. Las tres posiciones de mayor influencia de κ_m sobre ϖ . T = Tierra; C = Centro del epiciclo; P = Planeta; D = Punto excéntrico; E = Punto ecuante; A = Apogeo; Am = Apogeo medio de la anomalía; Av = Apogeo verdadero de la anomalía; λ = Longitud; λ_m = Longitud media; λ_a = Longitud del apogeo; κ_m = centro medio; ϖ = Prosthaphairesis de la longitud; μ = Prosthaphairesis de la anomalía; α_m = Anomalía media; α_v = Anomalía verdadera.

Esto traerá ventajas porque, como veremos más adelante, ciertos comportamientos dependen directamente de la posición del centro del epiciclo respecto de su línea absidal y no de su equinoccio de marzo. La variación de c_m es prácticamente constante. Lo sería —como lo es la longitud media— si la longitud del apogeo fuera invariable, pero recordemos que

avanza un grado cada 100 años. Repasando, entonces, tenemos tres ángulos centrados en E a considerar: la longitud media (λ_m), la longitud del apogeo (λ_a) y el centro medio (κ_m). La suma de los dos últimos da como resultado la primera.

A lo que en el modelo anterior era la longitud media, es decir, a la distancia angular entre el equinoccio de marzo y el centro del epiciclo medida desde la Tierra, la llamaremos ahora longitud del centro (λ_c). Este ángulo ya no varía de manera uniforme —es por ello que Ptolomeo ha debido introducir la ecuante— pero es fácil observar que es igual a la suma de λ_m y el ángulo μ .

El ángulo μ : de la longitud media a la longitud del centro.

El ángulo μ es propio de este modelo y surge, justamente, porque la longitud media ya no es medida desde la Tierra, es decir, porque T y E están separados. De hecho, es correcto decir que el ángulo μ mide la distancia TE vista desde el centro del epiciclo, el punto C. Este ángulo es conocido como la *prostaphairesis de la anomalía*, puesto que es la cantidad que debe ser añadida o sustraída a la anomalía. Tratemos de desentrañar de qué valores depende el ángulo μ . Sin duda depende, fundamentalmente del centro medio (κ_m). Por ejemplo, si el centro medio es 0° , es decir, si el centro del epiciclo, C, está ubicado en su apogeo sobre la línea absidal, el ángulo μ valdrá 0° . De allí irá creciendo alcanzando su máximo cuando C esté a la altura de D, es decir, en el punto medio entre E y T y luego empezará a decrecer de nuevo hasta llegar a 0° cuando el centro medio sea 180° (puede verse la figura 6 donde se reproducen esas tres posiciones). El centro medio es la única variable que determina el valor del ángulo μ , luego hay otros dos valores que son constantes para cada sistema. Por un lado, la distancia TE, evidentemente, que vale $2e$ (recuérdese que e es la distancia TD y que E se encuentra al doble de distancia que D respecto de T). Está claro que, cuanto mayor sea TE, mayor será el ángulo μ . Por otro lado, también depende del valor de R. En este caso, cuanto mayor sea R, menor será el ángulo μ , porque más alejado estará el centro del ángulo, el punto C.

Si quisiéramos ser un poco más precisos, tendríamos que decir que el ángulo μ , si bien depende de R, en realidad depende directamente de la distancia TC e indirectamente de R. En efecto, es TC el que nos marca la distancia entre la Tierra y el centro del epiciclo. En el modelo anterior, el lado TC era constante y coincidía con el radio del deferente, R, ya que el deferente estaba centrado en la Tierra. Pero aquí no: el punto C va acercándose y alejándose de la Tierra. Ya sabemos que el apogeo del planeta es, por definición, la posición en la que el centro del epiciclo está más alejado de la Tierra. El perigeo, por su parte, es la posición en la que está más cercano y casi siempre coincide con la posición que ocupa el centro del epiciclo cuando se encuentra sobre la línea absidal, pero del otro lado⁷. Así, TC alcanzará su máxima posición cuando κ_m valga 0° y su mínima cuando κ_m valga 180° . Claramente, el valor de TC depende del valor de κ_m . Una vez más, vemos la utilidad de introducir el centro medio y no manejarse sólo con la longitud media. Evidentemente, TC también dependerá de la distancia TD, es decir, de e y del radio del deferente, R. Así, el valor de TC en el apogeo será igual a la suma de e y R, es decir de TD + DA, y el valor en el perigeo de $R - e$, es decir, de TD - DA. La ecuación que expresa estas dependencias de RC respecto de κ_m , R y e es la ecuación 4.

Ecuación 4:

$$TC(\kappa_m) = \sqrt{\left[\sqrt{R^2 - (e \cdot \text{sen } \kappa_m)^2} + e \cdot \text{cos } \kappa_m\right]^2} + (2e \cdot \text{sen } \kappa_m)^2$$

⁷ Esto sucede en todos los modelos planetarios, excepto en Mercurio.

Como ejercicio podría resolverse para los casos en los que c_m vale 0 (apogeo) y 180 (perigeo) y corroborar si da los valores que debería dar: $R + e$ para el primer caso y $R - e$ para el segundo.

Ahora que hemos analizado TC, podemos expresar la ecuación del ángulo μ , en la que se ve que depende, como hemos dicho, de la distancia TE ($2e$), de la distancia TC y de κ_m :

Ecuación 5:

$$\text{sen } \mu(\kappa_m) = -\frac{2e \cdot \text{sen } \kappa_m}{TC(\kappa_m)}$$

Así como el ángulo ϖ funcionaba de corrector llevándonos de la longitud media a la longitud verdadera en el modelo anterior, en éste el ángulo μ funciona de corrector llevándonos de la longitud media (medida desde la ecuante) a la longitud del centro (medida desde la Tierra). Es decir, conociendo el valor de la longitud media y calculando μ , podemos conocer cuál es la longitud que tiene el centro del epiciclo medida desde la Tierra. Insistimos, todos estos cálculos son necesarios porque hemos introducido la ecuante y el punto excéntrico, es decir, porque ya la Tierra no cumple la triple función de ser el punto del observador, el centro del deferente y el lugar desde el que las velocidades son constantes.

Los ángulos para ubicar el planeta dentro del epiciclo:

La anomalía media (α_m), y la anomalía verdadera (α_v).

Pero estos cambios introducidos también tienen consecuencias en cómo debe medirse el movimiento del planeta sobre su epiciclo. En primer lugar, al introducir la ecuante también se nos modifica el punto desde el cual medimos la anomalía. Así como recién tuvimos que distinguir entre la longitud media y la longitud del centro, ahora deberemos distinguir dos anomalías, la anomalía media (α_m) y la verdadera (α_v). La anomalía media medirá el movimiento del planeta sobre el epiciclo, pero desde el punto más lejano a la ecuante E, llamado justamente por eso, apogeo medio del epiciclo (A_m). La variación de este ángulo es constante y está regida por la velocidad del epiciclo (ω_{epi}). La anomalía verdadera, por su parte, medirá lo mismo pero desde el punto más lejano a la Tierra, llamado apogeo verdadero del epiciclo (A_v). Es fácil ver que la anomalía verdadera es igual a la suma de la anomalía media y el ángulo μ .

Ecuación 6:

$$\alpha_v = \alpha_m(t) + \mu(\kappa_m)$$

Puede ser útil notar que la relación que hay entre la anomalía media y la verdadera es la que hay entre la longitud media y la longitud del centro, respectivamente, y que la función que cumple el ángulo p en las longitudes la cumple el ángulo q para las anomalías. El ángulo q corrige la anomalía media para llevarla a la verdadera o, dicho de otra manera, permite trasladar el punto del observador desde la ecuante a la Tierra. En el sistema anterior, en el que la Tierra es al mismo tiempo el punto del observador, el centro del deferente y de la ecuante, las anomalías media y verdadera se identifican, pero aquí ello sólo sucede en puntos privilegiados. En efecto, es fácil notar que, exactamente de la misma manera que sucedía con la longitud media y la longitud del centro, la anomalía verdadera y media coinciden cuando el centro del epiciclo se encuentra sobre su apogeo o perigeo, esto es, sobre la línea absidal.

El ángulo ϖ : de la longitud del centro a la longitud del planeta.

Lo último que hay que tener en cuenta es que la fórmula del ángulo ϖ no es la misma que en el modelo anterior porque en éste el lado TC varía. En este caso su fórmula, bastante más complicada, es la siguiente:

Ecuación 7:

$$\pi(\alpha_v, \kappa_m) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{r \cdot \text{sen } \alpha_v}{\sqrt{(TC(\kappa_m) + r \cdot \text{cos } \alpha_v)^2 + (r \cdot \text{sen } \alpha_v)^2}} \right)$$

Es importante notar que el valor del ángulo ϖ depende, por un lado –como se ve en la ecuación– del radio del epiciclo (r), pero también de R y de e que, aunque no se ven, podemos suponerlos recordando que el lado TC depende de R y de e (recordar la ecuación 4). Todos estos valores, R , r y e son, como ya sabemos, constantes para cada planeta. Pero, a diferencia de todos los ángulos que hasta ahora hemos analizado, en este caso el ángulo ϖ depende de dos variables y no de una: de κ_m y de α_v . En efecto, el ángulo ϖ depende de dónde esté ubicado el centro del epiciclo respecto de su apogeo (κ_m) pero también de dónde esté ubicado el planeta en su epiciclo (α_v). Esto, como veremos luego, traerá ciertas complicaciones a Ptolomeo que no conocía las ecuaciones (y, mucho menos, con dos variables). Resumiendo, el ángulo ϖ funciona de correctivo llevándonos de la longitud del centro a la longitud verdadera, que es el objetivo de la teoría. Por lo tanto, si a la longitud media le sumamos el ángulo μ obtenemos la longitud del centro y si a ésta le sumamos el ángulo ϖ , obtenemos la longitud del planeta:

Ecuación 8:

$$\lambda(t) = \lambda_m(t) + \mu(\kappa_m) + \varpi(\alpha_v, \kappa_m)$$

Acabamos de mencionar que en la época de Ptolomeo no se habían desarrollado todavía las ecuaciones. Es evidente, por lo tanto, que estas ecuaciones no aparecen en el *Almagesto*, pero sirven para ver dos cosas: primero, qué complejo que era el cálculo de una longitud a partir del modelo y, segundo, de qué valores depende cada ángulo y cuáles son los valores constantes para cada modelo de los que, en última instancia, dependen todos los demás: R , r , e , ω_{epi} y ω_{def} .

Ahora que nos hemos familiarizado con el sistema de epiciclos y deferentes veremos, en primer lugar, cuáles eran las leyes que regían la teoría propuesta por Ptolomeo para dar cuenta de la longitud de los planetas y luego, veremos cómo es posible obtener las constantes que cada modelo utiliza (los radios, las velocidades, etcétera). Para completar una exposición acabada, deberíamos mostrar también cómo es posible obtener la longitud del planeta a partir de esos modelos en algunas aplicaciones concretas, pero por problemas de espacio deberemos dejarlo para otro momento.

VI. Las leyes de la teoría

Toda teoría científica tiene una ley fundamental que enuncia de manera sintética cuál es el objetivo de la teoría, cómo se propone explicar aquello que desea explicar. Por lo general, en estas leyes fundamentales aparecen vinculados el *explanans* y el *explanandum*. Nadie mejor que el mismo Ptolomeo para definir cuál es el objetivo de su teoría planetaria. En la introducción al libro del *Almagesto* que comienza con el tratamiento de los cinco planetas, afirma:

Ahora, nuestro objetivo es demostrar para los cinco planetas, de la misma manera que lo hemos hecho para el Sol y la Luna, que todas sus aparentes anomalías pueden ser representadas por movimientos uniformes y circulares, puesto que ellos son propios de la naturaleza de los seres divinos, mientras que la no-uniformidad y el desorden les son ajenos. Por lo tanto, deberíamos pensar que el éxito en un propósito tal es una gran cosa, y ciertamente el fin propio de la parte matemática de la filosofía teórica. (IX, 1; H2, 208; T 420)

La ley fundamental de la teoría de Ptolomeo diría algo así: *para cada planeta existe un sistema de epiciclos y deferentes tal que la posición calculada por ese sistema es igual a la posición observada, en cualquier instante de tiempo.* En el caso de la que desarrollaremos aquí, deberíamos reemplazar ‘posición’ por ‘longitud celeste’. Así formulada, lo único que nos dice la ley fundamental es que debemos encontrar un sistema de epiciclos y deferentes, pero no nos pone más restricciones. De una manera análoga, la ley fundamental de la mecánica clásica, que establece la igualdad entre la sumatoria de fuerzas y el producto de la masa y la aceleración, simplemente nos dice que existe un conjunto de fuerzas tales que su suma coincide con ese producto, pero no nos dice cuáles son las fuerzas. Generalmente las teorías científicas cuentan con algunas otras leyes que imponen restricciones a las variables, determinando sus valores y haciendo que la teoría, ahora sí, diga cosas concretas. La primera de estas leyes especiales que encontramos en Ptolomeo permite calcular la velocidad angular del deferente. En efecto, el deferente, la primera de las órbitas, da cuenta del movimiento medio del planeta sobre el fondo de estrellas fijas. Por lo tanto, Ptolomeo sostiene que:

(Ley 1) El período de revoluciones del centro del epiciclo debe coincidir con el período de revoluciones del planeta. O, también: la velocidad angular del deferente debe ser igual a la velocidad angular media del planeta (cfr. IX, 3; H2, 214; T 424).

Esta ley nos permitiría, a partir del análisis que hicimos de la tabla con las longitudes de Mercurio y Júpiter, establecer que el período de revolución del deferente de Júpiter es más o menos 11 años y el de Mercurio, un año. Con esta velocidad se desplazará el punto C sobre el deferente, medido desde el punto E, el ecuante.

Estas dos leyes (la fundamental y la ley 1), en principio, se aplican también al Sol y la Luna; las que siguen, en cambio, se aplican sólo a los planetas que retrogradan. El epiciclo es agregado al deferente con la intención de dar cuenta de las retrogradaciones, y hemos visto que el epiciclo produce una retrogradación por cada vuelta que da. Por lo tanto, Ptolomeo exigirá lo siguiente:

(Ley 2) El período de revoluciones del epiciclo debe coincidir con el tiempo comprendido entre dos retrogradaciones, es decir, el epiciclo dará una vuelta por cada retrogradación. (cfr. IX, 3; H2, 214; T 424.)

Esta ley nos permite establecer, teniendo en cuenta el análisis que hicimos de la tabla, que el período de revolución del epiciclo de Mercurio es de más o menos 120 días y el de Júpiter de 405 días. Con esta velocidad se desplazará el planeta, alrededor del epiciclo, medido desde el apogeo medio del epiciclo (Am).

Como el sistema ptolemaico, excepto para Mercurio y la Luna, de hecho utiliza sólo un deferente y un epiciclo, estas dos leyes ya le permiten a Ptolomeo establecer, como hemos visto, la velocidad angular de todas las órbitas implicadas; pero, para poder calcular a partir de su sistema la longitud y anomalía medias, no es suficiente con las velocidades, sino que tiene que poder ubicar, en algún momento, los puntos que giran sobre las órbitas —el centro del epiciclo, y el planeta que gira sobre el epiciclo—; es decir, además de la velocidad, necesita alguna posición inicial, alguna longitud y anomalía medias. Y aquí Ptolomeo se encuentra con un problema interesante. Él sólo puede medir la longitud real del planeta, ya

que ésta se mide desde la Tierra (donde él se encuentra) y lo que la establece, el planeta, es observable. Pero, evidentemente no puede observar el centro del deferente (que es un punto ficticio) y tampoco puede observar desde el punto ecuante, pues no puede viajar allí. Por lo tanto, no podría calcular ni la longitud media, ni tampoco la anomalía media del planeta ya que, aunque el planeta es observable, no lo es el punto desde el que se mide. Nuevamente, Ptolomeo no puede viajar al centro del deferente para calcular desde allí la anomalía. Es decir, conoce las velocidades con la que se desplazan (por las dos primeras leyes), pero no sabe dónde se encuentran. Sin embargo, su sistema es tal que:

(Ley 3) En el medio de una retrogradación que se da sobre la línea absidal —la recta sobre la que se encuentran el centro de la Tierra y el punto excéntrico—, la longitud del planeta es igual a la longitud del centro del epiciclo, que es igual a la longitud media. Además, la anomalía (media y verdadera, pues aquí coinciden) es 180° .

Es decir, como ya hemos anticipado cuando analizamos el modelo, cuando el centro del epiciclo se encuentra sobre la línea absidal, la longitud del centro y la media coinciden. Pero además, si en ese instante nos encontramos justo en el medio de una retrogradación, ambas coinciden con la longitud del planeta —que sí puede ser medida—. Como si esto fuera poco, en ese instante, la anomalía media es exactamente 180° . La anomalía verdadera siempre es 180° en medio de una retrogradación, por definición, pero aquí la media coincide con la verdadera y, por lo tanto, también la media mide 180° (Véase figura 7). Como anticipamos, en esta posición el ángulo μ y el ángulo ϖ desaparecen, por lo que las longitudes por un lado y las anomalías por otro, tienen el mismo valor. Por lo tanto, es posible conocer las posiciones iniciales (la longitud media y la anomalía media) de ese instante. Conocida en un punto, basta con aplicar la velocidad que obtuvimos en las leyes anteriores para conocer la longitud media o la anomalía media en cualquier instante.

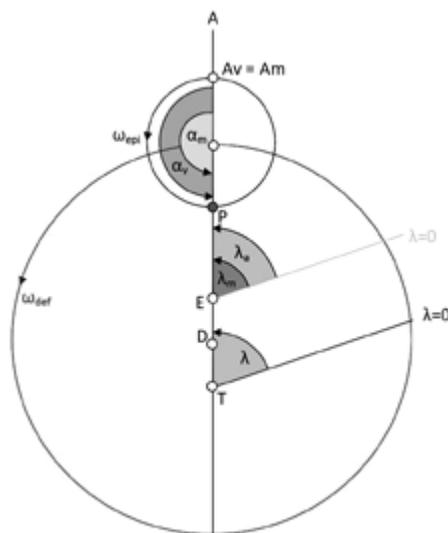


Figura 7. Instante medio de una retrogradación producida sobre la línea absidal. T = Tierra; C = Centro del epiciclo; P = Planeta; D = Punto excéntrico; E = Punto ecuante; A = Apogeo; Am = Apogeo medio de la anomalía; Av = Apogeo verdadero de la anomalía; λ = Longitud; λ_m = Longitud media; λ_a = Longitud del apogeo; α_m = Anomalía media; α_v = Anomalía verdadera; ω_{def} = velocidad (angular) del deferente; ω_{epi} = velocidad (angular) del epiciclo.

Todos estos valores son constantes para cada planeta, averiguando estos valores, y cómo llegar de estos valores y el tiempo a la longitud, habremos logrado nuestro objetivo. En esta sección mostraremos cómo averiguar los valores de un modelo; en la que sigue, haremos lo propio con la forma de obtener a partir de estos (y el tiempo), la longitud.

VII.a. Cómo medían el tiempo

Antes de avanzar, debemos decir algunas palabras acerca de cómo era medido el tiempo en la antigüedad, y en particular por Ptolomeo, ya que para obtener los valores apelará a ciertas observaciones. Señalaremos sólo lo que necesitamos para poder continuar, porque la teoría del tiempo es bastante compleja.

En primer lugar, los días eran medidos de mediodía a mediodía, es decir, el día comenzaba cuando el Sol alcanzaba su punto más alto en el cielo y terminaba cuando, luego de la noche, volvía a alcanzar su punto más alto.

Cada día estaba compuesto de 24 horas pero, curiosamente, no necesariamente cada hora medía lo mismo. Había dos sistemas para medir las horas. El más popular consistía en dividir la noche (el tiempo sin Sol) en 12 horas y el día (el tiempo con Sol) en otras 12 horas. Todas las horas de la noche medían lo mismo, y también medían lo mismo las horas del día, pero si —como pasa casi siempre— el día y la noche no miden lo mismo, la duración de una hora nocturna no era igual a la duración de una hora diurna. Por ejemplo, en zonas bastante alejadas del Ecuador, en verano el día puede durar 18 horas de las nuestras, mientras que la noche sólo 6. Así, una hora nocturna duraría media hora nuestra y una hora diurna, una hora y media. Estas horas eran llamadas horas estacionales porque dependían, además de la latitud, de la época del año. Sin duda, este sistema tenía algunas ventajas —por ejemplo, no sería necesario adelantar o atrasar horas cuando llega el invierno o verano como hacemos hoy— pero astronómicamente era muy inconveniente. Por ello se introdujeron las horas equinocciales, todas de igual duración, tal y como las utilizamos hoy. En efecto, en los equinoccios el día y la noche duran exactamente lo mismo y, por lo tanto, las horas nocturnas y diurnas son iguales. Por lo general, cuando Ptolomeo describe una observación, aclara a cuántas horas equinocciales corresponden las horas estacionales registradas en la observación.

Hiparco había establecido que el Sol tardaba en dar una vuelta sobre la eclíptica en 365 días más $\frac{1}{4}$ de día menos $\frac{1}{300}$ de día y Ptolomeo concuerda con ese valor. Pero, por cuestiones prácticas, Ptolomeo cuenta los años utilizando los años egipcios que tienen todos, sin excepción, 365 días. El año egipcio estaba dividido en 12 meses de 30 días y 5 días al final, festivos, que no pertenecían a ningún mes y eran llamados *epagómenos*. El nombre de los meses, en orden, es: Thoth, Faofi, Athyr, Joiak, Tybi, Meshir, Famenoth, Farmuthi, Pajon, Paini, Epifi y Mesore. Ptolomeo suele expresar los días según los meses egipcios. Los años son contados no a partir de la era cristiana, sino a partir del reinado de diversos reyes. Ptolomeo ofrece una tabla con un listado de reyes y los años que han gobernado desde más de 800 años antes que su época. Comienza con una serie de reyes de Asiria y Babilonia, luego de Persia, Macedonia y finalmente romanos. El primero de todos es Nabonnassar. Por lo tanto, el tiempo o del sistema Ptolemaico es el primer día del mes de Thoth del primer año de la era de Nabonnassar, al mediodía (26 de febrero del 747 a.C.) (III, 9; H1, 263; T 172). Cualquier año podía expresarse como el año del reinado del rey vigente, por ejemplo el año 4 del reinado de Alejandro Magno (328 a.C.) o desde cualquier otro rey anterior. En este caso corresponde al año 420 de la era de Nabonnassar. Por lo general, Ptolomeo lo expresa según el rey vigente y la era Nabonnassar.

VII.b. Velocidades del deferente y del epiciclo

Para determinar la velocidad del deferente contamos, como ya hemos dicho, con la **Ley 1** que vincula la velocidad del deferente con la velocidad angular media del planeta. Esta última puede medirse empíricamente, como lo hemos hecho a partir de las tablas. A su vez, para determinar la velocidad del epiciclo contamos con la **Ley 2** que vincula la velocidad del epiciclo con el tiempo que transcurre entre retrogradaciones, que también puede medirse empíricamente, como lo hemos hecho desde las tablas. Así, estas dos leyes bastarían para determinar los valores de las velocidades. Sin embargo, el sistema total de las leyes está sobredeterminado, en el sentido técnico matemático según el cual hay un exceso de datos para resolver un problema. En el caso de un planeta interior, ya la **Ley 4** nos indica cuál es la velocidad del deferente. En el caso de un planeta exterior, como el que acá estamos analizando, con cualquiera de las dos primeras leyes tomadas aisladamente y la **Ley 5**, si se conoce la velocidad media del Sol, puede determinarse el valor de ambas velocidades sin necesidad de recurrir a la otra ley. Es decir, si sé que en 59 años Saturno ha dado sólo dos vueltas, sabré que ha retrogradado, en ese tiempo, 57 veces. Expresado a nivel teórico diré que la velocidad del deferente de Saturno es de:

$$\frac{2 \text{ vueltas}}{59 \text{ años}} = 0,0338 \text{ vueltas por año}$$

y, por lo tanto, la del epiciclo será de:

$$\frac{(59 - 2) \text{ vueltas}}{59 \text{ años}} = 0,9661 \text{ vueltas por año}$$

Hiparco había establecido, justamente, esa proporción para Saturno. Pero Ptolomeo la corrigió diciendo que cada 57 retrogradaciones, Saturno da 2 vueltas + 1;43°, y esto sucede en 59 años y 1 día y 18 horas (IX, 3; H2, 213-219; T 423-426). Sin entrar en detalles técnicos, se ve claramente que las dos primeras leyes o cualquiera de ellas combinada con la quinta y ciertos datos observables bastan para determinar la velocidad angular del epiciclo y del deferente.

Los valores finales de Ptolomeo serán, para el epiciclo:

$$\omega_{epi} = \frac{57 \cdot 360^\circ}{59 \cdot 365,14,48 + 1;45} = 0;57,7,43,41,43,40 \text{ grados por día}$$

Esto quiere decir que su período medio de anomalía es:

$$T_{epi} = \frac{360^\circ}{\omega_{epi}} \cong 378.09 \text{ días}$$

Y para el deferente:

$$\omega_{def} = \frac{2 \cdot 360^\circ + 1;43^\circ}{59 \cdot 365,14,48 + 1;45} = 0;2,0,33,31,28,51 \text{ grados por día}$$

Esto quiere decir que su período medio de longitud es:

$$T_{def} = \frac{360^\circ}{\omega_{def}} \cong 10743 \text{ días} \cong 29.41 \text{ años}$$

$$\omega_{def} = 0;2,0,33, \dots \text{ grados por día}$$

$$\omega_{epi} = 0;57,7,43, \dots \text{ grados por día}$$

VII.c. La dirección y la distancia del punto ecuante

Recordemos que la Ley 3 implica que en el instante medio de una retrogradación la longitud media del planeta coincide con la longitud verdadera y, por otro lado, la anomalía media es 180° . Si, además, la vinculamos con la Ley 6, sabremos que el instante medio de una retrogradación se produce cuando la elongación de un planeta exterior medida desde el Sol es aproximadamente 180° . Por lo tanto, debemos medir la longitud del planeta cuando se encuentra en oposición al Sol, y el valor que obtendremos será la longitud media de ese instante (XI, 5; H2 393-413; T 525-537). Lo ideal hubiera sido utilizar oposiciones que se produjeran sobre la línea absidal, pero seguramente Ptolomeo no contaba con ellas entre sus datos. Trabajó, por lo tanto, con tres oposiciones que no se dan sobre la línea absidal. Son las siguientes:

	Fecha y lugar	Longitud
1	Adrián 11, Pajon 7, 6 h. en Alejandría	$181;13^\circ$
2	Adrián 17, Epifi 18, 4 h. en Alejandría	$249;40^\circ$
3	Adrián 20, Mesore 24, mediodía de Alejandría	$284;14^\circ$

El primer año del reinado de Adrián corresponde al 864 de Nabonnassar y al 116 d.C. Con sólo tres observaciones Ptolomeo podrá calcular la distancia y la dirección del punto ecuante. El problema se reduce a lo siguiente. Partimos de tres observaciones del planeta. Tenemos, por lo tanto, como datos, el tiempo transcurrido entre las observaciones y las longitudes verdaderas de los planetas. Tener las longitudes verdaderas de las oposiciones en esos instantes es tener las longitudes medias. Al tener el tiempo transcurrido, podemos calcular el desplazamiento en longitud media del planeta, es decir, lo que el centro del epiciclo debe haberse desplazado angularmente visto desde el punto en el que la velocidad del deferente es constante. El problema es obtener ese punto, que será, justamente, el punto ecuante.

En la figura 8 se representan las observaciones 1, 2 y 3 que, como son oposiciones, corresponden al centro del epiciclo. Sabemos que los tiempos transcurridos entre ellos son:

$$t_2 - t_1 = 6^a 70^d 22^h$$

$$t_3 - t_2 = 3^a 35^d 20^h$$

Y las diferencias de longitud verdadera entre ellos son:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = 249;40^\circ - 181;13^\circ = 68;27^\circ$$

$$\lambda_3 - \lambda_2 = 284;14^\circ - 249;40^\circ = 34;34^\circ$$

Pero, como ya tenemos la velocidad media de la longitud, podemos calcular la diferencia en las longitudes medias (no las verdaderas), multiplicando la velocidad (0;2,0,33... grados por día) por el tiempo transcurrido.

En $6^a 70^d 22^h$, Saturno recorre: $75;43^\circ$ y en $3^a 35^d 20^h$, Saturno recorre: $37;52^\circ$

$$\lambda_{m2} - \lambda_{m1} = 75;43^\circ$$

$$\lambda_{m3} - \lambda_{m2} = 37;52^\circ$$

Es decir, desde la Tierra, el ángulo entre las líneas TC_1 y TC_2 es de $68;27^\circ$ y entre las líneas TC_2 y TC_3 es de $34;34^\circ$. Pero, medidos desde el punto ecuante, la diferencia entre esos mismos puntos es, para las dos primeras de $75;43^\circ$ y para las dos segundas de $37;52^\circ$.

8 Es exactamente 180° medida desde el Sol medio que es la posición que ocuparía el Sol si fuera a una velocidad constante (hemos visto en la tabla que el Sol varía levemente su velocidad), pero omitiremos aquí esta precisión.

No seguiremos aquí todo el desarrollo geométrico pero es claro que existe un único punto desde el que se respetan estas condiciones y ése es, justamente, el punto ecuante.

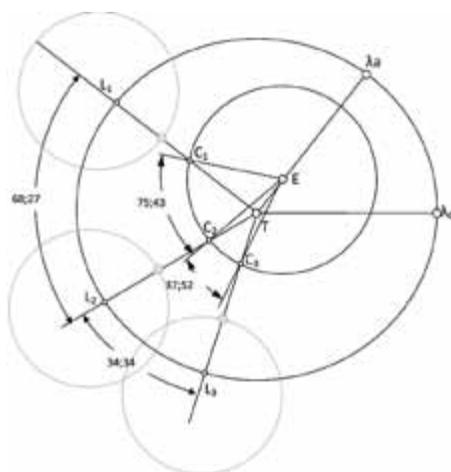


Figura 8. Cálculo de la dirección y distancia del punto ecuante. T = Tierra; E = Punto ecuante; P = Planeta; λ_a = Longitud del apogeo.

Ptolomeo no puede obtener distancias absolutas, pero no las necesita: sólo necesita conocer las proporciones entre R , r y e . Por lo tanto, supondrá que, por definición, R mide 60 partes (60^p), una medida que resulta conveniente para la operación trigonométrica de las *cuerdas*, que comentaremos más adelante. Suponiendo, por lo tanto, que R mide 60^p , obtiene mediante ingeniosos cálculos geométricos que la distancia entre la Tierra y el punto ecuante (TE) es de $6;50^p$ y la longitud del apogeo (λ_a) = 233° . Recordemos que TE mide $2e$, ya que e mide la distancia entre la Tierra y el centro del deferente y siempre está ubicado en la mitad entre E y T. Por lo tanto:

$$e = 3;25^\circ \qquad \lambda_a = 233^\circ$$

VII.d. El cálculo del epiciclo

Ahora debemos determinar la proporción que hay entre los radios del epiciclo (r) y del deferente (R) (XI, 6; H2 414-419; T 538-540). En el cálculo del valor y dirección de la ecuante omitimos los cálculos geométricos para no hacer demasiado pesado el desarrollo. En este caso, los seguiremos paso por paso pero cualitativamente, para que, conociendo el tipo de cálculos concretos que Ptolomeo realizó en el *Almagesto*, pueda apreciarse el genio de su autor. Si resultase demasiado engorroso, puede omitirse la lectura sin pérdida substancial en lo esencial de la teoría ptolemaica y pasar al siguiente punto, la aplicación del sistema.

Evidentemente r no puede medirse en oposiciones, porque en ese caso el radio está ubicado perpendicularmente a la Tierra (revisar figura 7). Por lo tanto, Ptolomeo utilizará una nueva observación, la número 4 que corresponde al segundo año del reinado de Antonino, a las 8 horas del sexto día del mes de Meshir, en Alejandría, con una longitud para Saturno de $309;4^\circ$. Si a la longitud le restamos la longitud del apogeo ($\lambda_a = 233^\circ$), obtenemos el valor del centro verdadero (el ángulo ATP, pintado de amarillo en la figura 9, representado por c).

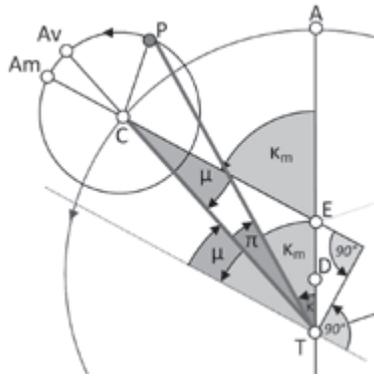


Figura 9. El centro medio (κ_m) es igual a la suma de $\kappa + \mu + \varpi$. T = Tierra; C = Centro del epiciclo; P = Planeta; D = Punto excéntrico; E = Punto ecuante; A = Apogeo; Am = Apogeo medio de la anomalía; Av = Apogeo verdadero de la anomalía; κ = centro verdadero; κ_m = centro medio; ϖ = Prostaphairesis de la longitud. μ = Prostaphairesis de la anomalía.

Además, como conocemos el tiempo transcurrido entre la cuarta y la tercera observación ($t_4 - t_3 = 2^a \ 167^d \ 8^h$) y el valor de κ_m en la tercera —al conocer la longitud media de la tercera observación y la longitud del apogeo, se obtiene κ_m —, podemos calcular (utilizando ω_{def}) el ángulo κ_m de la cuarta observación. Con esos datos podemos calcular el ángulo $\mu(\kappa_m)$ mediante un cálculo exclusivamente geométrico que utiliza el triángulo rectángulo punteado (podemos revisar la ecuación 5 en la que se veía que μ dependía de κ_m , de e y de R).

Como la tercera era una oposición, también sabíamos que α_m debería estar cerca de 180° . Sería 180° si la oposición se diera sobre la línea absidal. Cuando no lo es, α_m es igual a 180° menos el ángulo μ (revisar ecuación 6), pues como ya hemos dicho, α_v mide siempre 180° en medio de una retrogradación, no importando dónde ésta se produzca. Conociendo, entonces, el α_m de la tercera observación y ω_{epi} , podemos calcular también el ángulo α_m de la cuarta observación. Bien, ya hemos obtenido la anomalía media, ahora deseamos calcular el ángulo ϖ .

De la figura 9 se sigue que el centro medio (κ_m) es igual a la suma del centro verdadero (κ) más los ángulos μ y ϖ :

Ecuación 8:

$$\kappa_m = \mu + \kappa + \varpi$$

Conocemos ya κ_m , κ y μ , por lo que puede obtenerse ϖ . Recordemos que queremos calcular el radio del epiciclo (suponiendo que el del deferente vale 60 partes). En la figura 9 está representado por el lado CP. Nos centraremos en el triángulo PCT, para poder calcular CP.

En el triángulo PCT, el ángulo centrado en C (PCT) es igual a:

Ecuación 9:

$$PCT = \alpha_m - 180^\circ + q$$

y todos los valores ya son conocidos. Conocemos también el valor del ángulo centrado en T (que es ϖ). Por lo tanto, podemos calcular el valor del ángulo centrado en P (CPT).

Lo que nos queda averiguar es uno de los lados para poder obtener los otros dos y, por lo tanto, CP. Trataremos de averiguar el lado TC, que también es un lado del triángulo ECT.

Por lo tanto, ahora nos debemos centrar en el triángulo ECT. Conocemos el valor del ángulo centrado en E a partir de κ_m ($180 - \kappa_m$). También conocemos el ángulo centrado en T ($= \kappa + \varpi$) y el lado TE (la distancia de la ecuante, $2e$), por lo tanto, conociendo 2 ángulos y un lado, podemos calcular los otros dos lados. A nosotros nos interesa TC.

Ahora miramos el triángulo TCP nuevamente, recordando que conocemos el ángulo centrado en T, que es ϖ , y el ángulo centrado en C (PCT, que ya habíamos calculado); conocemos también un lado, TC, por lo que podemos calcular también los otros. A nosotros nos interesa el lado CP que es, justamente, el radio del epiciclo (r). El resultado es $CP = r = 6;30^p$.

$$r = 6;30^p$$

VII.e. El cálculo de las raíces

Como hemos visto, Ptolomeo construyó todo el sistema con sólo 4 observaciones que distan, entre ellas, apenas 10 años y medio. Pero una revolución completa de Saturno lleva, como habíamos ya señalado, más de 29 años, por lo que sería muy riesgoso que no pusiera a prueba el sistema. Ptolomeo lo hace (XI, 7; H2 420-425; T 541-543), analizando una fecha muy anterior, la observación 5, que corresponde al año 519 de la era Nabonnassar, mes Tybi, día 14, 6 horas en Mesopotamia.

Finalmente obtiene las raíces del sistema, es decir, de las condiciones iniciales (XI, 8; H2 425-427; T 543-545). Conociendo ya todos los valores de una observación, los cálculos no presentan ninguna dificultad: basta tomar los datos de la observación más antigua (en nuestro caso la quinta) y retrotraerse hasta Thoth 1, Nabonassar 1. Los resultados son:

$$\lambda_m(t_0) = 296;44^\circ$$

$$a_m(t_0) = 34;2^\circ$$

$$\lambda_a(t_0) = 224;10^\circ$$

Hemos mostrado cómo Ptolomeo obtiene, para el caso de Saturno, todos los valores necesarios para lograr expresar la ley concreta de cada planeta. Ya no necesita más datos. Con los que tenemos y muchos cálculos trigonométricos, es posible, dado cualquier instante, calcular la longitud de un planeta, utilizando la ecuación 8; ése era, justamente, el objetivo de la teoría.

VIII. Conclusión

En nuestro recorrido, primero hemos descrito lo que la teoría pretende explicar: el movimiento de los planetas sobre el fondo de estrellas fijas. Luego nos familiarizamos con el instrumental que la teoría propone para explicar, esto es, el sistema de epiciclos y deferentes. Seguimos con la exposición de la ley fundamental de la teoría y de algunas otras especiales, y mostramos cómo a partir de esas leyes y algunas pocas observaciones —sólo cuatro, si no tenemos en cuenta la determinación de las velocidades— podían obtenerse todas las variables propias de cada planeta: los radios, las velocidades, las posiciones iniciales, etcétera. A partir de esos datos y como único *input* un tiempo, es posible obtener la longitud del planeta, que era lo que se quería obtener. Esto cierra el recorrido de la teoría. Hemos seguido un largo camino por la teoría planetaria de Ptolomeo, teoría que tuvo una vigencia de 13 siglos, sólo comparable a los *Elementos* de Euclides. Aristóteles decía que un buen zapatero es aquél que hace el mejor zapato con el cuero que le dan. Sin duda, el cuero con el que trabajó Ptolomeo era bastante limitado: los instrumentos de observación eran muy imprecisos, los registros históricos de observaciones pasadas vagos

y ambiguos, la trigonometría que poseía era todavía rudimentaria y ni siquiera podía expresar de manera abstracta las ecuaciones. Sin embargo, con ello, ha desarrollado un sistema que calza asombrosamente bien con la realidad. Intentamos mostrar, a la vez, la complejidad y la unidad de la teoría, lo que la dota de una particular belleza. Esperamos que este objetivo se haya logrado.

Agradecimientos: Deseo agradecer a Ramiro Pereyra Moine, Hernán Grecco, César Lorenzano, Carlos A. Carman, Olimpia Lombardi que leyeron versiones anteriores de este trabajo y me hicieron importantes sugerencias.

IX. Bibliografía

- Boll, F. (1894), «Studien über Claudius Ptolemäus», en *Jahrbücher für klassische Philologie*, Supl. Bd. 21, Leipzig, pp. 51-243.
- Dreyer, J. (1953 [1906]), *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, Nueva York, Dover Publications Inc.
- Evans, J. (1998), *The History and Practice of Ancient Astronomy*, Oxford, Oxford University Press.
- Fisher, J. (1932), *Claudii Ptolemaei Geographiae, Codex Urbinas Graecus 82, Tomus Prodrromus, Pars Priori*, Leiden-Leipzig, Bibliotheca Vaticana.
- Goldstein, B. (1967), «The Arabic version of Ptolemy's Planetary Hypotheses», en *Transactions of the American Philosophical Society*, The American Philosophical Society, Philadelphia. v. 57, part. 4, pp. 3-55.
- Halma, N. (1813-1816), *Composition Mathématique de Claude Ptolémée*, Paris, Chez Henri Grand, 2v.
- Hamilton, N. T.; Swerdlow, N.; Toomer, J. (1987), «The 'Canobic inscription': Ptolemy's earliest work», en *From ancient omens to statistical mechanics*, Acta Hist. Sci. Nat. Med. Medical Society of Copenhagen, Copenhagen, N° 39, pp. 55-73.
- Hartner, W. (1964), «Medieval views on Cosmic Dimensions and Ptolemy's Kitab al Manshurat», en *Mélanges Alexandre Koyré, publiés à l'occasion de son soixante-dixième anniversaire*, v. I, Paris, Hermann, pp. 254-282.
- Heiberg, J. L. (ed.) (1898-1903), *Claudii Ptolemaei Opera quae exstant omnia*. Vol. I, Syntaxis Mathematica, Leipzig, Teubner, 2v.
- _____ (ed.) (1907), *Claudii Ptolemaei Opera quae exstant omnia*, Vol. II, *Opera Astronomica Minora*, Leipzig, Teubner.
- Koyré, A. (1964), *Mélanges Alexandre Koyré, publiés à l'occasion de son soixante-dixième anniversaire*, Vol I: *L'aventure de la science*, Paris, Hermann, 2v.
- Manitius, K. (1912-1913), «Ptolemäus, Handbuch der Astronomie», en *Deutsche Übersetzung von K. Manitius*, Leipzig, Teubner, 2v.
- Neugebauer, O. (1969 [1957]), *The Exact Sciences in Antiquity*, New York, Dover.
- _____ (1975), «A History of Ancient Mathematical Astronomy», en *Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences 1*, Berlin, Springer, 3v.
- Newton, R. (1977), *The Crime of Claudius Ptolemy*, Baltimore/ Londres, John Hopkins University Press.
- Pedersen, O. (1974), «A Survey of the Almagest», en *Acta Historica Scientiarum Naturalium et medicinalium. Bibliotheca Universitatis Hauniensis*, vol. 30. Odense, Odense University Press.
- Pérez Sedeño, E. (1987), *Las Hipótesis de los Planetas*, Madrid, Alianza. Introducción y notas de E. Pérez Sedeño. Trad. de J. G. Blanco/ A. Cano Ledesma.
- Ptolomeo, C., *Almagest*. Ver Toomer (1998), Halma (1813/1816), Manitius (1912/1913), Taliaferro (1952) Heiberg (1898-1903)
- _____, *The Planetary Hypotheses*. Ver Goldstein (1969), Heiberg (1907) Pérez Sedeño (1987).
- Taliaferro, R. (1952), *The Almagest by Ptolemy*. En *Great Books of the Western World*, v. 16. Chicago, Encyclopaedia Britannica.
- Toomer, G. (1975), «Ptolemy». En *Dictionary of Scientific Biography*, v. 11, New York, Ch. Scribner's Sons, pp. 186-206. 16 v.
- _____ (1998 [1984]), *Ptolemy's Almagest*, Princeton, Princeton University Press.

5. Ciencia y Filosofía en la Edad Media

La disputa entre razón y fe⁹

I. Introducción

La idea de «la Edad Media» surge primero en el siglo XV básicamente entre los humanistas italianos, que consideran que lo que «media» entre los impresionantes logros de la Antigüedad y la ilustración de su propia época es un período oscuro respecto al cual aquélla constituye una ruptura. El término «Renacimiento», con el que designan dichos estudiosos su propio proyecto o movimiento, apunta en la dirección de subrayar la discontinuidad y la disolución de lo que a partir de entonces se conocerá como «la Edad Oscura». Esta concepción peyorativa del período que abarca desde lo que se ha dado en llamar la Alta Edad Media o la Edad Media inicial (siglos V y XII) y la Baja Edad Media o la Edad Media tardía (mediados del siglo XIII y XIV), debe, sin embargo, ser puesta en entredicho, al menos en el sentido de requerir un examen cuidadoso que no se sustente, ni en la necesidad de distinguirse de etapas anteriores en la búsqueda de unas señas de identidad propias, como es el caso de los renacentistas, ni en ningún ejercicio de retroproyección en el que sólo seamos capaces de señalar en dicho período —en concreto cuando nos acercamos al final del mismo— a nuestros antepasados «modernos», identificados exclusivamente con lo que la modernidad comporta para el conocimiento científico y la historia de la ciencia¹⁰. La ciencia no se produce en el vacío sino en contextos históricos, políticos, sociales y económicos concretos. El período cuyo estudio abordamos en las páginas siguientes es largo, y está sujeto a múltiples vicisitudes que afectarán a los distintos contextos señalados y al conocimiento resultante de su intersección. La atención a los mismos, sin embargo, no implica ni significa obviar, evidentemente, que en toda reconstrucción histórica ha de procurarse, en la medida de lo posible, una combinación adecuada de un conjunto de factores entre los cuales no sólo figuran esos contextos sino también, y de forma ineludible, el conocimiento e instrumental

9 Este texto se enmarca dentro del Proyecto de Investigación FFI2009-09483, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia.

10 Cuestión distinta de la planteada es el debate sobre la continuidad o discontinuidad de la filosofía y la ciencia medievales respecto a la ciencia moderna, que es lo que permite hablar, o no, de Revolución Científica.

previos y disponibles —y el uso que los sujetos de una época hacen de los mismos. La afirmación precedente referida a que la ciencia no se da en el vacío tiene, por tanto, esta doble dimensión. En tal sentido, la trayectoria y el desarrollo de la filosofía y la ciencia medievales van a estar marcadas por la recuperación y la recepción de la filosofía y la ciencia antiguas —en un proceso en ocasiones accidentado—, y por su asimilación, incorporación y articulación en la concepción del mundo de la época, que está constituida, fundamentalmente, pese a las variaciones y cambios que afectarán a los distintos contextos mencionados, por el pensamiento cristiano o, si se prefiere, por el desarrollo de la doctrina cristiana. La Iglesia desempeñará, así, el papel predominante en la Edad Media. Encargada de la supervivencia de la cultura, sobre todo en el período de transición anterior al siglo X, mecenas del saber, expresión intelectual y administrativa del sistema feudal, será la institución a la que queden restringidas la cultura y la educación.

En efecto, la caída del Imperio Romano¹¹ supuso una lenta decadencia del saber que terminará convirtiéndose en claro retroceso en Occidente con el inicio de la Edad Media. La ciencia griega casi desaparecerá de la mayor parte del continente europeo con la división del Imperio. En su parte oriental, que es la que prevalecerá hasta 1453, quedan los grandes focos de la cultura griega —Atenas y Alejandría—, lo que supondrá la posibilidad de disponer ininterrumpidamente de las obras de Platón, Aristóteles, Ptolomeo, etcétera. A ello se une el hecho de que la lengua empleada es el griego, por lo que la lectura de dichas obras se realiza en el idioma original. En la parte occidental, sin embargo, la fragmentación de los territorios que hasta entonces habían estado bajo dominio romano, así como la gradual constitución de los reinos germánicos de Europa fueron el resultado de la ocupación por parte de los pueblos germanos de las provincias occidentales en la segunda mitad del siglo V. Desde el punto de vista cultural la diferencia respecto a la parte oriental es más que manifiesta: no se conservaron las obras clásicas griegas —excepto una traducción parcial del *Timeo*— y, sobre todo, tampoco se hubieran entendido en caso contrario dado que el nivel de alfabetización de la población era mínimo y, además, sólo se hablaba latín¹². De este modo sólo puede destacarse, entre los siglos V y X, la labor de los enciclopedistas latinos: Boecio (siglo VI), Isidoro de Sevilla (siglos VI-VII) o Beda el Venerable (VII-VIII) llevarán a cabo compilaciones del conjunto de las ciencias. Estas compilaciones mantuvieron o conservaron una parte del saber antiguo, pero también es cierto que dicha tarea incluirá lagunas e inexactitudes, cuando no errores. Dicho de otro modo, con la división del Imperio se rompe la continuidad intelectual entre Oriente y Occidente.

En los siglos anteriores a esta división, en los primeros siglos de nuestra era, hace su aparición el cristianismo como fuerza política y social dominante. La Iglesia aparece como la organización política más poderosa e influyente del Imperio, y el triunfo del cristianismo significará que a partir del siglo IV en Occidente, y hasta el advenimiento del Islam en Oriente, toda la vida intelectual se expresará en términos del dogma cristiano. Al mismo tiempo, y de modo creciente, la cultura quedará restringida al clero¹³. A juicio de Bernal (1964: 212), el esfuerzo intelectual que se produce en todo este período detenta una característica absolutamente novedosa: se pone al servicio de los credos religiosos organizados.

11 Se suele tomar la caída del Imperio Romano en el año 476 como punto de referencia para señalar el inicio de la Edad Media y, por tanto, el fin de la Edad Antigua.

12 En la parte oriental, por el contrario, el latín estaba reservado sólo a los documentos oficiales.

13 La Iglesia no sólo desempeñará sus funciones espirituales sino que asumirá también la educación y la administración.

Estas religiones organizadas tendrían como rasgos definitorios el estar constituidas por un clero igualmente organizado, por unos ritos concretos, y por un credo que supone aceptar determinado orden del universo que viene incorporado en unos libros sagrados. Destacan la coherencia social de la Iglesia y ese credo que define e impone, así como el carácter básicamente estabilizador que le es propio como organización cuya finalidad es la aceptación por parte de todos del orden social, al mostrar que éste es parte integral de un universo no sometido a cambio alguno. En este sentido, el desarrollo de una tradición intelectual sería por parte de la Iglesia tendrá como líneas directrices, por un lado, el desarrollo de la doctrina cristiana y, por otro, la defensa de la fe cristiana contra los oponentes cultos (apologética)¹⁴. Y es en este momento en el que podemos señalar, de algún modo, el inicio de lo que constituirá, de acuerdo con nuestro punto de partida, el eje en torno al cual se articulará la trayectoria de la filosofía y la ciencia medievales, pues ya en el siglo V Agustín de Hipona comienza a elaborar una especie de compromiso entre la fe y la filosofía cuyo resultado fue una combinación de la tradición de las Escrituras y el platonismo. La apologética, que es lo que se desarrollará básicamente en estos dos siglos con el objetivo de justificar y defender los fundamentos de la fe, necesitará y acudirá a las herramientas lógicas presentes en la filosofía griega, así como a algunos elementos de la filosofía platónica tales como su teoría sobre la inmortalidad del alma o su Demiurgo, que perfectamente podía ser asimilado al dios creador cristiano, pudiendo formar parte, en tanto que la correspondencia entre ambos sistemas de pensamiento parecía posible, de la enseñanza cristiana. En cualquier caso conviene subrayar que nos encontramos en este momento con una actitud, por parte de la Iglesia, en la que la necesidad de defender, como decíamos, los fundamentos de la fe, unida al papel social que como institución desempeñaba, exigía de algún modo el desprecio por el saber pagano y profano precedente. La ciencia no era el camino para la salvación; sólo las Escrituras y la exégesis católica proporcionaban los conocimientos necesarios para la misma. Pero, a su vez, esta actitud no impedía, como en el caso de Agustín, que pudiera admirarse la ciencia antigua sobre todo por su alcance y precisión, sin que ello significara considerar la importancia y pertinencia del estudio activo de los problemas científicos. Puede hacerse, como de hecho se hizo con la platónica, un uso cristiano de la filosofía griega, pero partiendo de una premisa básica: la servidumbre o dependencia de la filosofía respecto a la religión, que lograría disciplinarla.

En la parte oriental del Imperio la situación, como señalamos en las páginas precedentes, es distinta, entre otras razones porque se mantuvo un nivel más alto de estabilidad política y social que se tradujo en una mayor continuidad de las escuelas. En la medida en que la disponibilidad de las fuentes originales de la cultura griega no se vio afectada por la existencia de barreras lingüísticas, como también señalamos, la preservación y difusión de la herencia griega culminará con la fundación del Islam en el siglo VII. Los cristianos del Imperio bizantino se habían limitado a copiar, compilar y comentar el legado griego, preservándolo y difundiéndolo entre persas, sirios y árabes. La conquista, por parte del Islam, de Persia, Siria, Egipto, y su llegada posterior a España, parte de Francia y la India, posibilitó el contacto de los árabes con sirios y persas, a través de los cuales accedieron a la cultura helénica, por la que se interesaron de manera activa. Los árabes traducirán la ciencia griega, de tal manera que durante los siglos en los que el saber declinaba en Occidente, el Islam experimentó un renacimiento científico. A partir del siglo VII, en efecto, el mundo musulmán

¹⁴ Podríamos afirmar que, sobre todo entre los siglos IV y VII, la historia del pensamiento se reduce a la historia del pensamiento cristiano.

se convierte en un imperio mediterráneo que heredará la tradición antigua y reconstruirá su ciencia a través de la traducción al árabe de los textos griegos. Con independencia de sus aportaciones originales, relacionadas sobre todo con las matemáticas, la química y la óptica¹⁵, lo importante para nuestros propósitos es que será esta civilización la encargada de conservar y reproducir los documentos de la ciencia griega que posteriormente llegarán a Europa. La ciencia islámica se construirá y girará alrededor de aquella entre los siglos VIII y XIII, momento en el que pasará definitivamente el testigo a los medievales europeos. En este sentido habría que unir a la hipótesis de partida que estamos manejando otro de los factores que difícilmente podemos disociar de ésta y que marcará, por tanto, el desarrollo y devenir de la filosofía y la ciencia medievales: la recuperación y redescubrimiento del saber antiguo, con su secuencia temporal propia, de la mano de los árabes y de las traducciones árabes. No obstante, antes de pasar a explicitar de un modo más pormenorizado la relación que establecemos entre ambos factores, resulta pertinente hacer referencia también al modo en que se imbrican con los contextos político, social y económico de la época.

II. Dilucidando contextos

En términos generales podríamos decir que la muerte del emperador Teodosio en el año 395 supuso la ruptura de la unidad que el Mediterráneo había tenido durante el Imperio Romano. A partir de ese momento comienzan a individualizarse tres mundos diferentes y se crea una enorme diversidad de formas culturales durante la Alta Edad Media. Por un lado el oriente cristiano, heredero del Imperio, se consolida como Imperio Bizantino; por otro, el oriente musulmán, unido en una misma fe, se extenderá por Oriente y Occidente configurándose como un gran imperio con Bagdad y Damasco como las capitales en las que se cultivan todas las ramas del saber; y el occidente cristiano, sometido a las invasiones bárbaras, luchará por encontrar su propia identidad. En este período las ciudades y el comercio se reducen al mínimo, y la economía y la sociedad se centran en una vida absolutamente ruralizada. Esto es, la sociedad de la Alta Edad Media se caracteriza por ser fundamentalmente agraria y estará marcada por las relaciones de servidumbre de, y con, la tierra. Se atraviesa por un proceso de desurbanización: como consecuencia de las invasiones se produjo en todas partes la decadencia de las ciudades, y nacen nuevas formas de relación social y de producción. Entre los siglos V y VII la economía feudal, cuya base es la tierra y cuya unidad es la aldea, será la nota distintiva, aunque el sistema feudal aparecerá plenamente desarrollado, con sus jerarquías políticas y religiosas, en el siglo XI, momento a partir del cual comienzan a consolidarse las monarquías feudales. La expresión intelectual y administrativa de este sistema será la Iglesia, cuyo orden y unidad permitían contrarrestar las tendencias anárquicas de los nobles y, sobre todo, ofrecerán a toda la cristiandad una base común de autoridad. En una sociedad ruralizada e inculta el clero va a desempeñar dos funciones principales: por una parte, al tratarse de la única minoría formada intelectualmente, ya desde las invasiones intentará evangelizar a los pueblos germanos a través de la prestación de servicios solicitados por los nuevos dirigentes. Principales consejeros y confidentes, la conversión de

15 La ciencia árabe no llegó a alcanzar el nivel de las especulaciones de la filosofía jonia o de la imaginación geométrica de la escuela alejandrina, pero los árabes lograron crear una ciencia viva en la que, por ejemplo, ampliaron la base de las matemáticas, la astronomía y la medicina griegas, iniciaron las técnicas del álgebra y la trigonometría, y sentaron las bases de la óptica.

los miembros de esta nueva sociedad se logrará mediante la conversión de aquéllos¹⁶. Por otra, y por el mismo motivo, la Iglesia se erige en mecenas del saber a través de la creación y mantenimiento de escuelas.

El monacato cristiano ya había aparecido en Occidente a lo largo del siglo IV, y las órdenes monásticas empiezan a desarrollarse desde el siglo siguiente. Los monasterios se extienden rápidamente: pensados en principio para proporcionar un retiro a aquellos que deseaban apartarse del mundo a fin de alcanzar la santidad, son realmente centros económicos y culturales. En su primera vertiente los monasterios poseen tierras obtenidas por compras o por donaciones que se cultivarán con esmero, llegando a ser granjas modelos. Constituían núcleos agrícolas de importancia en ocasiones. En su segunda vertiente, más destacable para nuestros propósitos, son centros donde se desarrollan la lectura, la escritura, así como las bibliotecas y escritorios —salas donde los copistas reproducían los libros que se requerían para la comunidad monástica—. La finalidad principal de la educación era proporcionar la alfabetización necesaria para la vida religiosa, de tal manera que la realización de estudios seculares sólo tenía lugar si servía a propósitos sacros. El cultivo del saber, por tanto, tenía como límite la contribución a fines religiosos. La ciencia y la filosofía natural no estaban del todo ausentes, pero eran marginales, por las razones aducidas, en la actividad intelectual desarrollada por los monjes. En cualquier caso, en los inicios de la Edad Media la cultura religiosa desempeña, en lo que a contribuciones al movimiento científico se refiere, una labor indispensable de preservación y transmisión: los monasterios fueron transmisores de la alfabetización y de una versión de la tradición clásica que, aunque escuálida y puesta al servicio de la religión y la teología, se conservaba en un medio en el que la alfabetización y la erudición se encontraban amenazadas. Figuras como las de Boecio o Isidoro de Sevilla ilustran perfectamente esta combinación-asimilación de ambas corrientes. La investigación adopta nuevas formas y experimenta un cambio de enfoque: los temas principales son la interpretación bíblica, el gobierno de la Iglesia, la historia religiosa o el desarrollo de la teoría cristiana, todo ello aderezado con la recuperación de partes de la lógica y la metafísica griegas.

Esta vida monástica, en su vertiente conventual, proporcionará a las mujeres, a las que les está vedada la lectura y la escritura —fuentes de pecado y tentaciones—, acceso al estudio y la educación. El recinto del convento permite la instrucción y posibilita la erudición. Las abadesas con buena formación supervisaban la copia e ilustración de manuscritos, aunque las bibliotecas conventuales no fueran tan completas como las de los monasterios. Así, por ejemplo, en el siglo X, Roswita, monja de la abadía benedictina de Sajonia, deja constancia de los conocimientos matemáticos de la época. Pero entre las autoras medievales destaca sobre todo, en el siglo XII, Hildegarda de Bingen, la primera mujer de ciencia cuyas principales obras nos han llegado intactas. Éstas están dedicadas fundamentalmente a los aspectos teóricos y prácticos de la ciencia, en especial de la cosmología, pero también a los animales, las plantas y los minerales y su relación con el bienestar de la humanidad. Fuera de este espacio religioso sobresalen las *mulieres salernitanae*. La escuela médica de Salerno, donde estudiaron, enseñaron y ejercieron como médicas muchas mujeres, ya era famosa en el siglo XI por su práctica, investigación y enseñanzas, y tuvo un enorme impacto en el desarrollo de las facultades de medicina en el occidente cristiano. En esta escuela el protagonismo le corresponde sin duda a Trótula, de la que nos han llegado dos obras: *Passionibus mulierum curandorum*, y *Ornatum mulierum*.

16 Se produce así lo que podríamos denominar una constante histórica cuyas vicisitudes atravesará todo el período de la Edad Media: la alianza del trono y el altar.

A finales del siglo VIII la constitución del imperio carolingio —y posteriormente del romano-germánico— supone el primer intento de un gobierno centralizado en Europa occidental desde la desaparición del romano. Carlomagno aspiraba a fortalecer el Estado y la Iglesia, en franca pugna con la inestabilidad que había sido una constante en el continente desde las invasiones del siglo V, y para ello, además de políticas como las de fijar claramente las fronteras del reino, emprendió reformas educativas. Podría afirmarse, en tal sentido, que este emperador, con la introducción de las escuelas palatinas a principios del siglo IX, representa el primer movimiento general de recuperación intelectual de Europa. La estrategia fue, en efecto, importar sabios extranjeros para organizar una escuela de palacio, y ordenar el establecimiento de escuelas monásticas y episcopales en todo el reino. La finalidad era educar a la familia real así como proporcionar al reino funcionarios políticos y religiosos cultos. Alcuino (730-804) cooperará en este proyecto de mayor difusión de la educación, que verá sus frutos en figuras como las de Gerberto (siglo X) y Juan Escoto Erígena (siglo IX). En el primer caso nos encontramos con la recuperación y difusión de las artes liberales clásicas, especialmente la lógica aristotélica en la versión de Boecio y otras fuentes latinas, y en el segundo con tratados teológicos en los que se desarrolla el neoplatonismo del pseudo-Dionisio y se procura una síntesis de la teología cristiana y la filosofía neoplatónica.

Este movimiento de recuperación se detuvo por las nuevas invasiones de vikingos y normandos, aumentando la inseguridad, la decadencia del comercio y de la industria, y el debilitamiento del poder real. Durante los siglos XII y XIII, sin embargo, esta Europa primitiva y rústica que había estado encerrada sobre sí misma durante tanto tiempo experimentará una renovación política, social y económica. Después de las últimas invasiones se restablecen fronteras seguras. Los europeos se convierten ahora en agresores, empujando a los musulmanes fuera de España y enviando ejércitos de cruzados para recuperar y defender la Tierra Santa. A partir del siglo XII emergen también monarquías más fuertes y centralizadas frente a la nobleza feudal, monarquías capaces de reducir el nivel de desorden y de violencia internos y que contarán con el apoyo de los habitantes de unas ciudades que vuelven a resurgir. Esta estabilidad política propiciará el crecimiento económico y el aumento de la riqueza.

La expansión económica se debió, fundamentalmente, a los avances en el mundo campesino, que repercutieron en el desarrollo mercantil y urbano: una serie de condiciones climáticas favorables¹⁷, la aparición de nuevas técnicas de trabajo y la conquista de nuevas tierras para el cultivo, posible a su vez por la aplicación de dichas técnicas, provocarán cambios importantes en el mundo rural que darán lugar a una mayor productividad de la tierra. Las innovaciones en la agricultura, como el cultivo rotatorio, y la invención del arnés del caballo, el nuevo arado de vertedera, y el arado de ruedas produjeron un importante crecimiento en la producción de alimentos que repercutió directamente en la explosión demográfica —mano de obra abundante y posibilidad de realizar actividades distintas de las agrarias. La extensión de la economía monetaria al campo, a su vez, impulsó el comercio de los productos agrícolas. Todo ello se traducirá en un lento proceso de emancipación de los campesinos frente a los señores feudales: a partir del siglo XII empiezan a desarrollarse, al lado de las comunidades rurales, las comunidades urbanas, en las que básicamente los artesanos y comerciantes intentan oponerse a las obligaciones contraídas con el señor de la ciudad. Como ya señalamos, a este proceso de independencia no fueron ajenos los intereses de los reyes, que vieron en estas comunidades un excelente apoyo para el fortalecimiento de la monarquía frente al poder de

17 Del siglo IX al XIII Europa occidental disfruta de un clima más cálido y seco que el habitual que favorecerá la roturación de los bosques y permitirá, a su vez, un mejor cultivo de los cereales.

los señores feudales. El renacer de las ciudades, con su auge mercantil y económico, no sólo proporcionará oportunidades económicas y permitirá la concentración de la riqueza, sino que estimulará también el crecimiento de las escuelas y de la cultura occidental. Dicho de otro modo: las ciudades se convierten en el principal agente de cambio social de la época, tienen una gran importancia política, y serán un elemento impulsor del conocimiento¹⁸ al menos en tres direcciones: en primer lugar, en una especie de proceso de retroalimentación, favorecen y se ven favorecidas por el desarrollo comercial e industrial, que incluye las innovaciones técnicas. Éstas pueden no repercutir directamente en el avance de la ciencia, pero sí pueden ejercer influencia en el modo de concebir la relación con la naturaleza así como en el papel que la experiencia y la experimentación desempeñan, o no, en dicho avance. En segundo lugar, permiten, aunque dentro de las limitaciones de la época, la fluidez más rápida y eficaz de la información, con el consiguiente aumento del número de personas letradas. Pero sobre todo, facilitaron que este aumento se diera fuera de la Iglesia, al tiempo que proporcionaron refugio a clérigos de órdenes menores, como los maestros de artes en las universidades, por ejemplo, que terminarán formando el bando de los filósofos en las polémicas con los teólogos en los siglos XIII y sobre todo XIV. En tercer lugar, serán fundamentales para el desarrollo de las universidades y su paulatina separación de la Iglesia.

Desde el punto de vista político, este renacimiento de las ciudades se ve acompañado por la creación y desarrollo de las formas de gobierno en la propia ciudad, principalmente de los municipios o concejos. Pero también lucharán los burgueses por participar en los órganos de gobierno de cada Estado, en el que intervienen a través de la curia o cortes, organismo del que también formaban parte los nobles y el clero. Los distintos estamentos sociales intervienen en el gobierno de las naciones, a la vez que se fortalecen las monarquías en un proceso en el que han de enfrentarse a una nobleza que no está dispuesta a perder sus privilegios y al poder de la Iglesia, hasta entonces legitimadora y depositaria de la autoridad real. En efecto, la vinculación del poder civil al eclesiástico fue un fenómeno típicamente altomedieval. El Papa recibía de Dios el poder temporal y espiritual y transmitía el primero de ellos al emperador. La guerra de las investiduras nos muestra la confrontación entre el imperio y el papado: no se tratará tanto de quién tiene la potestad de nombrar obispos cuanto de la pugna entre el poder secular y el eclesiástico, cuyo resultado será el debilitamiento y separación de ambos. A lo largo del siglo XIII y, sobre todo, del XIV, la decadencia general que supuso la liquidación de ciertas formas de vida feudales —la propia Iglesia tenía una organización feudal— traerá consigo la crisis de la teocracia pontificia¹⁹. En este sentido podemos distinguir dos vertientes o líneas de desarrollo en torno a la Iglesia que, aunque estrechamente interrelacionadas, confluirán en esta crisis que con el exilio de Avignon, y sobre todo con el Cisma de Occidente, suponen la claudicación del poder de aquélla frente

18 En general se acepta que existe una estrecha relación entre la educación y la urbanización: la ciencia, y la cultura en general, son fenómenos esencialmente urbanos. Así, podemos apreciar cómo la desaparición de las antiguas escuelas estuvo asociada con el declive de la antigua ciudad, mientras que el fortalecimiento educacional, o el impulso al conocimiento, se siguen rápidamente de la reurbanización de Europa en los siglos XI-XIII.

19 Los compromisos de la Iglesia con una economía rural la habían colocado, a partir del siglo XII, en oposición a los intereses de la sociedad secular de los mercaderes y artesanos de las nuevas ciudades. Así, a pesar de los esfuerzos realizados por las órdenes mendicantes y predicadoras —frailes dominicos y franciscanos—, los dos últimos siglos de la Edad Media presenciaron el debilitamiento claro de la Iglesia bajo la mirada de las florecientes ciudades y el creciente poder de los reyes (perderá gran parte de su capacidad de intervención directa en las monarquías).

al temporal de los monarcas. La primera está relacionada con el auge de las ciudades —y el desplazamiento de la población que comporta— y la evolución de las escuelas monásticas, que cambian y se modifican adaptándose a esta nueva realidad hasta concluir con la aparición de las universidades. La segunda, asociada a la lucha de poder a la que hemos hecho referencia, plantea cómo se despliega dicha lucha en el campo mismo del saber.

II.a. Las ciudades y la evolución de las escuelas monásticas: la universidad

Al menos hasta el siglo XIII la Iglesia tenía, a través de sus monjes y sacerdotes, el monopolio práctico de la enseñanza —incluso del saber leer y escribir. La escuela de la Edad Media inicial se caracterizaba por ser una escuela monástica, rural, aislada del mundo secular y con objetivos educativos reducidos. Con la reurbanización y el consiguiente desplazamiento de la población a las ciudades en los siglos XI y XII salen de la sombra de las escuelas monásticas escuelas urbanas de varios tipos: escuelas episcopales, las dirigidas por el clero parroquial, escuelas públicas que no estaban directamente relacionadas con las necesidades eclesíásticas sino que estaban abiertas a quienes pudieran costearlas, y escuelas catedralicias. Éstas, en concreto, son escuelas llevadas por clérigos en la ciudad que inicialmente tienen como finalidad la formación de otros clérigos, pero que luego, al hilo del desarrollo de las ciudades, formarán también a laicos. Su importancia radica en que es en el seno de estas escuelas donde podemos localizar el comienzo de las universidades, que constituyen en un principio sociedades privadas sin competencias académicas, pero con cierto reconocimiento de las autoridades civiles y eclesíásticas, y están formadas por gremios escolásticos —al modo de los gremios de artesanos— en los que se agrupan comunidades de «escolares». Los objetivos educativos de estas nuevas escuelas eran, evidentemente, más amplios que los de las monacales, y aunque el énfasis del programa docente podía variar de una a otra, en general ampliaron y reorientaron el curriculum a fin de satisfacer las necesidades prácticas de un auditorio que no sólo ocuparía puestos en la Iglesia sino también en el Estado. Esta ampliación y reorientación del curriculum están presentes también en las escuelas catedralicias, en las que la enseñanza se organizaba en tres niveles: el primero abarcaba el estudio del latín, las Sagradas Escrituras, y el canto de los servicios religiosos; el segundo integraba las denominadas Artes Liberales, en las que se distinguían el *Trivium* (gramática, retórica y lógica o dialéctica) y el *Cuadrivium* (geometría, aritmética, música y astronomía); el tercero, finalmente, estaba dedicado a la filosofía, dividida en cuatro ramas: la teórica (matemáticas, física, y teología), la práctica (ética o moral), lógica (análisis del discurso fundamentalmente) y mecánica (diferentes habilidades técnicas, desde la medicina a la navegación o la agricultura). Algunas de estas escuelas llegaron a adquirir un enorme prestigio que motivó, por un lado, que recibieran a estudiantes procedentes de toda Europa; y, por otro, que obtuvieran un reconocimiento por parte del Papado o de los reyes que las acreditaba para el reconocimiento, a su vez, y a nivel europeo, de los títulos que otorgaban. En cualquier caso, esta ampliación y reorganización del curriculum se verán acompañadas de dos características que heredarán las universidades propiamente dichas: se produce un esfuerzo decidido por recuperar y dominar tanto a los clásicos latinos como a los griegos disponibles en las traducciones latinas, asumiendo que las fuentes recuperadas tenían su lugar junto a la Biblia y los libros de los padres de la Iglesia —ambos saberes no son incompatibles—; y se detecta un acusado giro «racionalista» en el sentido de intentar aplicar la razón a muchas áreas de la actividad humana. Esta confianza en la capacidad intelectual humana incluirá su aplicación a los estudios bíblicos y a la teología²⁰.

20 Sobre las relaciones entre razón y fe, eje articulador de nuestro relato, volveremos posteriormente.

La extensión del reconocimiento citado llevará a la fusión de estas escuelas y las sociedades de escolares integradas en ellas, dando lugar a la constitución de las universidades propiamente dichas: asociación o corporación de profesores («maestros») y estudiantes²¹. Entre sus objetivos destacan el autogobierno y el control de la enseñanza, esto es, independencia de factores e interferencias externas y capacidad para gestionar los asuntos internos²², objetivos que irán alcanzando gradualmente, sobre todo si se tiene en cuenta que surgen en un momento en el que la pérdida de autoridad papal y las disputas entre filosofía y teología constituyen el caldo de cultivo en el que se desarrollan. A lo largo del siglo XIII se aseguran su independencia intelectual y económica frente al gobierno eclesiástico externo. La universidad se presenta, también frente al poder político, como un centro de estudio dedicado a la búsqueda del saber que no admite más que su propia autoridad en lo que a esa búsqueda se refiere. Así, por ejemplo, reclaman el derecho a fijar el curriculum, establecer los horarios, conceder grados, y determinar a quién se le permitirá estudiar o enseñar. El curriculum, de hecho, se modifica respecto al de las escuelas, pues se entiende que las artes liberales ya no proporcionaban un marco adecuado y suficiente para concebir la misión de la universidad. La enseñanza se articula entonces en dos niveles formados por cuatro facultades: en el primero, el nivel inferior, figura la facultad de artes liberales o filosofía. Este nivel era común y prerequisite para poder acceder a los restantes estudios; en el segundo, el nivel superior, están las facultades de medicina, leyes y teología, por orden de importancia. Las distintas universidades diferían en la especialización —no todas contaban desde sus inicios con todas las facultades—, pero llegan a desarrollar un curriculum común en el que están presentes las mismas materias enseñadas a partir de idénticos textos, lo que supone que por primera vez se da un esfuerzo educativo de alcance internacional por parte de estudiosos que son conscientes de su unidad intelectual y profesional. Se ofrece una educación superior estandarizada que difundirá una metodología y una visión del mundo.

La independencia y autonomía de esta nueva institución no significan, sin embargo, que la teología no siga siendo el fin último o el elemento unificador general al que están sometidas las distintas ramas del saber o la misma búsqueda del conocimiento: el sistema de creencias que emerge de la investigación integra el contenido del saber griego y árabe en las afirmaciones de la teología cristiana. Pero lo cierto es que la universidad del siglo XIV constituye un marco de relativa libertad de pensamiento dentro de la sociedad medieval: las contribuciones más originales de la Edad Media a la filosofía y a la ciencia surgen y se desarrollan en ella²³.

II.b. La *autoritas* eclesiástica y la libertad de pensamiento

Esta especie de «equilibrio precario» entre la *autoritas* eclesiástica y los nuevos defensores del saber que aspiran a obtener y disfrutar de la libertad de cátedra nos proporciona

21 Las universidades, por tanto, no fueron fundadas sino que surgen gradualmente a partir de las escuelas preexistentes. Este hecho explica que los estatutos que las acreditan como universidades y por los que se regirán, ya como tales, aparezcan posteriormente: Bolonia lo obtiene en el año 1150, París en el 1200, y Oxford en el 1220.

22 La organización interna se hace necesaria sobre todo a medida que las universidades van aumentando su tamaño.

23 Curiosa o paradójicamente, el papel que desempeña la universidad en este siglo no traspasará las fronteras del mismo. En el siglo XV habrá decaído intelectualmente, convertida en un espacio cerrado en el que no habrá lugar para el pensamiento original. Foco de la actividad intelectual europea en el siglo XIV, se convertirá en guardiana del saber establecido y en barrera para todo tipo de progreso cultural en el XV.

el espacio desde el que abordar la segunda línea de desarrollo en torno a la Iglesia, estrechamente relacionada con la anterior, que muestra el modo en que se despliega la lucha de poder en el campo mismo del saber. La reforma gregoriana establecía que el Papa ostenta la auténtica y plena autoridad espiritual sobre la Iglesia. El emperador posee un poder equivalente en el plano temporal, pero la autoridad espiritual es superior a la temporal. El clero, por tanto, está subordinado obligatoriamente a los príncipes gobernantes, pero la obediencia absoluta se la deben a la ley canónica y al Papado. Esta regla o prescripción de la doble subordinación ejercerá una enorme influencia sobre las disputas acerca de las relaciones entre razón y fe, y afectará también a la interpretación del aristotelismo, en el sentido siguiente: la obligación de obedecer, excepto en casos de conflicto entre ambos, a los príncipes gobernantes —el poder secular— y a la autoridad eclesiástica, siendo el Papa la autoridad suprema, exige probar la complementariedad —o al menos la no contradicción— entre razón y fe, aunque ésta sea siempre prioritaria sobre aquélla, lo que significa, a su vez, que debe justificarse racionalmente el conflicto entre poderes, si es que surge. En tal caso, dado que la autoridad espiritual es superior a la temporal, y la fe a la razón, el conflicto sólo puede atribuirse a un uso erróneo del poder. Complementariedad, en este contexto, se traduce en la posibilidad de una conciliación que, de no darse, inclina la balanza del lado de la fe, que es la única depositaria de la verdad. La interpretación de Aristóteles y la prohibición de la enseñanza de doscientas diecinueve de sus tesis (la lista también incluía quince o veinte proposiciones extraídas de las enseñanzas de Tomás de Aquino) han de verse a la luz de este principio y de los esfuerzos denodados por parte de la Iglesia por mantener la supremacía del Papado. Frente a las tendencias radicales y liberales que quieren extender el alcance, pero también asegurar, la autonomía de la filosofía, en especial de la aristotélica, la teología establece por decreto cómo es el mundo físico. La condena del obispo de París en 1277, que hacía de la enseñanza de las tesis prohibidas una base suficiente para la excomunión, constituye una enérgica declaración de la subordinación de la filosofía a la teología. Sin embargo, esta victoria conservadora sólo fue provisional, ya que se siguió leyendo y comentando a Aristóteles a pesar de la condena²⁴, iniciándose la crisis de la síntesis tomista entre el aristotelismo y la doctrina católica. La ciencia pagana sólo dejaba de ser una amenaza si la Iglesia podía seguir manteniendo su liderazgo intelectual a través de la integración de las concepciones que procedían de aquélla, pero, como muestra la condena, esta integración no puede limitarse a una superposición del saber profano y la teología: los textos antiguos y los sagrados deben modificarse al unísono a fin de lograr un nuevo dogma cristiano coherente. No obstante, la consecución de este objetivo, que vendría dado por la recuperación de la síntesis tomista por parte de la Iglesia como la doctrina oficial, llegará tarde, pues en el siglo XIV la reacción contra la filosofía de Tomás de Aquino y contra la filosofía natural de Aristóteles ya habrá propiciado el desarrollo del nominalismo, la teoría de la doble verdad, o la teoría del ímpetus.

En este sentido también se ha asociado a la condena, como consecuencia suya, el desarrollo y la utilización por parte de los filósofos naturales del modo «hipotético», que consistía en el razonamiento y discusión sobre proposiciones cuya verdad o falsedad había sido decidida previamente por la Iglesia —se podía incluso considerar la verosimilitud de la posición contraria—, pero teniendo en cuenta que las conclusiones alcanzadas eran sólo ejercicios de la imaginación. Este modo de razonamiento y discusión constituye un desarrollo específico de

24 Destaca en este sentido, como una muestra más del conflicto que se está produciendo entre los poderes eclesiástico y secular, que distintos monarcas proporcionen asilo a los condenados por interdicto papal.

los comentarios de las obras griegas, que adoptan la forma de *quaestiones* en las que, a partir de la cita de un texto, se planteaban y resolvían temas o problemas de la filosofía natural. En el siglo XIV, sobre todo en aquellos sectores más próximos al empirismo y al nominalismo, dichas *quaestiones* se expresarán en el modo condicional o hipotético. El punto de partida, como acabamos de señalar, es una hipótesis contraria a la aceptada como válida, a la que le siguen los argumentos principales a su favor hasta alcanzar una conclusión que no se ajusta a tales argumentos sino a la concepción aceptada dado que la finalidad no es demostrar la falsedad de ésta. Planteados los razonamientos sólo de manera hipotética, como simples ejercicios dialécticos, resulta sin embargo innegable que estos ejercicios posibilitan una forma peculiar de libertad de pensamiento en medio de las férreas restricciones que imponen el dogma y la autoridad eclesiástica²⁵.

III. La recuperación y traducción del saber clásico

Los distintos contextos considerados en las páginas precedentes constituyen el marco en el que van a desarrollarse la filosofía y la ciencia medievales. Este desarrollo se vertebra, como apuntamos al comienzo de nuestra exposición, en torno a la recuperación y recepción de la filosofía y la ciencia antiguas, y a su asimilación, incorporación y articulación en la concepción del mundo de la época, formada fundamentalmente por la doctrina cristiana. Así, las disputas sobre las relaciones entre la fe y la razón, y el curso que seguirán las mismas, sólo pueden apreciarse y comprenderse a la luz de esa recuperación y recepción y su posterior articulación con el dogma cristiano y la teología. ¿Cuáles son las obras antiguas disponibles en la Edad Media y cómo afectará al pensamiento cristiano medieval el contacto con ese saber pagano?

Durante los primeros siglos de la era cristiana los trabajos científicos que encontramos en Occidente son comentarios y enciclopedias. Como ya hemos comentado, la división del Imperio Romano y las invasiones bárbaras, que suponen su caída en Occidente, conllevan la pérdida de la cultura clásica. Se pierde esta tradición, el conocimiento de la lengua griega, y el contacto físico con sus textos originales —el fondo documental que recogía dicha cultura y posibilitaba su transmisión no estaba disponible—. Boecio, Beda, o Isidoro de Sevilla preservaron parte de la ciencia antigua: algunos de los tratados de lógica de Aristóteles y parte de los teoremas más importantes de Euclides²⁶. Sus compilaciones son imprecisas, además de intelectualmente adulteradas, pero cumplían con su labor de preservación y transmisión. Las condiciones de la época, además, unidas al desarrollo de la doctrina cristiana y a la defensa de su fe contra el saber pagano no propiciaban precisamente un acercamiento o un interés por aquellas formas de conocimiento, ya fuera filosófico o científico, distintas del ofrecido por la revelación y las Sagradas Escrituras. Con todo, ya desde estos comienzos, como vimos en el caso de Agustín de Hipona, los apologistas cristianos promueven una *razonada* defensa de la fe —la razón puede aplicarse a la teología—, y Boecio inspirará el esfuerzo de los eruditos de la Edad Media inicial por aplicar la lógica aristotélica —precisión y alcance— a los problemas teológicos. Así, hasta los siglos X y XI estos dos autores serán los puntos de referencia en lo que a la cultura clásica se refiere, lo que explica que al

25 Oresme, Buridán o Alberto de Sajonia figuran de manera destacada entre los que desarrollan este tipo de razonamiento.

26 Véase en este mismo volumen los artículos de Elena Díez, «Ciencia y método en Aristóteles», y Pablo Melogno, «Los Elementos de Euclides y el desarrollo de la matemática griega» (*comps.*).

menos hasta el siglo XI se diera una cierta proximidad entre el platonismo, ya fuera en su versión neoplatónica o en la cristianizada por Agustín, y la cultura cristiana.

Esta situación experimenta un giro radical a partir del siglo XI. El contacto con el mundo musulmán, tanto militar como comercial, la expansión de los reinos cristianos en el sur de España, y la conquista de Sicilia por los normandos supondrán el hallazgo de, y el encuentro con, el acervo antiguo, traducido, cultivado e investigado por los árabes. Elemento fundamental para este giro es la creación de las escuelas de traductores de Toledo y Sicilia. El trabajo de traducción realizado en ellas posibilitará el acceso a casi todas las grandes obras de la Antigüedad (Aristóteles, Ptolomeo, Arquímedes, Apolonio, Hipócrates, etcétera) y también a numerosos tratados árabes (Avicena, Averroes, Al-Fargani, etcétera). Este contacto con el saber árabe conlleva un caudal de conocimientos clásicos mucho más rico que el que se había conservado en Occidente. En el siglo XI comienza con unas cuantas obras, pero se convierte en una verdadera avalancha a partir del XII, momento en el que el grueso de los clásicos griegos y árabes se tradujeron al latín, la mayoría a partir del árabe pero algunas directamente del griego¹. El siglo XIII estará dedicado a la labor de estudio, comprensión, revisión y escrutinio de todo este cúmulo de nuevos conocimientos: había que adaptarse a ellos, conocerlos, determinar su significado, organizarlos, resolver sus contradicciones y, no menos importante, aplicarlos a, y articularlos con, los intereses intelectuales existentes². Dicho de otro modo: la amplitud y el alcance, el poder intelectual y su utilidad eran características que justificaban el enorme atractivo que poseían los textos traducidos, pero no se podía olvidar que su origen era pagano y que sus contenidos podían llegar a ser teológicamente dudosos o problemáticos. En cualquier caso hay que subrayar que esa labor no sólo se ve motivada por la novedad misma —y el atractivo— del conocimiento sino también por la concurrencia de una serie de aspectos que afectarán al contenido y a la calidad de las traducciones.

En primer lugar, los escritos se recuperaron fragmento a fragmento siguiendo un orden aleatorio y azaroso; la disponibilidad y el azar guiaban la selección de los textos a traducir, lo que explica la presencia, junto a las obras de los grandes autores greco-árabes, de otras de astrología, magia, o de las del Pseudo-Aristóteles. En segundo lugar, la fiabilidad de las traducciones se ve amenazada por el carácter indirecto de las mismas dado que en la mayoría de los casos la cadena desde el original griego incluía griego, siríaco, árabe, castellano y latín³. Y también afectaría a dicha fiabilidad la interpretación de los términos técnicos en el sentido de que el latín medieval, el último eslabón de la cadena, no disponía en principio de un vocabulario adecuado a estas nuevas, pero también abstractas y técnicas, materias. En tercer lugar, los manuscritos árabes rara vez guardaban una fidelidad total a sus fuentes griegas o siríacas. Las interpolaciones parecían ser la norma, con lo cual, puesto que afectaban al resultado final, el problema que se genera es el de identificarlas en los textos. Y en cuarto lugar, tal como apunta Kuhn (1985:147), toda esta tarea de recuperación e interpretación del erudito medieval se ve complicada, además, por la ausencia de perspectiva histórica.

1 En Toledo, donde se llevaron a cabo la mayor parte de las traducciones, éstas se hicieron generalmente del árabe, aunque algunas del griego, y abarcaban prácticamente todas las áreas del saber. En Sicilia, en cambio, la traducción directa del griego era la norma.

2 Para algunos autores el hecho de que los cristianos medievales dediquen todo este siglo a esta labor de aprendizaje puede explicar la ausencia de contribuciones científicas en ese período. Así, será en el siglo XIV, una vez asimilado el conocimiento redescubierto, cuando puedan aparecer los análisis detallados, las críticas, y las aportaciones medievales originales.

3 A esto se añade que el trabajo de traducción normalmente lo realizaban varias personas, siguiendo esta cadena, con lo cual los errores no eran infrecuentes.

La voluntad de llegar a construir un sistema de conocimiento amplio y coherente como el heredado de la Antigüedad supuso obviar que en su proceso de elaboración la ciencia griega había conocido críticas, contradicciones y hasta equívocos⁴. La dificultad en este caso radica precisamente en la percepción del saber antiguo como un sistema unitario, homogéneo y sin fisuras. De este modo, dichos equívocos y contradicciones sólo eran atribuibles a errores de transmisión o a defectos de la traducción. En ese conjunto que constituye la sabiduría antigua no se distinguen tradiciones de pensamiento distintas, lo que lleva, a su vez, a considerar, por ejemplo, que Aristóteles y Ptolomeo son casi contemporáneos. Como señala Kuhn (1985: 149): «uno y otro aparecen como exponentes de una misma tradición —la de ‘la antigua sabiduría’— y las diferencias existentes entre sus respectivos sistemas se convierten prácticamente en contradicciones internas dentro de un mismo cuerpo doctrinal».

Inicialmente el objetivo de las traducciones, y lo que guiaba la selección de lo que se traducía, era la utilidad en un sentido amplio. En los siglos X y XI aquéllas se centran en la medicina y la astronomía. A principios del XII el acento recae en la astrología y en los tratados matemáticos necesarios para la práctica de la astronomía y la astrología. El *Timeo*, traducido en su totalidad, y convertido en texto central, configurará la agenda y el contenido de la filosofía natural⁵. Hacia la mitad de este siglo hacen su aparición el *Almagesto* y *Las Hipótesis de los planetas* de Ptolomeo, los *Elementos*, la *Óptica* y *Catóptrica* de Euclides y a finales del mismo, y a lo largo del XIII, el interés se desplaza hacia las obras físicas, cosmológicas y metafísicas de Aristóteles y sus comentaristas (*Avicena* y *Averroes*), que se incorporan al programa de estudios de las universidades⁶. Los tratados técnicos sobre matemáticas, óptica, astronomía, o medicina tuvieron una recepción entusiasta porque en muchos casos cubrían un vacío intelectual. Sin embargo, en aquellas áreas relativas a la cosmología, la física o la metafísica —en las que eran centrales las obras del *Estagirita* y sus comentaristas— la recepción, lejos de ser entusiasta, estará marcada por las dificultades dado que afectaban a la visión del mundo —teología; esto es, venían a ocupar un terreno ya ocupado: lo invadían.

IV. La asimilación de la filosofía y la ciencia antiguas: la polémica razón y fe

En la gran tarea de justificar el orden divino del universo a la ciencia medieval le correspondía sólo una parte, ya que las características principales de aquél venían dadas por la revelación y se apoyaban en la razón: en la lógica abstracta y en la filosofía. Esto es, el conocimiento científico era sólo una pieza, junto a la revelación, de una sabiduría integral que debía contemplarse y emplearse al servicio de Dios. El esquema de la salvación, del que la Iglesia era custodia y poseedora con sus sacramentos y tradiciones, no admitía comparación con ningún otro tipo de conocimiento humano. La finalidad, por tanto, era construir una grandiosa imagen del mundo, a través de la organización de todo el conocimiento y la experiencia, que incluyera esencialmente todo aquello que fuera importante para el hombre. En tal sentido, la jerarquía de la sociedad quedaba reflejada y reproducida en la del universo

4 Los equívocos y las contradicciones, además, habían adquirido mayor visibilidad a raíz de los textos de los comentaristas griegos y árabes, que algunas veces fueron recuperados al mismo tiempo que los textos griegos, pero otras incluso antes.

5 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melgón, «Astronomía y Física en Platón» (*comps.*).

6 Además de los trabajos ya consignados, puede revisarse en este mismo volumen el artículo de Cristián C. Carman, «La teoría planetaria de Claudio Ptolomeo» (*comps.*).

mismo: papas, obispos, arzobispos, reyes y nobles tenían su correlato en la jerarquía celestial de los nueve coros angélicos. El supuesto subyacente es que cada una de ellas desempeñaba una función concreta en el funcionamiento del universo, en el que todos los elementos estaban en orden⁷. Este cosmos, esta imagen del mundo, armonizaba las conclusiones mejor establecidas por los antiguos desde el punto de vista lógico con las verdades incuestionables de las Escrituras y de la tradición eclesiástica, de tal manera que cualquier ataque a una de sus partes se interpretaba como una ataque a la totalidad del orden social, religioso, o del mismo universo. La recepción de la cultura clásica, por tanto, debía pasar por su asimilación y articulación en esta imagen del mundo. La disputa entre la razón y la fe, o entre la filosofía y la teología, constituye el eje en torno al cual girarán aquéllas.

En el siglo XI, antes de que se hiciera sentir plenamente el impacto del saber árabe, las disputas de las escuelas se despliegan alrededor del problema central de proporcionar una base para la fe en la razón; o, dicho de otro modo, de lograr la reconciliación de los escritos de los padres de la Iglesia con la lógica de los griegos. Esta aplicación de la razón a la teología, sin embargo, no era nueva: como ya señalamos, los apologistas cristianos más antiguos, como Agustín, abordaron una razonada defensa de la fe, y los eruditos de la Edad Media inicial, inspirados por Boecio, se esforzaron continuamente por aplicar la lógica aristotélica a los problemas teológicos. En el siglo XI estos esfuerzos adquieren un matiz distinto. La prueba ontológica sobre la existencia de Dios de Anselmo de Bec y Canterbury, cuyo programa racional será ampliado por Pedro Abelardo, para quien el camino hacia la creencia pasa por la duda, son ejemplos de los extremos a los que podían llegar los filósofos en la aplicación del método filosófico. El objetivo era razonar sobre la fe y en apoyo de la fe, pero en la obra de ambos pueden apreciarse ya los elementos de una confrontación entre aquélla y la razón. En el siglo XII comienza a extenderse una nueva concepción de la naturaleza como una entidad autónoma y racional en el sentido de que procede sin interferencias de acuerdo con sus propios principios. La idea de orden o de ley natural conlleva la determinación de averiguar en qué medida los principios naturales de causalidad podían ofrecer una explicación satisfactoria del mundo. Esta determinación, sin embargo, debe combinarse perfectamente con la idea de que Dios actúa por medio de poderes naturales, con lo cual la tarea del filósofo es conducir estos poderes hasta su límite explicativo. La estabilidad del orden natural, así, no ponía en cuestión la omnipotencia y la libertad divinas dado que se argumentará de la siguiente manera: Dios es absolutamente libre para crear el tipo de mundo que desee, pero de hecho eligió crear el que tenemos, por lo que, una vez creado, no va a alterar el resultado⁸. La filosofía parece iniciar su lucha por abandonar su estatus de sierva.

Esta aspiración se verá truncada y frustrada con la prohibición, en 1277, de la enseñanza de la filosofía de natural de Aristóteles dentro de las facultades de artes. El giro racionalista que los defensores del nuevo aristotelismo imprimían a sus investigaciones suponía ampliar el alcance de la actividad racional, de la explicación naturalista y de la demostración aristotélica a todos los campos del intelecto y del saber, incluido el teológico. Pero el Aristóteles

7 Dicho de otro modo, el orden quedaba garantizado en la medida en que cada elemento conocía su lugar y había un lugar para cada elemento.

8 Dentro de la infinidad de posibilidades que tenía disponible, Dios eligió crear este mundo, y puesto que Dios es consistente, podemos confiar en que —salvo raras excepciones— se ajustará al orden así establecido. De esta manera podemos afirmar que, a efectos prácticos, el poder absoluto de la divinidad queda restringido al acto de la creación, con lo cual se salvaguarda la omnipotencia divina más absoluta sin sacrificar el tipo de regularidad que requiere la filosofía natural.

recuperado —fundamentalmente su cosmología— debía pasar por el filtro del pensamiento cristiano dado que la concordancia entre algunas de sus afirmaciones filosóficas y cosmológicas y la doctrina de la Iglesia no sólo no era clara sino que presentaba puntos realmente conflictivos⁹. En concreto, la eternidad del mundo como característica del cosmos aristotélico, el determinismo y su concepción de la naturaleza del alma chocaban directamente con la doctrina cristiana. En el primer caso un mundo eterno supone una naturaleza autosuficiente en la que no tienen cabida la creación de la materia desde la nada por parte de un ser superior, ni las intervenciones extraordinarias del mismo en forma de milagros. La absoluta dependencia del universo creado respecto de Dios era, sin embargo, fundamental para las concepciones cristianas de Dios y del mundo. En el segundo, el determinismo afecta a las relaciones entre el Creador y la creación: el universo aristotélico no sólo no tiene un lugar para los milagros sino que, asociado a teorías astrológicas, si se podía demostrar que los cielos ejercían su influencia sobre la voluntad, entonces la libertad humana de elección (entre la salvación y el pecado) se veía amenazada, pero también la libertad y omnipotencia divinas. En el tercero, la concepción del alma como forma cuya existencia no puede darse independientemente de la materia es absolutamente incompatible con la enseñanza cristiana sobre la inmortalidad del alma¹⁰. La tarea a realizar, ante esta situación, es examinar y «purgar» las obras aristotélicas de todo error sospechoso. Dado que su influencia no puede erradicarse, se trataría de averiguar el modo de domesticarla, de analizar los puntos conflictivos y negociar sus límites de modo que la filosofía aristotélica trabaje a favor del cristianismo. Había, en definitiva, que reconciliarlas.

El proceso de reconciliación, en el que las órdenes mendicantes de dominicos y franciscanos —que desarrollaron lealtades filosóficas diferentes y enfoques característicos del problema de la fe y la razón— jugaron un papel fundamental¹¹, había conducido hasta entonces a dos planteamientos alternativos en lo que a la influencia del aristotelismo se refiere. Por una parte, el tomista, en virtud del cual razón y fe se complementan de tal manera que, aunque se le concede prioridad a la segunda, no pueden entrar en conflicto si la primera se ejerce rectamente. La filosofía aristotélica y la teología cristiana, aunque metodológicamente distintas, son vías compatibles hacia la verdad. Las dos vías pueden llevar a verdades diferentes, pero no contradictorias. La filosofía sigue subordinada a la actividad teológica, pero presta servicios vitales a la fe: ha demostrado su utilidad y fiabilidad. El mundo tiene una naturaleza racional, pero la libertad divina no se ve limitada por el determinismo implícito en el aristotelismo. Por el contrario, es la libertad divina la que limita las verdades necesarias que rigen la estructura del mundo. En tanto que la racionalidad forma parte de

9 En las décadas finales del siglo XII y en las primeras del XIII el principal comentador de Aristóteles es Avicena, que presentaba una versión del mismo platonizante. La disponibilidad de la obra de Averroes, en cambio, significó un retorno a una versión menos platonizante y más auténtica de su filosofía.

10 La prohibición de 1277 también condenaba, por desafiar la libertad y omnipotencia divinas, la proposición según la cual las causas secundarias son autónomas, de modo que continuarían actuando aunque la primera causa, que es Dios, dejara de participar; la proposición astrológica que afirmaba la influencia de los cielos en el alma y en el cuerpo; y las relativas a lo que supuestamente Dios no puede hacer porque así ha quedado demostrado en la filosofía aristotélica: haber creado más universos, mover los cielos del universo porque detrás quedaría vacío, o crear un accidente sin sujeto.

11 Las dos órdenes mantienen posiciones contrarias en las discusiones teóricas de la época: la relación entre razón y fe, el problema de los universales, el aristotelismo y el platonismo, la naturaleza de las cualidades, etcétera, pero coinciden en la confianza que, a partir del siglo XII, le otorgan al pensamiento racional como una forma de resolver problemas. Acorde con ello propiciarán una «racionalización» de las polémicas y considerarán que el universo tiene que explicarse en términos de causas naturales.

las características básicas de la divinidad, dichas verdades están dadas, y la filosofía y la ciencia pueden descubrirlas racionalmente. El principio fundamental es que no puede haber verdadero conflicto —si lo hay es más aparente que real— entre la teología y la filosofía porque la revelación y nuestras capacidades racionales son ambas dones divinos. Al mismo tiempo, en la medida en que el mundo es una creación divina, precisamente por ello tiene una estructura que puede ser conocida y comprendida racionalmente. Esta actitud, defendida por los dominicos y dominante en el siglo XIII, supone —y contribuye por tanto a— que podemos aceptar la ciencia clásica porque la explicación racional de la realidad que proporciona no es incompatible con el dogma cristiano. Como apunta D. C. Lindberg (2002: 296), la solución que Tomás de Aquino le da al problema de la relación entre fe y razón consiste en cristianizar el aristotelismo y «aristotelizar» el cristianismo¹². Por otra parte, nos encontramos con el planteamiento averroísta, que prioriza la racionalidad sobre la fe en cuestiones de conocimiento. Razón y fe tienen, cada una, su propio ámbito y, en concreto, en lo que al conocimiento del mundo se refiere, el máximo criterio le corresponde a la razón. Así, aunque haya proposiciones o tesis, como las citadas en las páginas precedentes, que contradigan o entren en conflicto con el dogma cristiano, no se puede dudar de ellas o dejar de aceptarlas si han sido suficientemente demostradas. La radicalidad de este planteamiento dará lugar, a raíz de la condena, a la teoría de la doble verdad: las esferas de la razón y la fe están absolutamente separadas, por lo que si se produce un conflicto entre ellas podrá considerarse que las posiciones de ambas son igualmente verdaderas.

Después de la prohibición, sin embargo, el planteamiento más generalizado será esta separación pero con la balanza inclinada indiscutiblemente hacia el lado de la fe. Lo que caracteriza y define de un modo esencial a la divinidad es la voluntad o la libertad, no la racionalidad. Partiendo de este supuesto no hay motivo alguno para pensar que la estructura del mundo es racional en el sentido de estar sometido a verdades necesarias que la razón pueda descubrir. Más allá de los fenómenos empíricos no tenemos porqué pensar que posee una estructura inmutable cognoscible, con lo cual a la razón no le es posible conocerla en su totalidad, del mismo modo que es incapaz de dirimir entre las distintas explicaciones posibles que pudieran dar cuenta de los fenómenos. La sustitución de la racionalidad divina por la voluntad o la libertad implica que, en efecto, el mundo es como es y tiene las propiedades que tiene porque Dios así lo decidió o lo quiso —si hubiera querido o decidido crear otro distinto tenía poder para hacerlo—, con el añadido de que si, además, quisiera cambiarlo en cualquier momento, nada, excepto la ley de no contradicción, limitaría su libertad o voluntad. La fe, por tanto, se erige en el criterio último no sólo en cuestiones teológicas y vitales sino también en las filosóficas puesto que la propia uniformidad de la naturaleza, en la que se sustentan las leyes científicas, depende en última instancia de la libre voluntad de Dios¹³.

12 Aunque posteriormente la síntesis tomista se convertirá en la doctrina oficial de la Iglesia, en el momento en que Tomás la desarrolla se sitúa en la vanguardia de la fracción progresista de los teólogos, lo que hace que sea considerado por los más conservadores como un radical peligroso.

13 Esta posición, que será la predominante a lo largo del siglo XIV, es la defendida por los franciscanos, entre los que podemos destacar, aunque no poseen una línea unitaria, a R. Bacon, Buenaventura, Duns Scoto y Guillermo de Ockham. Más voluntaristas que racionalistas, su racionalismo se ve aderezado por un cierto misticismo —la influencia de Agustín y de cierta tradición platónica— o por el empirismo. Asumen la separación tajante entre razón y fe, ya sea porque priorizan a la segunda, ya sea porque consideran que son absolutamente distintas y cada una tiene su propio ámbito, y, sobre todo, al negar cualquier tipo de determinismo dada la importancia fundamental de la voluntad y la libertad divinas,

Como señala Sánchez (1995: 120), lo paradójico de esta posición radica en que no sólo no implicó una paralización de la investigación científica sino que, por el contrario, impulsó el desarrollo de la misma al menos en tres sentidos. En primer lugar, desaparece la justificación teórica del aristotelismo puesto que si la voluntad divina controla y determina en términos absolutos la naturaleza de la realidad —no hay verdades necesarias racionales—, entonces se abre la posibilidad de criticar la filosofía natural aristotélica, de formular alternativas y, aunque en forma de juegos de la imaginación, hasta de analizar y discutir cuestiones que, de haberlo querido Dios, podían haber ocurrido (la existencia de una pluralidad de universos, el movimiento en el vacío, etcétera). En segundo lugar, esta posibilidad representa un impulso para los estudios y discusiones metodológicas, el análisis de la naturaleza y la función que desempeña el conocimiento científico y, de modo sobresaliente, contribuye —dado que dejan de postularse esencias o especies imponderables como las causas necesarias de los fenómenos— al desarrollo de métodos que se aplican a fenómenos empíricos específicos¹⁴. En tercer lugar, y casi como corolario, se produce un desplazamiento desde la filosofía natural tradicional hacia el estudio empírico y cuantitativo de la naturaleza y se propicia el desarrollo del nominalismo.

IV.a. Los universales y el desarrollo del nominalismo

Este desarrollo tiene lugar a raíz de la polémica sobre los universales, que constituye un subproducto o un desarrollo específico de la disputa entre razón y fe. Tradicionalmente se la ha considerado como típicamente metafísica, pero esto significa obviar, por un lado, que desde el punto de vista de la lógica en este momento se procura hacer del tema de los universales una cuestión lógica, no metafísica, lo que se traduce en un tratamiento semántico del mismo; y, por otro, que la polémica misma, sobre todo con el desarrollo del nominalismo, sugiere y plantea cuestiones metodológicas y filosóficas relativas a la ciencia, a sus conceptos, y a su naturaleza —algunas de las cuales hemos presentado en el apartado anterior—, que serán decisivas para la aparición de las contribuciones específicamente medievales a la filosofía y a la ciencia en el siglo XIV.

El origen de la disputa se retrotrae a unos comentarios de Boecio sobre los planteamientos de Aristóteles acerca de la naturaleza y el estatus ontológico de los nombres comunes y de las ideas o formas universales. El problema radica en determinar cómo se relacionan éstas con los objetos individuales, los números, y la mente del sujeto del conocimiento. Siguiendo de nuevo a Sánchez (1995: 118) podemos distinguir tres posiciones al respecto: el realismo fuerte, dominante hasta el siglo XII, el realismo moderado, imperante en el XIII, y el nominalismo, que incluiría al conceptualismo y al nominalismo propiamente dicho. En el primer caso se afirma la separación de las ideas universales, definidas como ideas eternas, de las entidades particulares, y su existencia real pese a que no sean directamente observables. Ontológicamente previas a las cosas concretas —*universalia ante rem*—, éstas deben su especificidad —su ser como son— a que participan de ellas¹⁵. En el segundo caso se pos-

ven en el estudio de la experiencia el punto de partida para el conocimiento de la naturaleza, que es por tanto contingente y falible.

- 14 Entre otros, la utilización de la cuantificación de cualidades para medir la intensidad de la luz según el ángulo de incidencia y la distancia, o la velocidad uniformemente acelerada.
- 15 Posición platónica, Agustín la adaptará al cristianismo considerándolas ideas eternas que están en la mente de Dios, de tal forma que la materia, y los objetos concretos, sólo son simples sombras de las mismas.

tula también la existencia real de las ideas universales, pero su existencia difiere de la de los objetos particulares y concretos en el sentido de que no disfrutan de una existencia separada sino que subsisten en ellos —*universalia in re*¹⁶. Así, mientras que la experiencia es la que nos proporciona el acceso a lo material concreto, la razón y la abstracción nos conducen hacia lo universal. En el tercer caso se niega esa existencia real de dichas ideas: son conceptos, simples nombres o abstracciones de las entidades concretas —*universalia post rem*. Si ponemos el acento en la acepción de concepto nos encontramos con el conceptualismo, según el cual los universales son conceptos racionales cuya existencia es mental y cuyas propiedades dependen de las reglas internas de la racionalidad o de la misma estructura racional del mundo. El nominalismo estricto, por el contrario, representado principalmente por Ockham, subraya la acepción de nombre o abstracción: se trata de simples nombres o de abstracciones de semejanzas entre los objetos individuales que utilizamos, a modo de abreviaturas, para designar tales semejanzas. Esto es, dado que sólo existe lo individual concreto, las ideas universales sólo tienen como referentes otros nombres.

Desde la perspectiva inaugurada por la polémica se abre la posibilidad de plantear una serie de cuestiones, en principio derivadas de esta discusión acerca de la naturaleza de los universales, que son relevantes, como decíamos, para la ciencia: en primer lugar podemos interrogarnos acerca del estatus y naturaleza de sus leyes, hipótesis y conceptos y sobre las vías de acceso a las mismas, por ejemplo, la experiencia, la experimentación, o la abstracción; sobre la racionalidad de la estructura del mundo y la capacidad de la ciencia para explicarla y, unido a ello, sobre la explicación y justificación del modo en que clasificamos la naturaleza. En este contexto de análisis, y en segundo lugar, tendrían cabida planteamientos como los relativos al carácter de la física y la matemática y su conexión, si la hubiera, y a la naturaleza de la geometría y el lenguaje en el sentido de si poseen una significación esencial o, por el contrario, pueden concebirse desde un punto de vista convencionalista; la cuantificación o medición de las cualidades, la necesidad o posibilismo de los constructos científicos, y el análisis de la causalidad, que abarcaría tanto la existencia misma de causas, los métodos de descubrimiento de las mismas, o el modo de proceder en las explicaciones —si se ha de recurrir a causas esenciales, a causas eficientes, o sólo a descripciones sobre la ocurrencia de los fenómenos. Muchas de estas cuestiones obtienen respuesta y adquieren sistematización en el pensamiento de Ockham, a partir del cual abordaremos las que podemos considerar las dos aportaciones fundamentales del pensamiento medieval a la ciencia y la filosofía: el análisis de las variaciones de intensidad de las cualidades y movimientos, y la teoría del ímpetus.

Para Ockham el conocimiento se deriva de la experiencia directa, sin la interposición de conceptos ni formas. Dado que la creación y el tipo de mundo que tenemos sólo dependen de la libertad de Dios, no necesitamos suponer la existencia de esencias o naturalezas comunes que se «realicen» en los individuos. La semejanza entre éstos permite la formación de conceptos universales de los mismos, así como la utilización de nombres generales, pero su referencia se limita a dichas semejanzas o a otros conceptos. Esto es, el sujeto supone y construye la coherencia o la estructura racional de los hechos singulares, que son lo único real. En el proceso de conocimiento, por tanto, tenemos dos momentos: uno primero en el que están esos hechos, que son lo único real y sólo pueden ser experimentados; y otro segundo

¹⁶ Esta subsistencia de lo universal en lo concreto, por otra parte, es lo que sigue determinando la especificidad, en el sentido señalado de ser como es, del mismo.

en el que, a partir de ellos, se abstraen semejanzas que carecen de realidad objetiva¹⁷. Este núcleo del que parte Ockham se concreta y despliega en tres direcciones perfectamente definidas e interrelacionadas: la navaja de Ockham, la definición de causa inmediata y el probabilismo. La primera es un principio de economía y simplicidad de entidades y explicaciones en virtud del cual para proporcionar una explicación no tenemos que postular la existencia de más entidades que las necesarias para ello, así como debemos preferir siempre, entre explicaciones alternativas, aquella que es más sencilla; respecto a la segunda, la posibilidad de estas explicaciones alternativas apunta a que, en efecto, podemos disponer de explicaciones diferentes para un mismo fenómeno. De igual modo, el mismo efecto puede darse por causas diferentes, lo que implica que las conexiones causales sólo pueden determinarse en casos concretos. La causa inmediata, por tanto, es aquella de cuya presencia se sigue el efecto —si no se da la primera no se dará el segundo, permaneciendo todo lo demás igual. Si concurren causas alternativas la observación o la experimentación permitirán discriminar entre ellas. El supuesto subyacente es que la única relación entre la causa y el efecto de la que podemos tener evidencia es la que proporciona la asociación empírica entre sucesos: sólo las causas inmediatas son reales¹⁸. Respecto a la tercera, y de acuerdo con lo anterior, a la filosofía y a la ciencia sólo les compete ofrecer explicaciones probables, no necesarias, lo que garantiza la disponibilidad de explicaciones distintas para un mismo fenómeno y autoriza a la búsqueda de otras nuevas —si se ha de elegir entre ellas el criterio será optar por la más probable a la luz de la experiencia y el principio de economía. El probabilismo avala y fundamenta, así, la utilización de los supuestos *secundum imaginationem*, lo que vimos en las páginas precedentes como el desarrollo de las *quaestiones* según el modo hipotético. No tenemos que comprometernos con la realidad física o la posible aplicación de las explicaciones posibles: basta con imaginar todo tipo de posibilidades en el análisis de los fenómenos. Todo ello proporciona la base sobre la que se sustentan la teoría del ímpetus, las discusiones de Oresme acerca de la inmovilidad de la Tierra, y los análisis de las variaciones de intensidad de las cualidades y los movimientos.

V. El análisis de la intensificación y la disminución de las cualidades

La cuantificación de las cualidades es considerada como uno de los logros más importantes de la ciencia del siglo XIV y, retroproyectivamente, como el primer paso hacia la construcción de la física matemática. La tarea fue realizada por un grupo de lógicos y matemáticos asociados al Merton College, en Oxford: T. Bradwardine, J. Dumbleton, W. Heytesbury y R. Swineshead, los también denominados mertonianos o calculadores de Oxford. El objetivo de su trabajo era encontrar un método adecuado que hiciera posible la cuantificación de las cualidades, y el punto de partida, lo que denominaron el problema de la intensificación y disminución de formas y cualidades, que surge a raíz de las críticas de Ockham y los nominalistas al tratamiento que Aristóteles ofrece de las cualidades.

Aristóteles distingue el cambio cualitativo, el cambio cuantitativo, y el cambio de lugar (movimiento local), y considera que aunque la cualidad y la cantidad son, así, tipos de cambio, no están relacionadas ni pueden combinarse. El cambio cuantitativo consiste en la

17 La distinción de Ockham entre «la ciencia real», formada por aquellas proposiciones que versan sobre particulares, y «la ciencia racional», integrada por aquellas teorías en las que los nombres sólo representan abstracciones, se corresponde perfectamente con estos dos momentos.

18 Las causas finales aristotélicas, según este criterio, no son susceptibles de prueba alguna.

adición o sustracción —aumento o disminución— de partes homogéneas, pero de tal modo que todas las partes que se suman o se restan poseen las mismas propiedades y atributos y son idénticas entre sí. Esto es, en el proceso de adición o sustracción la entidad sometida a cambio no ve alterada su identidad esencial ni el conjunto de propiedades que la identifican como tal y la hacen ser como es. El estado final de dicho proceso contiene el estado inicial, si es de aumento, o está contenido en él si es de sustracción. En el cambio cualitativo, por el contrario, aunque la entidad en cuestión conserva dicha identidad, se produce la pérdida de una propiedad y la ganancia de otra. Este tipo de cambio, por tanto, no se debe al aumento o disminución de partes homogéneas.

Para Ockham lo que se deriva de esta concepción es una multiplicación de especies y atributos absolutamente innecesaria. Las cualidades o formas pueden existir en varios grados o intensidades, de lo que se sigue que hay una escala de intensidades dentro de la cual aquéllas pueden variar —pueden experimentar intensificación y disminución—. La idea de Ockham es que la intensidad de una cualidad puede ser medida en grados numéricos. De este modo las diferencias reales podrían reducirse a diferencias en cantidad, y la intensidad de una cualidad podría medirse de la misma forma que la magnitud de una cantidad. Las diferencias cualitativas, así, serían diferencias de la estructura geométrica, del número o del movimiento¹⁹.

Los mertonianos asumen el reto de Ockham y, en la búsqueda de un método que permitiera la cuantificación de las cualidades, se centran en el estudio del movimiento, lo que favorecerá el desarrollo de la cinemática a través de la definición de conceptos fundamentales tales como los de movimiento uniforme o aceleración; proceden al análisis en términos de distancia y tiempo, y utilizan matemáticas en vez de geometría. El análisis general de las cualidades, de su intensificación y disminución, se transfiere así al caso específico del movimiento local —el movimiento se concibe como una cualidad o como algo análogo a ésta— y en tal transferencia aparece enseguida la idea de velocidad. La intensidad de la cualidad del movimiento —lo que mide su fuerza o grado— no podía ser más que la velocidad, y la intensificación y disminución de esa cualidad debe hacer referencia entonces a la variación de la misma²⁰. La velocidad, que sería la variable dependiente, se explica en una función algebraica de distancia y tiempo, las variables independientes²¹. El método utilizado para la consecución de este objetivo de la cuantificación es «el álgebra de palabras», de Bradwardine, que consiste en la utilización de letras del alfabeto para sustituir a las cantidades de las va-

19 Ockham aplica su navaja a la concepción misma del movimiento. A fines del siglo XIII había dos posiciones principales, y alternativas, respecto a la determinación de si existe el movimiento y, en caso afirmativo, qué tipo de cosa es. La primera, defendida por él, se denomina *forma fluens*: el movimiento no es una cosa separada o distinguible del cuerpo en movimiento sino el cuerpo en movimiento y sus sucesivos lugares; esto es, ninguna entidad adicional está presente. La palabra «movimiento», por tanto, sólo denota el *proceso* por el que un objeto llega a ocupar lugares sucesivos, es un término abstracto, un nombre que no corresponde a ninguna entidad realmente existente: el movimiento no es una cosa. El mundo en el que éste no es una cosa existente es más económico porque contiene menos entidades, con lo cual estamos autorizados a considerarlo como el mundo real a menos que haya argumentos convincentes en contra. La segunda, denominada *fluxus formae*, considera, por el contrario, que además del cuerpo en movimiento y de esos lugares ocupados sucesivamente por él, hay alguna *cosa* inherente al cuerpo en movimiento que podemos llamar «movimiento».

20 Los mertonianos en realidad desarrollan un marco conceptual y un vocabulario técnico para tratar el movimiento cinemáticamente; en ambos están incluidas las ideas de velocidad y de velocidad instantánea tratadas como conceptos a los que hay que asignar una magnitud.

21 Para Aristóteles la velocidad no era una magnitud sino una cualidad que no admite medición dado que ello implicaría combinar dos magnitudes, distancia y tiempo, no comparables.

riables —mientras que las operaciones se describen con palabras—. Se evita de este modo, al recurrir a las letras, el problema aristotélico relativo a la imposibilidad de combinar cantidades no comparables, al tiempo que nos encontramos con uno de los primeros intentos conscientes de introducir, aunque a niveles todavía muy básicos, un formalismo algebraico.

Este método será perfeccionado por el resto de los calculadores, quienes aplicándolo al estudio de estas proporciones en distintos campos —luz, calor, movimiento local— pretenden expresar, como apuntamos antes, los grados en que aumenta o disminuye una cualidad respecto a una escala fijada previamente. En este contexto distinguen entre la intensidad y la extensión de una cualidad. En términos generales, con el término «forma» se refieren a cualquier cualidad —o cantidad— variable en la naturaleza. Así, la intensidad (*intensio*) de una forma es el valor numérico que hay que asignarle, mientras que la extensión (*extensio*) de una forma es otra forma conocida con respecto a la cual puede variar la velocidad con que cambia la intensidad de la primera²². De acuerdo con ello definen una serie de conceptos formulados como formas de cambio a fin de aplicarlos a la velocidad con la que cambia cualquier *intensio*: cambio uniforme (movimiento uniforme), cambio disforme (aceleración), cambio uniformemente disforme (uniformemente acelerado), cambio disformemente disforme, y velocidad instantánea. El primero se produce cuando se recorren distancias iguales en intervalos sucesivos de tiempo iguales; el segundo cuando se recorren distancias desiguales en intervalos de tiempo iguales; el tercero alude al movimiento en que se adquiere un incremento igual de velocidad en cualquier intervalo igual de tiempo; el cuarto, a incrementos desiguales de velocidad en tiempos iguales; y por último, la velocidad instantánea: la distancia recorrida por un punto en movimiento si ese punto fuera impulsado uniformemente durante un período de tiempo con la misma velocidad que poseía en ese instante.

Junto a estas definiciones enuncian lo que se conoce ahora como «el teorema de la velocidad media» o «el teorema de Merton», cuya prueba o demostración geométrica la ofrecerá Oresme. El teorema trata de hallar una medida del movimiento uniformemente acelerado comparándolo con el movimiento uniforme, y afirma lo siguiente: un cuerpo que se mueve con un movimiento uniformemente acelerado recorre la misma distancia, en un tiempo dado, que si se hubiera movido en el mismo tiempo con una velocidad uniforme igual a su velocidad media. Se equiparan, de esta forma, un movimiento acelerado y un movimiento uniforme al expresar la distancia recorrida por el primero en términos de la recorrida por el segundo.

El análisis de las cualidades se enriqueció y clarificó con la adición de un sistema de representación geométrica, que será el segundo método empleado para la cuantificación de aquéllas. Este método geométrico procede de la universidad de París y se debe a Oresme. En este caso la extensión se representa mediante una línea recta horizontal —longitud— y cada grado de la intensidad de la cualidad, mediante una línea vertical de altura determinada —latitud—. La línea que une los extremos de las verticales determina la velocidad y el modo de cambio de la intensidad. La finalidad de este método gráfico de representación es construir figuras que representen la cantidad de la cualidad de manera que las propiedades de las figuras representen propiedades intrínsecas de la cualidad. Así, por ejemplo, la velocidad uniforme será representada por una figura en la que todas las líneas verticales son de igual longitud —un rectángulo. La demostración del teorema de Merton procede entonces

22 Por ejemplo, podemos fijar la *intensio* de la velocidad, y la velocidad con la que cambia, por referencia a la *extensio* de la distancia y el tiempo.

de la siguiente manera: como las áreas de las figuras resultantes del movimiento uniforme y del uniformemente acelerado son iguales, ambos movimientos tienen que ser equivalentes²³.

VI. La teoría del ímpetus

La otra contribución medieval del siglo XIV es la teoría del ímpetus, desarrollada por filósofos de tradición nominalista en París, entre los que destacan Oresme y sobre todo Buridán. El punto de partida lo encontramos, nuevamente, en el tratamiento aristotélico del movimiento. Como señalamos en el apartado precedente, Aristóteles entiende el movimiento local como uno de los tipos de cambio, y distingue a su vez dos tipos de movimiento absolutamente diferentes: el movimiento natural y el movimiento violento. En el primer caso el movimiento viene marcado por la propia naturaleza del cuerpo —la causa es intrínseca— y en virtud de la misma, según su composición a partir de los cuatro elementos, será rectilíneo ascendente o descendente²⁴. El movimiento natural, así, es el movimiento de los cuerpos hacia su lugar natural. La naturaleza es causa de inicio y de cese de movimiento: se activa cuando un cuerpo está en un sitio distinto del que le corresponde (según su ligereza o pesantez) y se convierte en causa de reposo cuando se encuentra donde debe, en su lugar natural. En este tipo de movimiento la velocidad de un cuerpo es proporcional a su peso e inversa a la resistencia del medio; y el tiempo es proporcional a ésta e inverso al peso²⁵. En el segundo caso, se produce cuando se empuja o arrastra al cuerpo, apartándolo de la trayectoria que seguiría si nada interfiriera. Puede darse, por tanto, en cualquier dirección dado que depende del agente externo impulsor, de lo que se sigue que es un movimiento regido por causas eficientes externas. Y precisamente porque la causa es externa se da una diferencia esencial entre causa y efecto, y la primera debe estar permanentemente en contacto con el segundo porque de no ser así, el efecto cesaría. El problema que se plantea entonces es explicar la continuación del movimiento después de que un cuerpo deja de estar en contacto con la fuerza impulsora pues, de acuerdo con lo anterior, se requiere que la fuerza externa esté continuamente en contacto con el móvil. Aristóteles atribuye el papel causal al medio: cuando el móvil se separa del motor, que proporciona la fuerza impulsora para su movimiento en el primer instante, la continuación del movimiento se explica porque el motor comunica la fuerza impulsora al aire, que actúa como nuevo motor²⁶. Si la fuerza se debilita hasta el punto de no poder impulsar al cuerpo, el movimiento cesa inmediatamente. Esto es, el movimiento no es eterno dado que la fuerza impulsora se «disipa» o «desgasta» debido a la forma en que se transmite: el primer motor impulsa al objeto que mueve y al aire que se convertirá en nuevo impulsor; la primera fracción del aire impulsa, a su vez, a aquél y a la

23 Dado que en los diagramas de Oresme la distancia atravesada se mide a través del área de la figura, el teorema queda probado al mostrar que el área del triángulo, que es la figura que representa el movimiento uniformemente acelerado, es igual al área del rectángulo.

24 Dado que el la Tierra unos cuerpos caen sobre su superficie mientras que otros hacen lo contrario, Aristóteles atribuirá este comportamiento a la existencia de dos clases de naturaleza: las intrínsecamente pesadas y las intrínsecamente ligeras. Así, la ligereza es la tendencia al movimiento rectilíneo ascendente, y la pesantez, la tendencia hacia el movimiento rectilíneo descendente.

25 Esta fórmula y la cuantificación proceden del siglo XIV, porque para Aristóteles este principio es cualitativo.

26 La fuerza impulsora proyecta al móvil a la vez que dota al medio circundante del poder de producir movimiento. Este poder se transmite de una parte a otra de tal manera que el móvil está siempre rodeado por una porción del medio capaz de impulsarlo.

siguiente fracción del aire, y así sucesivamente, con lo cual se va produciendo una disminución progresiva de la fuerza impulsora hasta que es incapaz de mover a la siguiente fracción de aire, momento en que la causa externa deja de actuar cediéndole el paso al movimiento descendente natural. En el caso del movimiento violento, por tanto, la velocidad es proporcional a la fuerza impulsora e inversa a «la propia resistencia» del cuerpo²⁷.

En el siglo XIV se aborda de manera exhaustiva y detallada el estudio de los problemas e inadecuaciones presentes en la conceptualización aristotélica de este tipo de movimiento²⁸. El resultado será la teoría del ímpetus, inserta en la tradición aristotélica, evidentemente, pero alternativa. Los problemas detectados son los relativos a la indefinición aristotélica de la noción de resistencia propia, que imposibilitaba el medir con una mínima precisión el movimiento del objeto; la exigencia de que un medio resistente fuera imprescindible para que se produjera el movimiento, y que ese medio actuara simultáneamente como motor y como freno; y el supuesto según el cual si el movimiento se diera en el vacío tendría que ser infinito²⁹. La solución a los mismos consistirá en suponer, a fin de eliminar también la multiplicación de causas necesarias para explicar el movimiento violento en la teoría aristotélica, que la causa del movimiento de un objeto una vez que se separa del motor impulsor es una fuerza impulsora que se mantiene a lo largo del movimiento: el *ímpetus*. Cuando un motor pone en movimiento a un móvil, imprime en él un cierto ímpetus o potencia motriz en virtud del cual el movimiento se conservará —duraría indefinidamente— a menos que esa potencia vaya siendo destruida por la resistencia, que incluye la del medio y la tendencia natural del objeto. La magnitud de dicho ímpetus está en función de la cantidad de materia y de la velocidad del móvil³⁰. El ímpetus, además, es la misma entidad a lo largo de todo el movimiento, de lo que se sigue que si se eliminara toda resistencia el cuerpo se movería indefinidamente en la misma dirección y con velocidad constante. Esta posibilidad no admite consideración por la finitud del universo y la inexistencia real del vacío, pero sí permite explicar el movimiento circular indefinido de los planetas: puesto que los astros no se ven sometidos a ningún tipo de resistencia, se desplazan indefinidamente en círculos como consecuencia del ímpetus dado por Dios en el origen. De este modo, al considerar que el ímpetus es la causa del movimiento, la misma causa, en los mundo supralunar y sublunar aristotélicos, esta teoría establece la primera conexión entre ambos.

La capacidad explicativa del ímpetus se aplicará también a la aceleración en el movimiento natural, el otro problema de la teoría aristotélica. Los objetos que caen aceleran en su caída, luego se necesitaba una causa que diera cuenta de dicha aceleración. Para Buridán la causa de la caída de un cuerpo es su cantidad de materia, a la que denomina *gravitas*: a medida que

27 Utilizamos esta fórmula a efectos de simplicidad dado que, por una parte, el análisis aristotélico no es cuantitativo y, por otra, no usa la velocidad sino que da cuenta de este tipo de movimiento en términos de fuerza móvil o impulsora, cuerpo resistente, distancia recorrida y tiempo.

28 No obstante, la primera oposición importante a la explicación aristotélica provenía de J. Filópono, un comentarista del siglo VI que consideraba que el medio actuaba más como resistencia que como motor, y que era inconsistente pensar que pudiera desempeñar las dos funciones simultáneamente. Propuso entonces que la causa del movimiento es una fuerza incorpórea impresa al móvil.

29 El medio, que para Aristóteles es homogéneo, debe actuar como un medio resistente que frena el movimiento del objeto porque de no ser así el movimiento sería infinito, o casi, e instantáneo, lo cual es imposible —el rechazo aristotélico de la existencia del vacío tiene en este argumento su motivación principal.

30 Esto es, la potencia del ímpetus transmitido está determinada por la velocidad del cuerpo y su cantidad de materia, de manera que si un cuerpo más denso y pesado es impulsado con la misma velocidad que otro más ligero, el primero recorrerá más distancia porque puede recibir más ímpetu, así como retenerlo más tiempo.

un cuerpo cae, su gravitas genera continuamente un ímpetus adicional en él, y a medida que dicho ímpetus crece, produce un aumento de la velocidad. Este proceso es continuo: a cada nuevo instante se generan incrementos sucesivos de ímpetus que dan lugar a incrementos de velocidad, lo que explica la aceleración de la caída. En el movimiento natural, por tanto, el movimiento observado es el resultado de la intervención de la gravitas, el ímpetus y la velocidad. De este modo, como en el caso anterior en los planos terrestre y celeste, se vuelve posible conectar el movimiento natural con el violento. La teoría del ímpetus también permite considerar, al modo hipotético, la posibilidad del movimiento de la Tierra. Los medievales heredan y asumen un universo en el que una Tierra inmóvil ocupa el lugar central. Oresme insistirá, sin embargo, en que ningún argumento, sea lógico o físico, puede refutar la posibilidad de la rotación terrestre. Para Aristóteles la inmovilidad de la Tierra se deriva del hecho de que un objeto lanzado verticalmente hacia arriba siempre cae al suelo sobre su punto de partida. Si la Tierra se moviera, entonces ese objeto, al caer, se encontraría en el suelo en un lugar algo desplazado hacia el oeste, no en su punto de partida. Supongamos, sin embargo, que cuando un cuerpo abandona el contacto con la superficie terrestre, la Tierra, que actúa como motor, imprime en él, que es el móvil, el ímpetus responsable de que la acompañe en su movimiento circular. Desde este punto de vista, que es el que considera Oresme, el objeto comparte el movimiento circular de la Tierra incluso cuando viaja por el aire³¹, igual que compartiría el movimiento de una nave (si el hecho se realizara bajo la cubierta), con lo cual el fenómeno de la caída de los cuerpos tendrá lugar de la misma manera en una Tierra en reposo que en una en movimiento.

VII. A modo de conclusión: medievales y modernos

El análisis de la cuantificación de las cualidades y la teoría del ímpetus son un claro indicador del cambio que se ha producido en el siglo XIV respecto a la época anterior. Pero también se aprecian diferencias fundamentales respecto a los trabajos de los siglos XVI y XVII. El estudio de los problemas cinemáticos en Oxford es absolutamente teórico y procede sobre la base de las *quaestiones* al modo hipotético o los supuestos *secundum imaginationem*. Se trata de experimentos mentales que intentan explotar las distintas posibilidades abiertas por el desarrollo del nominalismo, con todas las consideraciones metodológicas que conllevaba y que afectan al desarrollo de la ciencia, pero no ponen en cuestión el orden aceptado y establecido. Del mismo modo, la teoría del ímpetus puede hacer pensar que se estaba dando una aproximación al moderno principio de inercia, o que se comenzaba a abandonar la dualidad aristotélica de los mundos supralunar y sublunar, pero no podemos olvidar que tanto los comentarios críticos a Aristóteles como los experimentos mentales de Buridán y Oresme no concluyeron en el abandono definitivo de Aristóteles ni en la afirmación del movimiento de la Tierra. Los argumentos presentados se integran en el espacio abierto a una cierta libertad de pensamiento, pero forman parte aún de una preocupación más teológica que científica. La teoría del ímpetus está presente en Galileo, pero él transforma radicalmente el concepto de ímpetu, que ya no es causa, sino efecto del movimiento³². A su vez, el aceptar que utilizó el vocabulario, los conceptos y teoremas de la cinemática mertoniana, no nos permite retrotraer la función metodológica y el estatus ontológico que las matemáticas tienen en Galileo a los

31 Considera que un proyectil lanzado verticalmente hacia arriba retorna al lugar desde el que fue lanzado debido a la descomposición de su movimiento en uno vertical y otro horizontal.

32 Véase en este mismo volumen el artículo de Godfrey Guillaumin, «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*).

oxonienses del siglo XIV, entre otras razones porque el interés de Galileo es que sus definiciones correspondan a los movimientos reales del mundo físico, mientras que a los filósofos de dicho siglo no les preocupa la relevancia empírica de sus afirmaciones.

Los cristianos medievales estudian, refinan, y hasta se distancian en algunos aspectos de Aristóteles, pero no abandonan los elementos aristotélicos fundamentales y, en consecuencia, siguen pensando que el método apropiado para conocer implica la demostración silogística, la deducción a partir de primeros principios que se consideraban evidentes. Es probable que buena parte de la evaluación a la que someten la filosofía aristotélica surgiera de las tensiones internas que apreciaban en ella, de su fracaso al explicar el mundo tal como era percibido por ellos, o de la necesidad de prestarle atención a las alternativas no aristotélicas —además de las motivaciones teológicas—, pero lo cierto es que la crítica tendió a ir por partes, no fue global, y no condujo a la demolición ni al derrumbe de dicha filosofía y de la concepción del mundo que incorporaba. Por tanto, aun siendo precursores en muchos aspectos de los desarrollos que vendrán posteriormente, los medievales siguen siendo medievales, demasiado medievales para ser modernos.

VIII. Bibliografía

- Alic, M. (1991 [1986]), *El legado de Hipatia. Historia de las mujeres en la ciencia desde la Antigüedad hasta fines del siglo XIX*, México, Siglo XXI.
- Benral, J. D. (1979 [1964]), *Historia social de la ciencia*, Barcelona, Península, v.1.
- Beltrán, A. (1995), *Revolución científica, Renacimiento e historia de la ciencia*, Madrid, Siglo XXI.
- Butterfield, H. (1982 [1952]), *Los orígenes de la ciencia moderna*, Madrid, Taurus.
- Crombie, A. C. (1974 [1959]), *Historia de la ciencia: de San Agustín a Galileo*. Madrid, Alianza. 2 v.
- Gilson, E. (1965 [1952]), *La filosofía en la Edad Media*, Madrid, Gredos.
- Grant, E. (1983 [1971]), *La ciencia física en la Edad Media*, México, FCE.
- Haskins, C. H. (1927), *Studies in the History of Medieval Science*, Cambridge, Harvard U. Press.
- Kuhn, T. S. (1985 [1958]), *La revolución copernicana*, Barcelona, Ariel.
- Lindberg, D. C. (ed.) (1978), *Science in the Middle Ages*, Chicago, U. Chicago Press.
- _____ (2002 [1992]), *Los inicios de la ciencia occidental*, Barcelona, Paidós.
- Pirenne, H. (1972 [1969]), *Las ciudades en la Edad Media*, Madrid, Alianza.
- Rioja, A. y Ordóñez, J. (1999), *Teorías del universo. De los pitagóricos a Galileo*, Madrid, Síntesis.
- Sambursky, S. (1990 [1962]), *El mundo físico a finales de la Antigüedad*, Madrid, Alianza.
- Sánchez, J. (1995), «Ciencia y filosofía en el siglo XIV», en *Tras los pasos del infinito matemático, teológico, físico y cosmológico*. Actas Seminario «Orotava» de Historia de la Ciencia, Sta. Cruz Tenerife, Encuentros.
- Vega, L. (1999), *Artes de la razón. Una historia de la demostración en la Edad Media*, Madrid, UNED.

6. De la Alquimia a la Química

I. Introducción

La palabra alquimia nos lleva a pensar, generalmente, en algo esotérico y misterioso, más relacionado con las ciencias ocultas que con las ciencias de la naturaleza y con lo que hoy entendemos como química. Asimismo, muchos científicos e historiadores han llegado a menospreciar la alquimia. Pero otros, incluso algunos muy ilustres, no han tenido esa actitud. Por ejemplo, para Justus von Liebig (1803-1873) la alquimia fue la inmediata precursora de la química porque produjo un sinnúmero de observaciones y de experiencias que desencadenaron procedimientos y técnicas que, a su vez, facilitaron el perfeccionamiento de esta última (von Liebig, 1851).

Cabe así formularnos esta pregunta, ¿son equivalentes los términos de alquimia y química? O, dicho de otra manera, ¿existen diferencias sustanciales entre los correspondientes conceptos a los que hacen referencia esos términos? Si así fuera, habría que descifrar los rasgos característicos de la alquimia, que ayudarán a marcar las diferencias y los puntos de convergencia entre ambas disciplinas.

La actividad química ha existido siempre, paralela a la vida del hombre, el cual desde sus primeros momentos aprendió a explotar los fenómenos químicos, a aprovechar las propiedades de los materiales que le rodeaban o a transformar éstos para su propio beneficio. Sin embargo, durante muchos siglos no ha habido una palabra específica para designar este tipo de trabajos, los cuales corresponderían a lo que hoy se conoce con expresiones tales como química práctica, química aplicada primitiva, química temprana o protoquímica (Multhauf, 1966: 14).

Esa química aplicada primitiva siguió «funcionando», pero además, en cierto momento de la historia surgió la alquimia. ¿Por qué? Para poder responder a esta cuestión habrá de analizarse en primer lugar en qué consiste, qué rasgos la diferencian de esa química práctica y qué factores provocan su nacimiento.

I.a. ¿Qué es la alquimia?

Puede definirse la alquimia, en términos generales, como la ciencia de la *transmutación* de los metales hasta llegar al oro, el metal perfecto. Éste sería en esencia el objetivo central de la alquimia, que también lleva asociada la búsqueda de la piedra filosofal y, frecuentemente, la

del elixir de la vida. Así, mediante técnicas y procesos de laboratorio el alquimista persigue la obtención de oro partiendo de metales comunes. Sin embargo, sus objetivos no se quedaban ahí. Si bien es cierto que la actividad alquímica conlleva una gran cantidad de trabajo experimental, trasciende de la mera actividad realizada en un taller. Está impregnada de un alto grado de espiritualidad, por lo que sus objetivos deben buscarse a mayor profundidad y, realmente, habría que situarlos en otros niveles: en tratar de dar respuesta a las eternas preguntas del hombre acerca de *cuál es el origen y el sentido de su vida, cuál es el origen y el sentido del universo*; en su tendencia hacia la perfección del alma humana, más que hacia la perfección de los metales; en un proceso mental, más que químico.

En este sentido, habría que distinguir dos tipos de alquimia, según sus objetivos, prácticas y rituales: la *exotérica* o material, que buscaría la perfección de nuestra materia y la *esotérica* o espiritual, que buscaría la perfección del espíritu.

Todas estas ideas enlazan con la hipótesis acerca de los metales propuesta por Mircea Eliade (1907-1986) en su libro *Herreros y Alquimistas* (1983). El hombre siempre se ha sentido subyugado por esos materiales que extraía de la tierra y cuya posesión le conferiría mejores instrumentos de trabajo y armas más eficaces ante sus enemigos. Creó una verdadera mitología sobre los metales, que persiste aún en tribus primitivas, según la cual se formarían en la tierra como en un proceso de gestación, pues irían creciendo como un embrión o semilla en el interior de aquella, que equivaldría a un vientre materno. Por esto también el trabajo de los metalúrgicos antiguos iba acompañado de determinados ritos y ceremonias, parecidos en cierto modo a los de un parto. Las prácticas alquímicas enlazan así con el mundo de los mitos del ser humano, razón por la cual la alquimia ha surgido en distintas culturas y diferentes medios geográficos, muchas veces de forma independiente —lo cual no implica que después hubieran tenido alguna intercomunicación—, coincidiendo en muchas de sus características, aunque no en todas.

Ya Aristóteles (384-322 a.C.) en su obra *Meteorológica* (1997) había propuesto esa explicación sobre el origen de los metales, defendiendo la idea primitiva de que los metales se gestan y desarrollan en el interior de la tierra. De esta manera, los metales menos perfectos van creciendo y evolucionando hacia los metales más perfectos o metales nobles, de los que el oro sería su máxima expresión. *¿Y por qué el oro?* Porque el oro, desde los primeros tiempos, atrajo la atención del hombre. Por su aspecto: era el metal más bello, por su brillo y su color. Por su incorruptibilidad: resistente a la corrosión de la intemperie, al fuego y a la acción de otros materiales. Símbolo además de riqueza y poder. Sería, pues, el metal por excelencia, el metal perfecto.

En consecuencia, podemos deducir de todo lo anterior que los metales han jugado un papel fundamental en el desarrollo de la alquimia y, en definitiva, en el de la química.

II. Alquimia en la Antigüedad

Dejaremos por ahora aparte las alquimias que surgieron en Extremo Oriente, en India y sobre todo en China, para centrarnos en la alquimia más próxima a nuestra cultura, que se inicia con la llamada alquimia *griega*.

II.a. Alquimia griega

Tal vez más correcto sería el nombre de alquimia *griego-egipcia*, ya que comienza en Egipto alrededor del 300 a.C., donde se va desarrollando, consolidándose como disciplina a

finales del siglo I d.C., para terminar hacia el 300 d.C. Es decir, abarca el periodo helenístico y enlaza después con la cultura romana. Por esto también se la conoce a veces como alquimia helenística. Se extiende pronto por el Mediterráneo oriental y después será captada por los árabes, que en el siglo XII la transmiten al Occidente cristiano.

II.a.1. Su origen

Su origen, desde el punto de vista geográfico, se sitúa en Egipto, concretamente en la ciudad de Alejandría, fundada en la desembocadura del Nilo por Alejandro Magno (356-323 a.C.) en el 331 a.C. tras la conquista de aquel país. Con su muerte, acaecida pocos años después, ese gran imperio se divide entre sus generales, correspondiendo los territorios egipcios a Ptolomeo. En Alejandría, capital de este reino, conviven los egipcios nativos con una población considerable de griegos, sirios y judíos. Su gran puerto atrae a los comerciantes y gentes de todas partes, con lo cual se va convirtiendo en un cruce de mercancías y conocimientos. Pronto llega a constituir el centro artístico y científico de Oriente, hegemonía cultural que se mantiene hasta el siglo I d.C. El Museo, fundado en ella por Ptolomeo (no «museo» como lo entendemos actualmente, sino en el sentido de universidad, como señala la palabra griega *museion* o lugar donde residían las musas, diosas inspiradoras de las artes, ciencias, música y poesía en la mitología griega), fue la institución de estudios científicos más importante del mundo antiguo, y su Biblioteca, la de mayor número de volúmenes de aquellos tiempos (más de 700.000 textos)³³. Por ello, ya en época romana el viaje a la ciudad de Alejandría se convertiría en fundamental para la formación de un médico (Multhauf, 1966: 2). El Museo de Alejandría se dedica a estudios de matemáticas, mecánica, óptica, astronomía, medicina y geografía, que eran consideradas como ciencias exactas, pero no hay evidencia alguna de que se practicara allí ninguna actividad relacionada con la química. Muy probablemente esto sea debido a que los griegos no daban a la ciencia de la materia la categoría de ciencia exacta, sino más bien la consideraban tan sólo un objeto de discusión o de especulación filosófica. Además, esta actividad era llevada a cabo no por griegos, sino por la población autóctona de esas tierras de Oriente, a los que los «cultos» griegos mirasen quizás con cierto menosprecio.

Efectivamente, en esa época —y desde hacía largo tiempo— se conocían gran número de sustancias químicas, sus propiedades y aplicaciones, y se llevaban a cabo muchos procesos de tipo químico, como cerámica, vidrio, tintes y, sobre todo, metalurgia. Es decir, existía una importante química aplicada. Y los secretos del arte de los metales o «arte sagrado», como lo llamaban, estaban en manos de los sacerdotes egipcios (sobre todo los de Menfis y Tebas), lo que sería una de las principales razones por las que se señala a Alejandría como cuna de la alquimia, según la teoría más extendida. Pero, si ya existía allí esa importante química aplicada, ¿qué tiene de diferente esa otra disciplina, la alquimia, que se desarrolla después en esa ciudad? Y, ¿por qué surge?

En aquellos momentos se dan una serie de circunstancias que favorecen el nacimiento de la alquimia. Su origen puede atribuirse en gran parte a la química práctica de la Antigüedad y, en realidad, en los primeros tiempos de la alquimia los límites entre ambas eran muy difusos. Pero además existen otra serie de factores, pues en Alejandría convergen la filosofía griega y las filosofías orientales, la astrología y el gnosticismo, unido todo ello a la magia, a la mística y al hermetismo, a lo cual hay que añadir después el cristianismo. Y este conjunto de

33 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno «Los Elementos de Euclides y el desarrollo de la matemática griega» (*comps.*).

ideas y doctrinas converge, a su vez, con el saber práctico en química aplicada, en el que los artesanos egipcios eran muy diestros. Por todo es importante conocer, al menos en síntesis, las más significativas de esas corrientes de pensamiento.

II.a.2. Corrientes de pensamiento en el nacimiento de la alquimia

Según Aristóteles, la materia sería algo informe y amorfo, sin ningún atributo. Sería como una *materia prima* a la que se le podría dar forma al comunicarle unas *cualidades* o *propiedades*, con lo que se obtendrían los distintos tipos de objetos. Habría cuatro cualidades fundamentales: calor, frío, sequedad y humedad. Y combinándolas de dos en dos se obtendrían los cuatro elementos de Empédocles (S. V a.C.): el *agua* resultaría de la combinación frío y húmedo; el *aire*, de húmedo y caliente; la *tierra*, de frío y seco, y el *fuego*, de seco y caliente (figura 1).

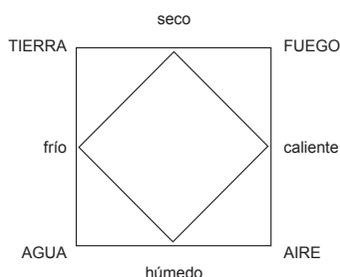


Figura 1. Las cuatro cualidades fundamentales y los cuatro elementos.

La *transmutación* consistiría, pues, en una transformación de las cualidades de las sustancias, pero no en lo que hoy en día se tiene por un cambio químico (es decir, un cambio en las proporciones de los elementos integrantes y nuevas disposiciones de los mismos, tomado el término «elemento» en el sentido actual del mismo). Esta sería la base ideológica para la idea de la transmutación de los metales, como se analizará posteriormente.

La *magia* ha sido practicada por todos los pueblos en mayor o menor medida, pero tomó cuerpo de doctrina en Persia con Zoroastro (aprox.1000 a.C.) e influyó en gran manera en el gnosticismo, hermetismo y neopitagorismo.

El *gnosticismo*, doctrina religiosa proveniente de Babilonia, se fundamentaba sobre unas bases que eran, por una parte, el dualismo entre lo bueno y lo malo, la luz y la oscuridad y, por otra, la creencia de que el conocimiento o *gnosis* («conocimiento», en griego) se alcanzaba únicamente a través de una iluminación interior y no por la fe ni la razón. Esta idea de la iluminación interior tuvo gran influencia en la alquimia y, a su vez, el gnosticismo estuvo muy influido por ésta en cuanto al lenguaje. Por ejemplo, para referirse a determinados tránsitos del alma humana utilizaba como metáforas los procesos de sublimación, destilación, refinado, purificación, filtrado... Por otra parte, como herencia de la astrología caldea, consideraba a los planetas como dioses, correspondiendo cada uno de esos dioses-planetas a uno de los siete metales conocidos por entonces (figura 2), idea que fue recibida y mantenida por la alquimia. Anterior al Cristianismo, el gnosticismo fue muy bien asimilado después por los primeros cristianos.

El *hermetismo* o doctrina hermética, era una mezcla de platonismo, estoicismo, astrología babilónica y religión egipcia, con lo que en definitiva intentaba reconciliar la filosofía griega con la astrología caldea y las tradiciones egipcias. Su denominación proviene de

Hermes Trimegisto o Hermes Tres-Veces-Grande, forma griega del dios egipcio de todo el saber escrito, *Thoth*, que había sido asimilado al Hermes de la mitología griega, dios de todas las artes. De él se decía que hacía milagros, con lo cual es comprensible que magos y astrólogos estuvieran bajo sus auspicios.

En cuanto al *misticismo*, englobaba una serie de prácticas religiosas y mágicas, en principio alejadas del cientifismo y con un alto grado de irracionalidad. Es uno de los mayores responsables de la atribución dada a la alquimia de pseudociencia, pues un importante grupo de alquimistas tendió a ir abandonando la observación y la experiencia para buscar el conocimiento por medio de la revelación religiosa y la magia.

Nace así la alquimia griega y se desarrolla paralelamente a la química práctica que, a su vez, continúa ejerciéndose, si bien ejecutada por otros actores.

II.a.3. Rasgos característicos de la alquimia

Además de la transmutación como aspecto central de la alquimia, ésta posee otros rasgos que la hacen totalmente diferente de la química práctica.

La teoría aristotélica sobre la naturaleza de la materia justifica la idea de la *transmutación* de los metales a oro. Cualquier metal podría convertirse en aquél: primeramente era necesario despojarle de sus cualidades, con lo que su materia básica quedaría libre y, después, se introducían en ésta las cualidades propias del oro (Holmyard, 1925: 14). La naturaleza sería la que «transmuta» la materia básica o materia primaria en los distintos objetos que percibimos. De esta manera, la transmutación a oro sería una *aurifacción*, la fabricación de oro, el oro «puro» de los alquimistas, un oro conseguido artificialmente, si bien sería indistinguible del oro natural.

Esta operación no debe confundirse con la de la *aurifacción*, llevada a cabo por los orfebres y que consistía en dar a ciertos metales la apariencia de oro, lo que en última instancia sería su falsificación. Los llamados *papiros químicos*, el de Estocolmo y sobre todo el de Leiden (aprox. 300 d.C.), contienen gran número de recetas de este tipo, muchas de ellas con fines abiertamente fraudulentos, de las que los orfebres y joyeros de Oriente Medio tenían gran conocimiento desde tiempos muy anteriores, incluso, a la escritura de esos papiros (Ihde, 1984: 11). Bien pensado, estas técnicas de dorar metales para conseguir que parecieran oro, en cierta manera estarían próximas a la aspiración suprema de los alquimistas de la transmutación de los metales. Cambia la apariencia del metal corriente, su *color*, para parecerse al oro. Es decir, cambia su cualidad. Y entonces, ¿no cambiaría también con ello su naturaleza y se transformaría en oro?

En esos cambios de *coloración*, el gran interés tanto de joyeros como de alquimistas, estaría muy probablemente el origen de las ideas y prácticas de éstos últimos. Para el artesano orfebre ése sería oro falso. Para el filósofo de la alquimia sería oro genuino y no una imitación. Por este motivo, el arte de la joyería ha contribuido de forma decisiva al surgimiento de la alquimia. Y, en consecuencia, al de la química (Esteban, 2005: 55). Tampoco se puede olvidar la aportación de la medicina, ya que los tratamientos de plantas y minerales para producir ungüentos y bálsamos condujeron a la obtención de muchos productos que se utilizaron en la alquimia. De hecho la palabra griega *pharmakon* se utilizaba para designar a los reactivos químicos. Y para el alquimista es importante el factor tiempo, porque todos los procesos requerían su tiempo, aunque la alquimia podía encontrar el medio para acelerarlos.

Para alcanzar su objetivo primario, la transmutación de los metales, el alquimista necesitaba no sólo realizar unas prácticas en el laboratorio, sino adquirir el conocimiento a través de la revelación o de la *iluminación*. El conocimiento alquímico no estaba, pues, al alcance

de cualquiera, sino sólo de los elegidos. Era un don de dios, *donum dei*, como se dijo después en la Edad Media. Y a los iniciados les estaba absolutamente prohibido divulgar los secretos que conocían. Tenían que hacer un juramento de silencio y si lo contravenían revelando algún misterio, el castigo era la pena de muerte por envenenamiento. El veneno que utilizaban era el cianuro, por lo que a este castigo se le llamaba la «pena del melocotonero», ya que de la destilación de sus almendras obtenían dicho veneno (curiosamente, éste era también el castigo infringido en esos tiempos, entre judíos y egipcios, a la mujer adúltera).

El *secretismo* queda reflejado en el *lenguaje* de los alquimistas, alegórico y críptico. A fin de esconder los misterios de la alquimia utilizaban un lenguaje repleto de símbolos y metáforas, tanto para los productos que empleaban como para las operaciones que realizaban. Por ejemplo, en los procesos metalúrgicos había una simbología entre la muerte, resurrección y perfeccionamiento de los metales —recuérdese la mitología sobre la metalurgia— para reflejar los de Jesucristo y, en último término, los del alma humana. Se crea un verdadero vocabulario que se fue haciendo cada vez más secreto para impedir a los no iniciados el acceso a las técnicas alquímicas, sobre todo en lo referido a la conversión de metales en oro. En este lenguaje alegórico se empleaban bien signos, muy próximos frecuentemente a los jeroglíficos egipcios, bien números o letras en unos tipos de «combinaciones místicas». Así, los números jugaban un importante papel —según las doctrinas pitagóricas—, con lo que en el panteísmo egipcio determinados números tenían un significado especial, eran números místicos: el dos (de los dualismos); el cuatro (de los cuatro elementos); el tres (de la *trinidad* vida, materia e inteligencia); los otros primeros números impares, es decir, el cinco, el siete y el nueve (cuadrado, además, de tres); el quince (suma de los tres primeros impares, 3+5+7)... Es interesante el ejemplo del *siete*: siete eran los metales conocidos, lo que les lleva a dividir el tiempo en espacios de siete días, que llaman semana (*septimana*), dando a cada día el nombre de uno de los siete planetas (figura 2). Hacen con esos números, lo mismo que con las letras, combinaciones cabalísticas, a las que después daban una significación especial. Por ejemplo, la palabra «abracadabra», escrita en una forma determinada tenía valor de amuleto contra las enfermedades (Hoefler, 1866: 236).

Metal	Símbolo	Planeta	Día de la semana
Oro	☉	Sol	Domingo <small>(Sunday en inglés)</small>
Plata	☾	Luna	Lunes
Hierro	♂	Marte	Martes
Mercurio	☿	Mercurio	Miércoles
Estaño	♃	Júpiter	Jueves
Cobre	♀	Venus	Viernes
Plomo	♄	Saturno	Sábado <small>(Saturday en inglés)</small>

Figura 2. Nombres de planetas, días de la semana y símbolos de los metales.

También acudían a animales y plantas para hacer representaciones alegóricas: el león amarillo era símbolo de los sulfuros amarillos y el águila negra, de los sulfuros negros. Los colores de algunos de esos seres vivos tenían una gran simbología, sobre todo el color amarillo, que

representaba el oro y el sol (plantas con flores o raíces amarillas, animales como la salamandra, por las manchas amarillas de su cabeza, etcétera).

Por otra parte, los alquimistas concebían el mundo como una unidad, estando en perfecta armonía el individuo (microcosmos) y el universo u orden superior (macrocosmos). Esta idea básica de la unidad fundamental de la materia está representada en la frase de «todo es uno», simbolizada a su vez por el *ourobouros* o serpiente que se muerde la cola (figura 3), que representa el círculo, sin principio ni fin, el cosmos en definitiva (Partington, 1945:42).



Figura 3. El ourobouros (manuscrito *Parisianus* 2327).

II.a.4. Los alquimistas griegos y sus escritos

Para descifrar los orígenes y evolución de la alquimia de la Antigüedad, las fuentes de información más importantes, y casi únicas, de las que dispone el investigador en historia de la química son los documentos escritos por los alquimistas griegos. Pero, lamentablemente, se han conservado muy pocos. Tan sólo algunos tratados fragmentarios, todos escritos en griego, que no alcanzan en total más que unas ocho mil palabras y que se atribuyen a alrededor de cuarenta autores. Parece ser que este conjunto de textos estaba recopilado en un manuscrito original (que se ha perdido), del que se hicieron después una serie de copias. La más antigua de éstas —al menos en lo que se conoce hasta el momento— fue escrita entre los siglos X y XI d.C., copia seguramente a su vez de otra bizantina, anterior en unos dos siglos y también desaparecida. Se trata del manuscrito *Marcianus* 299, de la biblioteca de San Marcos de Venecia (Multhauf, 1966: 102). Otros dos importantes manuscritos de la alquimia griega que son ya copias posteriores, de los siglos XIII y XV d.C. se encuentran en la Biblioteca Nacional de París (llamados por eso *Parisianus*).

El hecho de que no hayan llegado hasta nuestros días escritos originales de los alquimistas greco-egipcios fue en un principio atribuido a un edicto del emperador Diocleciano del 296 d.C., en el que se condenaba a los alquimistas por considerar que sus trabajos eran un peligro para el imperio romano. Habrían sido perseguidos y sus escritos quemados. Esto también explicaría que los alquimistas se viesen obligados a huir de Egipto y refugiarse en otros países, sobre todo en Siria. Sin embargo, más recientemente se ha puesto en duda la publicación de tal edicto y parece que más bien pertenece a la leyenda, por lo que se atribuye al secretismo propio de la alquimia la desaparición de sus obras (Ihde, 1984: 11).

A través de estos escritos alquímicos se conocen los nombres de los primeros alquimistas y los hechos de gran cantidad de ellos. No obstante, de muchos se cuestiona su existencia real o si fueron verdaderamente alquimistas o más bien filósofos en estrecha relación con la alquimia. Y algunos, ciertamente, son figuras legendarias. Pero de quien se puede afirmar con gran seguridad que existió y que se trata verdaderamente de un alquimista es de Zósimo de Panopolis, un egipcio que vivió en Alejandría hacia los últimos años del siglo III d.C. o principios del IV. Resultaría así ser el alquimista más importante de la alquimia griega, ya que ha dejado las mejores referencias escritas de la alquimia de este período, si bien fragmentadas. Consisten en una especie de enciclopedia alquímica, denominada *Cheirokmeta*, presentada en forma de cartas a su «hermana» Teosobia. En esa obra hace mención, entre otros temas, a muchas recetas y técnicas de laboratorio apoyándose en el conocimiento de alquimistas más antiguos (pero de los que no se tiene certeza de si son personajes reales), a los que nombra expresamente, si bien es difícil reconstruir plenamente el contenido original de Zósimo a causa del oscurantismo de su escritura y a la frecuente intrusión de autores posteriores.

De los otros personajes nombrados en los manuscritos alquímicos hay que destacar a algunos. Así, a Ostanés, uno de los primeros filósofos relacionados con la alquimia, místico persa citado también como mago, del que se dice vivió hacia el 300 a.C. Parece que combinó la astrología con las doctrinas de Zoroastro, con su magia y dualismos del bien y el mal, la luz y la oscuridad, ideas que se extenderían por Babilonia, donde tomaron gran arraigo. También el ya citado Hermes Trimegisto (o *Trismegistos*), considerado el padre de la alquimia y la astrología. Aunque se afirmaba que vivió alrededor del 150 a.C., muy probablemente es tan sólo una figura legendaria. A él se atribuye la autoría de los libros llamados herméticos, recopilados principalmente en Egipto hacia el siglo II a.C. El de mayor prestigio es *La Tabla Esmeralda*, la obra emblemática para los alquimistas, de la que se dijo incluso que se hallaba escondida en la gran pirámide de Gizeh. Se cita asimismo a Posidonio (aprox. 135-50 a.C.), original de Siria, gran filósofo estoico y al que se le debería después la fusión de la filosofía griega con la magia y astrología orientales. Apolonio de Tyana, natural de Capadocia, fue tenido en su época (siglo I d.C.) por un gran filósofo itinerante de la escuela neopitagórica. Aunque notable en cuanto a sus estudios sobre la naturaleza de la materia, no fue un alquimista.

Por otra parte, ya sí que hay que considerar como verdaderos alquimistas, o al menos en estrecha relación con la actividad química, a otros autores. Los más importantes son Bolos de Mende y María la Hebrea, muy citados ambos por Zósimo en sus escritos, aunque no hay seguridad plena de su existencia. Y es aun más dudosa la de Cleopatra, otra mujer alquimista nombrada en esos textos (figura 4).

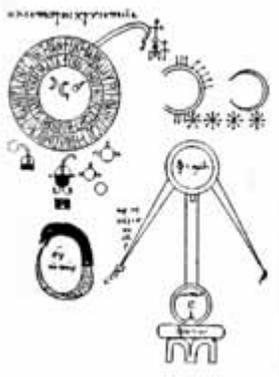


Figura 4. Dibujos de aparatos y símbolos atribuidos a la alquimista Cleopatra (manuscritos *Parisianus*).

Bolos de Mende, egipcio helenizado del delta del Nilo al que se sitúa hacia el 200 a.C., pertenecía a la escuela de Ostanes. Es autor del texto *Physica et Mystica*, un libro sagrado para los alquimistas, donde realiza interesantes descripciones sobre procedimientos y técnicas de tintes y, sobre todo, del arte de joyería, con recetas de cómo obtener oro y plata, aunque todo ello mezclado con superstición. Se le conoce más como Demócrito, según le nombra Zósimo en sus textos, aunque habría que decir más bien el falso Demócrito, ya que tomó el nombre de uno de los creadores de la teoría atómica, el griego Demócrito de Abdera, muy anterior (460-380 a.C.). María la Hebrea, cuyo sobrenombre hace clara alusión a su origen, es una de las personalidades más interesantes de la alquimia de aquellos tiempos, aunque se la conoce hoy en día tan sólo por lo que de ella escribieron alquimistas posteriores. Estudiosa también de las teorías de Ostanes y algo posterior a Bolos, a ella debe la alquimia y también la química una serie de aparatos para calentar, destilar y sublimar que supusieron un adelanto enorme en las operaciones de laboratorio. Se conoce asimismo a uno de sus discípulos, Agatodaimon (aunque seguramente éste sea un pseudónimo, nombre tomado de una deidad egipcia, el demonio-serpiente), alquimista egipcio o tal vez sirio al que se atribuye la autoría de un pequeño tratado alquímico descubierto en El Cairo (Multhauf, 1996:105).

Pelagio fue un filósofo hermético que escribió especialmente sobre la coloración de metales, contemporáneo de Zósimo. Y entre las figuras de la alquimia griega posteriores a éste último se encuentran Sinesio y Olimpodoro (siglos IV-V d.C.) y, sobre todo, Esteban de Alejandría, que en realidad fue filósofo más que alquimista (siglos VI-VII d.C.). De él se sabe que era firme partidario de la transmutación y que atacaba, por otra parte, las prácticas de la aurificación, como dejó escrito en su texto *Del Gran y Sagrado Arte, o de la Fabricación del Oro*.

11.a.5. Alejandría, ¿u otros lugares de origen de la alquimia griega?

Acerca de la cuna de la alquimia griega, la opinión más extendida la sitúa, como se ha comentado, en Egipto. No obstante, otras voces opinan que sería en Siria, concretamente en la ciudad de Harran, donde existía una forma primitiva de gnosticismo y en la que habría vivido hacia el 200 a.C. Agatodaimon, ese importante alquimista y discípulo de María. Harran, además, estaba estratégicamente situada en la ruta de la seda con China, lo cual le habría permitido tener algún contacto con la alquimia en ese país (Multhauf, 1966: 115).

Otra teoría alternativa propone que si bien la alquimia surgió en Egipto, fue debido a los conocimientos aportados allí por refugiados procedentes de Siria y otros puntos de Asia

que huían ante la invasión de los persas. Por otra parte, algunos investigadores piensan que los primeros alquimistas podrían haber sido judíos, como lo demuestra la personalidad de María la Hebrea, primera autora de la mayoría de los procesos y técnicas de la alquimia griega. Esta teoría sobre el origen judío de la alquimia viene también avalada por ser frecuentes las palabras hebreas y las referencias a nombres bíblicos en los textos de alquimia de esa época. Incluso, dentro de las leyendas que siempre han rodeado a la historia de la alquimia, se han atribuido escritos alquímicos a Salomón o a Moisés (del que se ha dicho, dentro de estas fantasías, que la alquimista María era hermana).

Respecto a la alquimia que chinos e hindúes veían practicando desde tiempo atrás, no hay evidencias consistentes de que hubiera habido en aquellos tiempos un intercambio de conocimientos de las prácticas químicas entre esas culturas. Sin embargo, bien pudo haberlas (no hay más que recordar, por ejemplo, que Alejandro llegó hasta la India), con todo lo cual no puede descartarse ni la influencia de Extremo Oriente ni la de Siria e Israel en la alquimia greco-egipcia.

II.a.6. Técnicas, operaciones y procesos de la alquimia griega

El lenguaje oscuro y místico de los textos de la alquimia helenística, lleno de imágenes y misteriosas alegorías para referirse a las técnicas y materiales que empleaban, hace que no resulte fácil reconocerlos.

El alquimista tenía que llevar a cabo multitud de experimentos, movido principalmente por ese idea central de la alquimia, la obtención de oro. Una de sus teorías más curiosas era la de «plantar» una pepita de oro, a modo de semilla, sobre un metal o «materia informe» (plomo, generalmente), esperando que con calor y humedad germinase y fuera creciendo. La transmutación se asociaba con una serie de purificaciones y regeneraciones que los metales básicos o metales «imperfectos» tenían que sufrir para llegar a transmutarse en oro (o también en plata, el otro metal precioso). Era preciso ir eliminando las partes groseras de los materiales para llegar, tras muchas operaciones, al material «sutil» desprovisto de toda impureza. De ahí también la importancia de las técnicas de purificación, como la filtración, extracción o decantación y, sobre todo, la sublimación y la destilación (figura 5). Se conseguía así la materia prima, sobre la que había que seguir trabajando hasta la obtención del oro. Entonces había que fundir, calcinar, pulverizar...

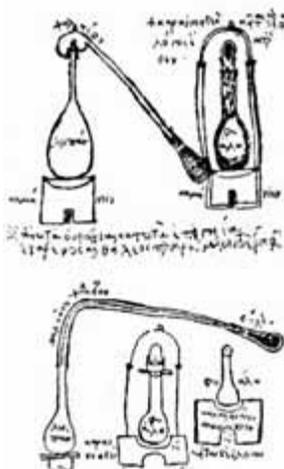


Figura 5. Dibujos de aparatos para destilar y para otras operaciones (manuscritos *Parisianus*).

Los alquimistas asociaban estos procesos a los cambios de color: primero, el metal básico se fundía dando una masa negra (ennegrecimiento o *melanosis*), masa que por medio de diversos tratamientos pasaba sucesivamente a color blanco (*leukosis*), amarillo (*xantosis*) y púrpura o rojo (*iosis*). El último paso supondría haber alcanzado la perfección del metal, es decir, el oro iridiscente. Y el primero, el empleo de una sustancia inicial de color negro (es decir, la *melanosis*), era una consecuencia de creer —según la teoría aristotélica de la materia— que era posible preparar una sustancia desprovista de forma, lo cual se indicaba precisamente por ese color negro. En ella se irían incorporando progresiva y sucesivamente las características y propiedades de los metales plata y oro, proceso que equivalía a implantar semillas de ambos metales en la materia informe inicial, como se indicó anteriormente. Hopkins, el gran historiador de la alquimia, ha interpretado según la química de hoy estos procesos de la manera siguiente: se partiría de la preparación de una aleación de los cuatro metales «imperfectos» (plomo, estaño, cobre y hierro), que mediante mercurio o arsénico tomaría en su superficie un color blanquecino; después, con agua de azufre y algo de oro pasaría a color amarillo y posteriormente a púrpura, coloración última que se justifica por el color violeta de las aleaciones de bronce con pequeñas cantidades de oro (Hopkins, 1925: 58, 1938: 326). El agua de azufre sería en realidad una disolución acuosa de sulfuro de hidrógeno, que se preparaba a partir de polisulfuro de calcio, obtenido a su vez calentando cal con azufre; o, también, mediante destilación de huevos. Por otra parte, como remarca Plinio el Viejo (Cayo Plinio Cecilio Segundo, 23-79 d.C.), los cuatro colores negro, blanco, amarillo y rojo se consideraban como «primarios» en la pintura griega.

Aparatos

Todo esto obligaba a los alquimistas a realizar muchísimos ensayos que requerían utilizar muy diferentes aparatos (crisoles, morteros y almireces, embudos, tamices, hornos, alambiques, redomas, baños, etcétera).

Un ejemplo interesante es el baño de agua o *baño maría*, que ha perpetuado el nombre de su inventora, la conocida alquimista María la Hebrea. Aunque ésta haya sido su más famosa contribución a las técnicas químicas, no obstante hizo otras tanto o más interesantes.

Tal es el *tribikos* (figura 6), un aparato de destilación con tres brazos o alargaderas, terminado cada uno en un recipiente colector de vidrio (llamado *bikos* o *bixos*, según la transcripción del griego) que era utilizado sobre todo para obtener agua de azufre.

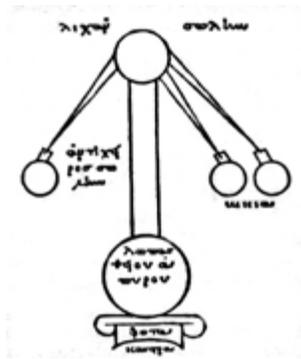


Figura 6. Dibujo del *Tribikos*, aparato para destilar (manuscritos *Parisianus*).



Figura 7. *Kerotakis*, aparato para sublimar (según los manuscritos *Parisianus*).

Pero el más importante es el *kerotakis*, que consistía en un recipiente cerrado en cuyo interior se situaba una lámina de hierro o especie de repisa, sobre la que se colocaba un material sólido que se sometía a la acción de un vapor sublimado. Solía estar sobre un curioso soporte en forma de tres pies de león (figura 7). Más que un simple sublimador, equivaldría a un extractor de reflujos.

Proceso de destilación

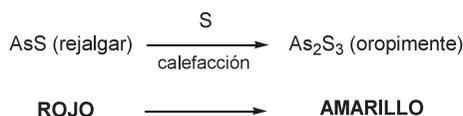
De todas las técnicas de los alquimistas griegos es la destilación la de mayor relevancia. En la interpretación de este proceso, los alquimistas acudían a la teoría filosófica griega de los estoicos sobre el *pneuma*: identificaban como *pneuma* a los productos de la destilación, tanto con los «aéreos» —es decir, los vapores o «espíritus»— como los líquidos. Respecto a estas denominaciones, Zósimo en sus escritos hace una distinción entre «cuerpos», término con el que generalmente designaba a los metales, y «espíritus» (o *pneumata*), con el que designaba a los vapores o «ciertas sustancias invisibles debido a su naturaleza peculiar». También explicaba por medio de la destilación la teoría de los cuatro elementos: se produce un residuo sólido, líquidos, que pasan a la destilación, y «espíritus», que se desprenden. Pues bien, el residuo sólido representaría la

tierra; los líquidos, al agua; los «espíritus», al aire, y el fuego, que se empleaba para calentar, era el medio de purificar y también el alma invisible de todos los cuerpos.

Cambios de color

En cuanto a los materiales que podían producir esos cambios de color sobre los metales, los alquimistas centraban su atención en el *mercurio*, *azufre* y *arsénico*, de los cuales por sublimación o destilación, bien de ellos directamente o de sus compuestos, se obtenían fácilmente vapores (Partington, 1945: 42). Con estos vapores se podía tratar el metal por un proceso mucho más sencillo que el de cementación (calentamiento de un metal junto con otro producto, con lo que se formaba un material con nuevas propiedades), que era lo que tradicionalmente se había hecho. Había que controlar con cuidado el grado de calor en esos procesos, para lo cual utilizaban baños de agua, arena o cenizas e, incluso, hornos. Para Zósimo el azufre sería el mejor material para producir esos cambios en los metales, como tal o como «agua de azufre», llamada también «agua divina» (ya que la palabra griega *theion* tiene los dos significados). Así, Zósimo da una receta proveniente de María según la cual, para conseguir la transmutación de una lámina de cobre a oro, se yuxtaponía dicha lámina a otra de oro y se exponían ambas a la acción de los vapores del agua divina mediante un proceso de reflujo. El *kerotakis* sería el aparato idóneo para esta operación.

Otros alquimistas, como Agatodaimon, suponían al contrario que Zósimo que no sería el azufre, sino el *arsénico* o sus compuestos el material clave para estos procesos. Así, el rejalgar (un sulfuro de arsénico) por fusión con natrón (carbonato de sodio) o con mercurio, originaba óxido de arsénico, un sólido blanco que si se calentaba en un *kerotakis* en el que se hubiera colocado cobre, daba lugar a un sublimado (arsénico elemental) que producía en el metal un color blanco plateado (transmutación a plata). También Bolos en su *Physica et Mystica* cita frecuentemente los compuestos de arsénico: rejalgar (rojo), oropimente (amarillo) o el óxido (blanco). Por ejemplo, calentado con cuidado rejalgar (AsS) en presencia de azufre —es decir, por fusión con azufre— se produce su transformación en oropimente (As_2S_3), con el consiguiente cambio de color:



La manipulación de los compuestos de arsénico proporcionaba una gran variedad de efectos de coloración. Por su parte, en el papiro de Leiden también se dan recetas para dorar mediante arsénico y una goma de origen vegetal. El cinabrio (sulfuro de mercurio, HgS , de color rojo) representaba también un importante papel en estos procesos de coloración. Al calentarlo se decoloraba a blanco (es decir, daba mercurio blanco metálico), y cuando a su vez se calentaba este producto, se coloreaba a rojo o a amarillo (se formaba óxido de mercurio (II), HgO). Era el misterio perfecto para los alquimistas, que también habían observado que en alguna de esas operaciones se desprendía un «espíritu», que hoy en día sabemos que es el oxígeno.

Procesos para acelerar la transmutación

Otro de los pilares del proceso de transmutación era la preparación de un material que actuase sobre el metal para conseguir así que aquella se produjera. Zósimo creía en la existencia de una sustancia que, de forma casi mágica, podría hacer que la transmutación fuera

mucho más rápida. Es decir, esa sustancia tendría el sentido actual de catalizador. Sería como un fermento o «medicina» del metal enfermo (o metal corriente). Por eso lo llamaron *xerion* (término usado para designar polvo medicinal o también cosmético). Después, este concepto evolucionaría en la alquimia árabe y europea hacia el concepto de piedra filosofal (y también de elixir de la vida), aunque los mismos alquimistas griegos hablaron a veces de «la piedra». Se proyectaba en forma de polvo seco sobre el metal, de ahí el nombre de «proyección» dado por los alquimistas al proceso de preparación del oro. En ocasiones también lo designaban como *tintura*, ya que era un agente que, una vez aplicado, tras diversas operaciones producía los cambios de color que daban lugar a la transmutación a oro o plata. El mismo Zósimo emplea la palabra griega *baptizien*, luego traducida como «transmutación», que significa sumergir, por similitud a cuando que se sumerge un tejido en un tinte (Bensaude y Stengers, 1992: 23).

II.a.7. Aspectos etimológicos

De esta etapa de la alquimia nos han quedado muchos términos, que si bien aparentemente podría pensarse que son árabes, son de origen griego. Así, la palabra *alambique*, que proviene realmente de la palabra griega «bikos» o «bixos» (vasija o recipiente), en su forma de genitivo «ambikos» o «ambixos», con la que los alquimistas griegos designaban el recipiente donde llevaban a cabo la destilación (en inglés «ambix»). Y cuando los alquimistas árabes le anteponen el artículo «al» (*alambix*), da lugar a alambique.

La palabra *elixir* probablemente derive de la palabra griega «xerium», ese polvo utilizado en medicina y también como cosmético y, entre los alquimistas, como fermento en las transmutaciones, que con el prefijo «al» sería *alixir* y de ahí, elixir (Esteban, 2006: 66).

Por otra parte, la expresión *herméticamente cerrado*, bastante frecuente en nuestro lenguaje común, obviamente proviene del nombre *Hermes* y de la frase *Hermes lo cierra*, relativa al secretismo de los misterios alquímicos.

II.b. Alquimia en Extremo Oriente

II.b.1. Alquimia china

El primer texto escrito sobre las técnicas y pensamiento de la aurifacción en China data del siglo VI a.C. Se trata del texto *Tao Te Ching*, de Lao Tsé (570-490 a.C.). Estaba muy influido por la filosofía taoísta, que interpretaba el universo en términos de dos principios contrarios: el *yin*, principio femenino, frío, oscuro y negativo, y el *yang*, principio masculino, caliente, luminoso y positivo (figura 8). Del combate entre ambos resultan los cinco elementos (agua, fuego, tierra, madera y metal) que compondrían todos los distintos objetos de la materia (Sarton, 1959: 14).



Figura 8. Símbolos de los dos principios chinos de la vida: el yin (femenino, negro) y el yang (masculino, blanco).

Para los chinos, no obstante, mucho más importante que la fabricación de oro a partir de otros metales era la preparación de elixires con los que el hombre pudiera alcanzar la perfección y la inmortalidad. Esto marca una importante diferencia con la alquimia griega. La búsqueda de esos elixires se basaba en la idea de que para alcanzar la perfección del alma era necesario alcanzar el equilibrio dentro del cuerpo en cuanto a las proporciones del *yin* y el *yang*. Así, eran ricos en *yang* el cinabrio rojo, el jade, el oro, el azufre... y en *yin*, el salitre, entre otros. Esto exigía a los alquimistas delicados estudios empíricos de muchas reacciones químicas, realizadas con el orden y la meticulosidad tan característicos del trabajo de los chinos, lo cual tuvo importantes consecuencias —muchas de ellas llegadas de forma indirecta— desde el punto de vista químico y también médico, ya que la alquimia china se desarrolló en estrecha conexión con la medicina. Así, en el área de la medicina y biología se prepararon gran cantidad de remedios farmacéuticos y se estudiaron numerosos procesos de fermentación, siendo importante conseguir medicamentos con alto contenido en hormonas. En cuanto a la química, realizaron los chinos un descubrimiento tan trascendental en la historia como es el de la pólvora, obtenida por reacción del salitre con el azufre, uno rico en *yin* y en el otro en *yang*, respectivamente.

Con el tiempo van surgiendo distintas formas de alquimia china. La forma *wai tan* (siglo IV d.C.) propugnaba el consumo de oro potable como elixir, lo cual produjo numerosos envenenamientos. Por este motivo apareció otra forma de alquimia, la *nai tan* o alquimia fisiológica, muy importante a partir del siglo VI d.C. Buscaba un elixir interno, que el mismo cuerpo humano produciría mediante una serie de ejercicios respiratorios, gimnásticos y actividades sexuales y cuya bebida proporcionaría la inmortalidad. Esto dio lugar al estudio de los fluidos orgánicos, sobre todo de la orina, de la cual los chinos lograron aislar hormonas sexuales (Brock, 1992: 27).

La alquimia china fue haciéndose con el tiempo sumamente esotérica y se rodeó de complicados rituales, lo cual unido al hecho de que con frecuencia fueran apareciendo entre los alquimistas chinos gran cantidad de falsificadores, dio lugar a que su decadencia se hiciera inevitable, a pesar de sus grandes éxitos.

En lo referente a la química práctica, los chinos trabajaban la metales desde los siglos X y IX a.C. y, entre otras producciones originales, fabricaron la porcelana alrededor del 600 d.C.

II.b.2. Alquimia hindú

El primer contacto, al menos conocido históricamente, entre el mundo griego y el hindú fue en el 327 a.C., cuando Alejandro Magno cruza el río Indo. Desde entonces, muy

probablemente ciertas corrientes ideológicas y conocimientos prácticos de una y otra cultura se hayan influido recíprocamente. Así, determinados aspectos del budismo pueden haber favorecido la aparición del neoplatonismo griego. Por otra parte, se sabe que la teoría atómica en la India se enseñaba desde hace muchísimo tiempo, por lo que los griegos bien pudieran haberla tomado de esas fuentes o haberla desarrollado de forma independiente.

Los remedios farmacéuticos se conocían, según testimonios, en el siglo IV d.C., utilizándose solamente los de origen vegetal. Y en cuanto a la alquimia, los indios la conocían y la practicaban, aunque parece ser que no se dedicaron demasiado a ella. Se tienen noticias de que sabían de la sublimación, la calcinación y el análisis y de que empleaban el talco en ciertas operaciones (palabra que proviene del término *talaka*, en lengua original hindú). Sus comienzos son muy posteriores a los de la alquimia china, al menos por lo que se conoce a través de los documentos que se han encontrado hasta el momento (que son bastante escasos). Suelen señalarse hacia el siglo VIII d.C., cuando el budismo sufrió un profundo cambio y surgió la secta de los *tantras*. En farmacia, por su parte, se comienza el empleo de compuestos de mercurio y otros metales con fines terapéuticos, sin abandonar los antiguos remedios de origen vegetal.

No obstante, se ha sugerido que la alquimia se introdujo en la India a través de los árabes, dadas las fechas de su origen y sus características (Partington, 1945: 47).

III. Alquimia en la Edad Media

Los alquimistas griegos se extendieron por todo Oriente, sobre todo a partir de los tiempos del emperador Diocleciano (245-311), debido en gran parte a las persecuciones que sufrieron por los romanos. De esta manera, todo este saber pasa a los árabes, quienes lo enriquecen con sus propias e importantes aportaciones y, posteriormente, lo transmiten a la Europa cristiana, donde después se desarrolla poderosamente. En definitiva, el recorrido de la alquimia va así de Oriente a Occidente.

III.a. Alquimia árabe

En el siglo VII se inicia la expansión del pueblo árabe desde la península arábiga y pronto ocupa Oriente Medio¹. Al invadir Egipto, los árabes descubren los textos griegos de la biblioteca de Alejandría, con lo que recogen y asimilan mucho del saber del mundo clásico. Con esta conquista de los antiguos territorios cristianos de Oriente, también se ponen en contacto con la alquimia griega, aunque ya estaban en posesión de muchas técnicas y conocimientos de la alquimia de Extremo Oriente (la china, principalmente). Por ejemplo, las ideas del elixir de la vida y de la piedra filosofal, que tan arraigadas estuvieron entre los alquimistas árabes y posteriormente entre los europeos, provenían de los chinos, puesto que no hay ningún testimonio de que los alquimistas griegos las tuvieran.

Parece ser que hubo además otra contribución importante al conocimiento que tuvieron los árabes de los procesos alquímicos. Se trata de las traducciones de muchos textos de ciencias al idioma sirio de entonces, el arameo, llevadas a cabo por los cristianos de la secta nestoriana y muy probablemente también por los coptos de Egipto (Partington, 1945: 44).

La alquimia árabe se extendió del siglo VII al XIII. Los árabes desarrollaron en gran manera las ciencias y las artes, con lo que en su época florecieron las matemáticas, la filosofía,

1 Véase en este mismo volumen el artículo de Margarita Santana «Ciencia y Filosofía en la Edad Media: la disputa entre Razón y Fe» (*comps.*).

la astronomía, la medicina, la alquimia... Sus propios califas eran ejemplo de ello, como Al-Mansour (712-775), Haroun-Al-Rachid (766-809), tan conocido de los lectores de *Las mil y una noches*, o su hijo Al-Mamoun. Las bibliotecas de los árabes se enriquecieron, pues, no sólo con sus producciones propias sino con las traducciones de los textos griegos hallados en los antiguos territorios helénicos. Así, cuando continuaron expandiéndose y llegaron hasta Italia y España, la Universidad de Córdoba constituyó una buena prueba de ello al contar con una biblioteca de más de 250.000 volúmenes (desgraciadamente, casi todos fueron quemados por la Inquisición tras la culminación de la Reconquista con la toma de Granada).

En el ámbito que nos ocupa de las transformaciones de la materia, los árabes se inclinaron más hacia la medicina y la farmacia. Por ejemplo, la *primera farmacia pública* fue creada en Bagdad a fines del siglo VIII, mientras que la de Salerno (Italia) es la más antigua de Europa (siglo XI).

Entre los alquimistas árabes hay que destacar dos importantísimos, autores además de gran cantidad de escritos traducidos después, en el siglo XI, al latín. Éste fue otro factor que contribuyó al desarrollo de la alquimia en Occidente.

El primero de todos esos alquimistas es Jabir Ibn Hayyan, del siglo VIII (721-815), alquimista, astrónomo, ingeniero, geólogo, numerólogo, filósofo, físico y médico, de origen persa, al que también se le conoce con el nombre latinizado de Geber o Xeber (Brock, 1992: 38; Ihde, 1984: 16). Se le atribuye la autoría de muchísimos textos (más de dos mil), aunque en gran parte son apócrifos. Su obra cumbre es *Summa Perfectionis*, de la que antiguamente se pensaba era la traducción al latín de sus escritos. Sin embargo, hoy parece haberse demostrado que esa obra fue escrita directamente en latín y en fecha muy posterior a la existencia de Jabir, en el siglo X o incluso después, hacia 1300, por un autor cristiano (si bien pueda ser una compilación basada en trabajos originales de Jabir, aunque no es seguro). Por eso, muchas veces al hacer referencia al autor de esos escritos se habla del Pseudo-Geber. En cualquier caso, a Geber le debemos la descripción de importantes técnicas y operaciones básicas del laboratorio químico —tales como la destilación, la obtención de aceites vegetales, la purificación de muchos metales, el lavado con álcalis, etcétera— así como numerosos aparatos. Descubre muchas sustancias químicas, como los ácidos minerales fuertes (ácido sulfúrico, clorhídrico y nítrico) y los elementos arsénico, antimonio y bismuto; inventa el agua regia, etcétera. También utiliza por vez primera determinadas palabras para referirse a ciertas especies químicas, como *álcali*, por ejemplo, en la que se nota fácilmente su origen árabe.

Geber explica muchas propiedades de los metales partiendo de la teoría aristotélica de los *minima naturalia* (o «moléculas», en nuestro lenguaje actual), basándolas en la mayor o menor proximidad de las partículas constituyentes. Asimismo, introduce la idea de que el *mercurio*, principio acuoso, y del *azufre*, principio ígneo y humeante, al mezclarse y combinarse en el interior de la tierra generarían los metales. Como siempre, reaparece esta idea de la «gestación» de los metales que ya propusiera Aristóteles, a la que se une la teoría de los estoicos de la cohesión de los metales entre un alma (el azufre) y un espíritu (el mercurio). Por todo ello, no en vano se le conoce a Geber como el «padre de la química». Es la teoría de la naturaleza de los metales con los dos *principios azufre-mercurio*.

Otros alquimistas árabes describieron reacciones químicas básicas, origen a su vez de procedimientos de síntesis muy importantes. De esta manera, Rhases o Al-Razi (860-940), el otro gran alquimista árabe, describe la formación del *alcohol* —también palabra árabe— por

destilación de vino (por lo que también se le llama «espíritu del vino»), que es como se obtuvo por vez primera en occidente en la escuela de medicina de Salerno, famosísima en la Edad Media. También explica la deshidratación del alcohol con cal. Asimismo, Rhases descubrió la síntesis de ácido sulfúrico a partir de sulfato de hierro. En su obra *El Secreto de los Secretos* describe cuidadosamente multitud de técnicas básicas, aparatos y procedimientos de laboratorio y también señala una clasificación de las sustancias.

En el mundo árabe hay otros alquimistas que, a pesar de que su mayor renombre lo deban a otras ramas de la ciencia, no deben olvidarse. Por ejemplo, Avicena o Ibn Sina (980-1036), que destacó en filosofía, astronomía, matemáticas y mayormente en medicina. Escribió el *Canon de la Medicina*, obra maestra en este campo. En lo que se refiere a la alquimia, su texto *Tratado de las Piedras* es de gran valor por la clasificación que introduce de los metales y por su teoría sobre el origen de las montañas.

En este mismo sentido, Averroes o Ibn Ruchd (1126-1198) fue además de alquimista, filósofo y médico. Teorizó sobre la naturaleza de la materia en cuanto a su «eternidad» y movimiento en sus *Comentarios sobre Aristóteles*. Se inclinó hacia el materialismo y el panteísmo, por lo que sus escritos fueron posteriormente rechazados por Santo Tomás de Aquino y condenados públicamente por la Iglesia en la Universidad de París (1240).

III.b. Alquimia en el occidente cristiano

Los árabes que habían tomado conocimiento de la alquimia directamente de Alejandría, la extienden después a Europa, donde se desarrolla a partir del siglo XII.

Destruído el mundo clásico con la caída del Imperio Romano (toma de Roma por los bárbaros en el 476 d.C.), el mundo occidental pierde el conocimiento científico y con él, el de la alquimia. Pero poco a poco va recuperando todo ese saber. La Academia de Córdoba y la Escuela de Traductores de Toledo jugaron un papel importantísimo en la transmisión de la ciencia a la Europa cristiana, ya que tradujeron la mayor parte de textos del árabe al latín. Así, a través de los árabes, sobre todo los de España y también de Italia, la alquimia se fue desarrollando en Francia, Inglaterra y Alemania, principalmente. Este hecho se vio reforzado con las Cruzadas, que tuvieron una enorme repercusión no sólo en el aspecto científico, sino también en las artes, en las letras e, incluso, en las costumbres. Pero además, y aunque de menor importancia, hay que considerar una tercera vía: en algunos casos en Europa se tuvo conocimiento de los textos clásicos y árabes por la recuperación y traducción de los mismos realizadas por los mismos cristianos. Por ejemplo, el monje Teófilo (siglo X) traduce del griego al latín la obra *Schedula Diversium Artium* (*El Libro de las Diferentes Artes*), texto del occidente cristiano más antiguo en el que se muestra una receta química, o Robert de Chester (siglo XII), que llevó a cabo traducciones del árabe. Con todo lo cual comienzan a escribir sus propios textos alquímicos, próximo ya el siglo XIII.

El florecimiento de la alquimia cristiana medieval tiene lugar a lo largo de los siglos XIII y XIV, en los que ya van apareciendo grandes figuras. Una de ellas es Alberto Magno (1193-1280), que fue el primero en introducir la idea de «afinidad química». A este dominico alemán se le conoce también como San Alberto Magno, ya que fue canonizado en 1931 (es por ello el patrón de los científicos). Doctor escolástico muy erudito, fue un alquimista de gran sabiduría que se dedicó a una cuidadosa y crítica observación de la naturaleza. Esto le llevó a considerar que el oro de los alquimistas no era realmente el oro puro, lo que demuestra su gran clarividencia, delatando el peligro de los falsificadores de oro. No obstante, era partidario de la transmutación. Le llamaban *Doctor Universalis* y era considerado como

el Aristóteles de la Edad Media, siendo tan famoso y apreciado que, según se dice, cuando impartía sus clases en la Universidad de la Sorbona de París debía hacerlo al aire libre, ya que eran tantos sus seguidores que no cabían en las aulas. En su obra *De Mineralibus* expone sus teorías, de raíz aristotélica y también árabe, y hace asimismo muy buenas descripciones de técnicas básicas, como destilación, sublimación, calefacción al baño maría (hay que recordar que fue su creadora María la Hebrea) y también del montaje de aparatos de laboratorio.

Otro gran alquimista fue el inglés Roger Bacon, discípulo de Alberto Magno en sus aulas de París. Vivió del 1220 a 1292 e inició sus estudios en Oxford. También fue monje, en este caso franciscano, por lo que tuvo ciertos problemas para practicar la alquimia. Se dedicó al estudio de las ciencias en general. En óptica descubrió las leyes de la reflexión y el fenómeno de la refracción. También observó el efecto sobre la visión del empleo de ciertos vidrios o de cristales naturales, como el cuarzo, por lo que se le puede considerar como el inventor de las gafas. Su pensamiento tuvo en algunos aspectos ideas verdaderamente revolucionarias. Así, en química explicó el fenómeno de la combustión y fue el primero en proponer que el aire era el alimento del fuego. También habló de técnicas clave en la alquimia, proponiendo entre otras la solidificación, la disolución, la purificación, la destilación o la calcinación. Pero tal vez su mayor éxito sea el atribuir a las matemáticas un papel esencial en las ciencias y el proponer el estudio inductivo de la naturaleza. Acusado de magia y brujería sufrió la cárcel durante largo tiempo, muriendo finalmente en ella.

En la alquimia no puede olvidarse al franciscano italiano Santo Tomás de Aquino (1225-1274), asimismo discípulo de Alberto Magno. En su *Summa Teológica* intenta fusionar el pensamiento clásico racional de Aristóteles y el cristiano basado en la revelación de San Agustín. Aunque famoso sobre todo como teólogo, fue un estudioso de las ciencias y tuvo también un importante escrito sobre química, en el que entre otros aspectos hay que destacar su fuerte defensa de la transmutación como obra de la naturaleza, que ocurre espontáneamente y que se produce si transcurre el tiempo suficiente, así como su estudio de la esencia y propiedades de los minerales y su descripción de la fabricación de piedras preciosas (*Tratado de la piedra filosofal* y *Tratado sobre el arte de la alquimia*, 1987).

Estas son las figuras más importantes en la alquimia cristiana medieval. No obstante, hay que destacar algunos importantes personajes que contribuyeron al desarrollo de la alquimia y que pertenecen al mundo cristiano correspondiente a lo que después sería el territorio español. El primer lugar lo ocupa el mallorquín Ramón Lull o también Raimundo Lulio (1235-1315), médico y alquimista, de vida azarosa (muere lapidado en África en su labor de predicación de los Evangelios). Es autor de numerosos escritos —aunque muchos son apócrifos—, destacando entre todos el *Ars Magna* (Gran Arte), a través del cual se aprecia su mérito de ser el primero en utilizar una especie de nomenclatura química (con círculos, triángulos y cuadrados para representar determinadas sustancias) y de tratar de realizar una ordenación sistemática de los descubrimientos, recetas e invenciones alquímicas.

Otra figura interesante es la de Arnaldo de Vilanova (o Arnald de Villeneuve, como era llamado en Francia), médico y alquimista valenciano (1245-1314), gran viajero, autor de bastantes obras que se publicaron mucho después de su muerte. Es suyo un tratado alquímico que constituye el más antiguo de los publicados en Francia y que contiene recetas de transmutación repletas de alegorías y en las que mezcla la alquimia con contenidos religiosos. Por otra parte, a lo largo de la Edad Media los productos medicinales en su inmensa mayoría tenían origen vegetal y se conseguían mediante extractos de plantas. En este aspecto fue muy conocida la actividad de Joannes de Rupescissa (nombre latinizado

del original, Joan de Peratallada, según la extendida costumbre de aquella época de latinizar el nombre), fraile franciscano catalán del siglo XIV, que buscaba extraer la *quintaesencia* de las plantas como remedio óptimo para curar las enfermedades (Multhauf, 1966:180).

IV. Alquimia en la Edad Moderna

En 1453 el poder otomano se apodera de Bizancio, el Imperio Cristiano de Oriente, con la toma de su capital, Constantinopla. Muchos sabios griegos se ven obligados a huir del dominio turco y se refugian en Europa Occidental, trayendo consigo, además de su conocimiento, los textos griegos y latinos en los que se encerraba el saber y la cultura del mundo clásico. Esa fecha marca un punto de inflexión en la historia de la humanidad, al abrirse un nuevo camino en cuanto a la forma de pensar, de actuar y de enfrentarse a la vida.

Tradicionalmente los historiadores señalan, a partir de ese momento el comienzo de una nueva etapa, la Edad Moderna. Y el primer período de esta última —de aproximadamente siglo y medio de duración— es lo que en arte, literatura y cultura se conoce como Renacimiento. En la Edad Media todo conocimiento se basa en la idea de Dios y en el Renacimiento, por el contrario, en la razón. Su racionalismo —opuesto al dogmatismo generalmente imperante en la Edad Media— conduce a un espíritu crítico, que en el plano científico provoca el libre examen de la naturaleza.

En esas fechas también tienen lugar otra serie de acontecimientos trascendentales para la historia del hombre y también para la de la ciencia. Así son, entre otros, la invención de la *imprenta* en 1450, hecho que marcará un cambio en todos los campos del saber por las posibilidades que abrió de divulgar el conocimiento a través de los textos impresos, o el *descubrimiento de América* en 1492, que también influyó muy sensiblemente tanto en los aspectos sociales (políticos, económicos y culturales) como en los científicos.

Uno de los más importantes efectos en este periodo de la historia es una vuelta a la razón del mundo clásico. Este «renacer» cultural va a repercutir en todos los ámbitos de las ideas. En religión se traduce en la Reforma Protestante. En física y en astronomía, en su desarrollo como ciencias. Y en el caso que nos ocupa, en la alquimia, por su evolución hacia lo que hoy conocemos como química, aunque este tránsito ocurra con bastante lentitud, a medida que se va acudiendo a la razón para explicar los hechos observados en los experimentos. Con esto se abandonará el carácter misterioso y mágico de la alquimia, sustituyéndolo por una reafirmación de que no es la revelación ni la iluminación personal lo que proporciona la información, sino la experiencia asistida por la razón.

IV.a. Alquimia en el Renacimiento

A lo largo de la Edad Moderna, confluyen tres líneas relacionadas con la química. Son la alquimia, ciertos oficios tecnológicos (como cerámica o tintes... y, sobre todo, la minería y la metalurgia) y la medicina y farmacia, independientes aunque estrechamente conectadas entre sí, ya que en la realidad convergían en muchos de sus hombres (Taton, 1980: 138). Algunos eran médicos, pero también podían dedicarse a la metalurgia o tener trabajos relacionados con las minas... y la alquimia siempre estaba presente, al menos en cuanto a muchas de las técnicas de laboratorio empleadas, aunque no pueda decirse lo mismo acerca de su filosofía, rechazada principalmente por gran parte de los químicos prácticos.

En lo referente a la *alquimia*, durante el Renacimiento sigue la misma trayectoria que en los tiempos medievales. Los puntos centrales de la doctrina alquímica son también la creencia en la generación de los metales y en la transmutación de éstos hasta oro. Ello implicaba operaciones en las que eran importantes para el alquimista ciertos aparatos, como el *crisol* y el horno o *atanor* y, por otra parte, se va mejorando la técnica de destilación, ideando aparatos que superan el alambique clásico y proporcionan mejores separaciones. Tal es el curioso sistema de destilación de la figura 9, en el que se empleaban unos conos metálicos donde se condensaba el vapor de destilación y con el que se logró obtener alcohol con menor contenido en agua.

En cualquier caso, el secretismo y el lenguaje oscuro y alegórico siguen siendo requisitos básicos del buen alquimista, comprometido a no divulgar sus avances hacia la «gran obra», conocimiento sólo en posesión de los iniciados. Esto a la larga impedirá la comunicación de los resultados de investigación, tan imprescindible en todo proceso científico (Esteban, 2004: 63). Como ejemplo de esta simbología nos han quedado muchas representaciones, como un grabado del siglo XVII (figura 10), en el que aparece una serie de símbolos alquímicos característicos: los cuatro elementos (viento agua, tierra y fuego) en cada vértice; en el centro, los siete metales conocidos desde la Antigüedad en forma humana, sentados en un hueco que representa el interior de la tierra, y en una franja circular que significa el cielo, están situados el sol, la luna y cinco estrellas o planetas, representándose así los cuerpos celestes asociados a cada uno de esos metales (ver figura 2).

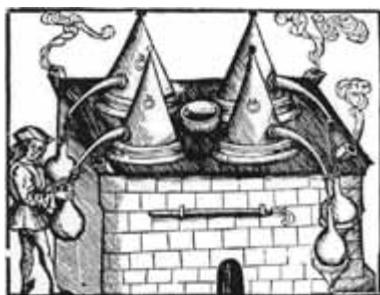


Figura 9. Aparato para destilar del Renacimiento.



Figura 10. Grabado alegórico sobre la alquimia.

IV.a.1. Paracelso y la iatroquímica

Hay un aspecto de la práctica alquímica del Renacimiento que significará una verdadera revolución. Es el del origen y obtención de ciertos medicamentos, en el que vuelven a unirse estrechamente la química y la medicina. Este hecho está representado por Paracelso con la preparación de medicamentos de origen mineral.

Era médico y también alquimista, como ocurría frecuentemente en aquella época. Su verdadero nombre era Philippus Aureolus Theophrastus Bombast von Hohenheim (1493-1541), pero se dio a sí mismo el nombre de Paracelso, en recuerdo Celso, el famoso médico romano del siglo II d. C. De espíritu aventurero, viajó por muchos países europeos, entre

ellos se dice que España, recogiendo todas las recetas de medicina y de alquimia que encontraba. Practicaba la medicina, sanando y vendiendo remedios. También fue profesor en la Universidad de Basilea (Suiza). Era un ser contradictorio, lleno de fantasías. Por ejemplo, creía en la posibilidad de fabricar artificialmente un ser humano, el *humúnculo*, en lo que se percibe su instrucción en los principios de la cábala, pues sería un reflejo de la figura del *golem* de la tradición de la cábala judía centroeuropea. A veces era casi un charlatán de feria y hasta mago, pero también tuvo interesantes aciertos y observaciones. Fue asimismo el primero en emplear en un texto la palabra *chemy* o *chymia* en lugar de «alquimia». Es, pues, un evidente representante de la química de aquellos momentos de transición entre la alquimia medieval y los nuevos tiempos que se avecinaban para la química, de tránsito entre un mundo oscuro, tenebroso y mágico, y el mundo de la razón que se abrió con el Renacimiento (Esteban, 2002: 73).

Paracelso nació en Suiza, cerca de Zurich, en una época en que estos territorios formaban parte del Sacro Imperio Germánico. Se formó en alquimia y se especializó en metalurgia en las minas y talleres del Tirol, donde su padre ejercía como médico. También tomó estudios de medicina en Italia y en la ciudad de Basilea, donde consiguió el título de médico. Por su temperamento contestatario e incluso provocador empezó a atacar a la medicina tradicional, por considerar las teorías del mundo clásico como paganas y heréticas. Incluso, esta posición le llevó a dar sus clases en alemán en lugar de usar el latín, como se hacía entonces en las universidades. Tenía siempre una postura extravagante que acabó por llevarle a una vida aventurera, rodeado tanto de alquimistas, boticarios y médicos, como de astrólogos, mineros, gitanos y gentes dedicadas a la magia y al ocultismo (Pagel, 1982: 19).

También en sus doctrinas era contradictorio, pues lo mismo que aceptaba la alquimia esotérica —que era para él una verdadera vocación religiosa, considerando que la química no se podía enseñar en las aulas y que sólo se accedería a su conocimiento a través de la inspiración— poseía también ciertas dosis de racionalismo y, desde luego, de empirismo. Aunque de un empirismo siempre controlado por la doctrina cristiana: el universo era obra de un químico y se regía por leyes químicas, con lo que la descripción de la creación del mundo según la Biblia, el *Génesis*, la interpretaba como una alegoría también química.

Adopta los cuatro elementos aristotélicos (tierra, fuego, aire y agua), a los que suma tres elementos alquímicos (azufre, mercurio y sal). En esta teoría se aprecia la influencia directa de la teoría del azufre-mercurio de la alquimia árabe acerca de la naturaleza de los metales, añadiendo Paracelso el principio sal. Es la doctrina llamada de los *tria prima* o tres principios (Brock, 1992: 47), que eran cualidades universales que al ser depositadas sobre los cuatro elementos aristotélicos, que hacían las veces de receptáculos, conferían la forma y propiedades características de cada sustancia (fueran éstas metales o no, orgánicas o inorgánicas). Estos tres principios eran, pues, el *azufre* o alma (principio de inflamabilidad), el *mercurio* o espíritu (principio de fusibilidad y volatilidad) y la *sal* o cuerpo (principio de incombustibilidad y no volatilidad).

Como alquimista, creía en la vieja idea de la *transmutación*, aunque en su sentido más amplio, ya que todo en la naturaleza sufría una transformación, desde los alimentos en la cocina a cualquier proceso químico o fisiológico. Pero es en su faceta de médico donde realizó, en realidad, las más interesantes aportaciones. Se regía por la máxima de que «lo similar cura lo similar» y, aplicaba dosis mínimas, según expresaba en una de sus célebres frases «Nada es veneno, todo es veneno. La diferencia está en la dosis» (*dosis sola facit venenum*). Se le considera así el antecedente más directo de la homeopatía (Esteban, 2003:

56). Además, era ferviente defensor de las medicinas minerales, de origen inorgánico, frente a los medicamentos greco-romanos, de origen orgánico, aunque él utilizara también los de este tipo (figura 11).



Figura 11. Grabado de Paracelso: aparece asido a su famosa espada, a la que consideraba como un talismán, y en cuya empuñadura se decía que guardaba láudano.

En este sentido es el creador de la llamada *iatroquímica*, cuyo fundamento puede resumirse en esta idea básica: los *fenómenos psicológicos y patológicos son debidos a reacciones químicas*, con un sentido muy moderno que enlaza en cierto modo con la bioquímica actual. Con términos de hoy en día podríamos definir como una especie de química médica, química farmacéutica y toxicología, ya que Paracelso consideraba que la medicina debía apoyarse en la química. Según él, había una unión entre el macrocosmos (los cielos) y el microcosmos (la Tierra y todo lo que contenía). En el macrocosmos existían los *astra*, estrellas visibles unas e invisibles otras que, al llegar al microcosmos, impregnaban la materia y le daban sus distintas formas y propiedades características de cada cuerpo. Las enfermedades podían ser curadas mediante una «esencia astral» específica, que debía ser determinada por el químico —es decir, por el médico alquimista— a través de la experimentación. Para obtener los medicamentos adecuados el alquimista debía conseguir esa esencia y, además, en estado puro, para lo cual la separaba de sus impurezas mediante el fuego y el proceso de *destilación*. Lo que importaba eran, precisamente, los restos de esa destilación: así, al destilar materiales orgánicos, como eran las plantas, quedaban unos residuos inorgánicos, lo más interesante para los iatroquímicos. Por esta razón, el conocimiento sobre la tecnología de la destilación aportada por los alquimistas medievales prestó una enorme ayuda a estos nuevos médicos.

Su teoría de los *tria prima* le proporcionó el fundamento para la idea sobre las medicinas minerales. Los tres principios de Paracelso estarían presentes en todos los cuerpos del reino animal, vegetal y mineral, aunque en proporciones diferentes de unos a otros. Cuando la proporción con que aparecían en un cuerpo determinado se alteraba, entonces se producía la enfermedad y la curación venía por la administración de producto químico adecuado. Tales eran las sales de metales pesados, como las de mercurio, que resultaron muy eficaces para combatir la sífilis. Paracelso abre con todo ello nuevos caminos, no sólo en la medicina sino también para la química, caminos en los que tuvo además muy pronto numerosos seguidores.

IV.a.2. Los iatroquímicos

No obstante, paradójicamente muchos de los iatroquímicos no compartían las ideas de Paracelso en cuanto a los aspectos más esotéricos de la alquimia. Además, a muchos de ellos se les puede considerar más como químicos y médicos que como alquimistas.

Un importante iatroquímico es el alemán Andreas Libavius (1540-1616), nombre derivado del suyo original, Libau (otro ejemplo de latinización). Este médico luterano, aunque recoge muchas teorías de Paracelso, le contradice en muchas otras. Así, vuelve a la teoría árabe del azufre-mercurio y no acepta la de los *tria prima* de Paracelso. Y mientras éste último afirmaba que sólo se podía adquirir el conocimiento sobre química mediante la inspiración divina, Libavius sostenía la idea de que se puede enseñar como otras muchas disciplinas. Esto le hace considerar la necesidad de organizar sus contenidos mediante la clasificación cuidadosa de las técnicas, aparatos y experimentos de laboratorio, la elaboración de manuales con recetas sencillas y claras y, sobre todo, la creación de un lenguaje sistemático y estandarizado de las sustancias químicas. Esto último constituye, en realidad, el germen de la nomenclatura química, iniciando el reconocimiento de su necesidad, lo cual tuvo una trascendencia enorme para el desarrollo posterior de la química como ciencia. También realiza una interesantísima clasificación de los metales en dos categorías: los metales «verdaderos» (oro, plata, hierro, cobre, plomo, mercurio y estaño) y los semimetales (arsénico, antimonio, zinc y bismuto). Todo ello le lleva a escribir en 1597 su gran obra *Alchemia*, considerada con justicia el primer manual de química. Se fueron escribiendo después otros muchos — incluso plagiados del de Libavio—, y algunos adquirieron gran difusión al ser traducidos a otras lenguas y también al latín.

Con todo, el iatroquímico más importante del Renacimiento fue sin duda Jean Baptiste van Helmont (1577-1644), nacido en Bruselas durante el dominio español en Flandes. Este médico y también químico fue tal vez uno de los científicos más señeros de su época, aunque su espíritu solitario y modesto le condujo raras veces fuera de su propio laboratorio, en el que permaneció casi toda su vida. Como médico rechazó, al igual que Paracelso, la medicina oficial de los galenistas. Pero en química dio un paso atrás al aceptar un principio general para toda la materia, que según su opinión era el agua (lo mismo que para el filósofo griego Tales, siglos VII-VI a.C.). Sin embargo, tuvo enormes aciertos, como sus trabajos sobre gases o «sustancias aéreas» que se desprendían en muchas reacciones. Él mismo las bautizó con esa palabra, gases, derivada del término griego *chaos*, debido a que carecían de forma. Aunque fracasó en sus numerosos intentos de recogerlos y aislarlos, realizó una cuidadosa clasificación de muchos de ellos, basada en sus propiedades físicas, distinguiendo entre dos clases, inflamables (gas pingüe) y no inflamables (gas silvestre). Otra de sus grandes aportaciones a la experimentación química fue la del control cuantitativo que él llevó a cabo mediante la pesada con balanza en los numerosísimos y cuidados trabajos de laboratorio que realizó (Wojtkowiak, 1986: 18).

Consideraba que la *iluminación personal* tenía una importancia mucho mayor que la razón, en la que no tenía ninguna confianza. Ese aspecto atrajo a ciertos grupos religiosos en Inglaterra, concretamente a los puritanos, que justificaron su revolución político-religiosa (liderada por Cromwell) a través de esa iluminación personal (Brock, 1992: 64). Posteriormente, cuando los puritanos fueron derrotados y desaparecieron de la escena política, la idea de la iluminación personal fue atacada en Inglaterra y con ello las doctrinas de van Helmont y sus seguidores.

Aunque escribió muchísimo, no publicó casi ninguno de sus trabajos en vida y fue su hijo quien realizó esta labor después de su muerte. Pese a ello, ejercieron una enorme influencia en la química de su época. Ejemplo de ello es su aportación a la *teoría ácido-alcalina*, de inestimable valor. Ácido/base son opuestos, en constante guerra, teoría dualista con claras reminiscencias de la teoría dualista del filósofo griego Empédocles (aprox. 490-430 a.C.) o del *yin* y el *yang* de la alquimia china. Demostró que la digestión era, en definitiva, un proceso químico de fermentación, en el que intervenía un ácido. También demostró que los organismos segregaban unos productos de tipo alcalino, las bilis. Pero con todo, estos procesos estaban impregnados de una esencia sobrenatural, ya que los ácidos de la digestión estaban gobernados por un proceso astral, siguiendo la terminología de Paracelso.

Todas estas ideas fueron recogidas y perfeccionadas por Franciscus Sylvius (1614-1672), discípulo de van Helmont y profesor de medicina, y por Otto Tachenius (1620-1690), a su vez discípulo de Silvio, los cuales extendieron esta teoría a otros procesos vitales.

Otro iatroquímico, al que hay que considerar ya químico y no alquimista fue el francés Jean Lemery, bastante posterior (1645-1715), cuyo *Cours de Chemie* (1675) resultó ser durante mucho tiempo el manual tradicional para la enseñanza de la química. Y también en esta línea habría que mencionar al alemán Johann Rudolf Glauber (1604-1670), iatroquímico, médico y además químico práctico, cuyas contribuciones más importantes fueron sus descripciones para preparar agua regia y muchas sales de los tres ácidos minerales fuertes. Obtuvo y descubrió la utilidad en medicina, como purgante, de la sal sulfato de sodio, *sal milagrosa*, y que se llamó también por ello *sal de Glauber*. Además, fue el primero en observar del valor del color de la llama y de los humos como indicios importantes desde el punto de vista del análisis cualitativo.

En definitiva, puede afirmarse que los iatroquímicos marcaron profundos avances en la trayectoria de la química, y más que ninguno van Helmont. A pesar de esto, en ellos siguió perviviendo el concepto de unos principios universales, propio de la alquimia antigua y medieval.

IV.a.3. Otros alquimistas

De la etapa renacentista ha quedado un texto sumamente interesante, *El Carro Triunfal del Antimonio*, que es en realidad la primera monografía dedicada a un elemento (Holmyard, 1925: 26).

Contiene todo lo que se sabía sobre las propiedades del antimonio y sus compuestos, concediendo especial atención a la aplicación de sus sales con fines curativos (así, en enfermedades venéreas, entre otros males). Presenta ensayos sobre la absorción de dichas sales, según se dice llevados a cabo en el siglo XV por un monje benedictino alquimista, el alemán Basilio Valentín, que pertenecía a una abadía benedictina en Erfurt (Prusia) y al que se atribuyó la autoría de esta obra. Y, precisamente, también según se dice fueron sus mismos compañeros de congregación, con los que a veces experimentaba estas sales, los que les dieron irónicamente el nombre de «anti-moine», o sea, antimonje (de la palabra «moine», monje en francés), de donde derivaría la palabra *antimonio* para el elemento correspondiente, que sustituyó al nombre latino de *stibium*. Se explican también en ese texto las *doce claves* o doce etapas necesarias para la preparación de la piedra filosofal, es decir, para lo que los alquimistas llaman la «gran obra» (figura 12). Muchas de las operaciones y técnicas que implican esas etapas de la gran obra son, realmente, procesos de refinado de metales nobles, mediante crisoles y copelas.

Sin embargo, hay muchas dudas sobre la existencia real de este alquimista y se piensa que sólo fue un personaje ficticio creado por el alemán Johann Tholde o Thöldius, fabricante de sal, quien publicó este libro en 1604. Lo cual no excluye que éste constituya un valiosísimo texto de alquimia.



Figura 12. Duodécima clave de El Carro Triunfal del Antimonio.

IV.a.4. Los alquimistas ante la sociedad

Con excepción de aquellos alquimistas acusados de charlatanería o falsedad, en general eran temidos y a veces perseguidos, pero también admirados y frecuentemente protegidos por mecenas. Tal es el caso de la protección a la alquimia por parte incluso de monarcas, como Rodolfo II (1552-1612, emperador del Sacro Imperio Germánico, de lo que queda como testimonio el llamado «callejón del Oro o callejón de Los Alquimistas», en el castillo de la ciudad de Praga, donde trabajó el famoso alquimista polaco Michael Sendivogius (1556-1636). O, también, Felipe II (1527-1598), rey de España y tío además de Rodolfo, que hizo construir en el monasterio de El Escorial un taller de destilación para trabajos de alquimia, que fue tal vez el más destacado de la Europa renacentista. Y a propósito de esto último, no puede olvidarse a Diego de Santiago, gran alquimista y seguidor de Paracelso, que trabajó en ese taller y que como destilador realizó importantes aportaciones, como la destilación a vapor y el montaje grandes torres de destilación (figura 13), reseñadas en su libro *Arte Separatoria*, de 1589 (Puerto, 2001: 115).



Figura 13. Destilatorio de Diego de Santiago.



Figura 14. El Alquimista, óleo de David Teniers (Museo del Prado, Madrid).

En cuanto a la admiración que despertaban los alquimistas, buena prueba de ello es su papel protagonista en algunas obras de pintores tan famosos en aquellos tiempos como son, entre otros, Pieter Brueghel el Viejo (1525-1569) o David Teniers el Joven (1610-1690) (figura 14). U obras escritas, como la pieza teatral *The Alchemist*, del escritor inglés Ben Johnson (1572-1637).

IV.b. Evolución de la Alquimia después del Renacimiento

Desde el punto de la química en la Edad Moderna se pueden distinguir tres etapas. Una primera con evidentes vestigios medievales, es decir, alquímicos, que se extendería hasta la mitad del siglo XVI, aproximadamente y en la que el hecho más importante es el surgimiento de la *iatroquímica*. Una segunda, de transición, en la que se va entrando en ese dominio de la razón característico del Renacimiento, por lo que podríamos denominarla como etapa del inicio de la química científica (llega hasta la segunda mitad del siglo XVII y es Boyle su mejor representante). Después, hay una tercera etapa en la cual la química continuará su evolución a lo largo del siglo XVIII, hasta alcanzar su revolución científica a finales de ese siglo. Y a medida en que la química científica va avanzando, la alquimia decae y sus seguidores cada vez son menos numerosos.

A partir del siglo XVII se va contando con un mayor dominio en la experimentación química y se descubren nuevas sustancias y sus propiedades. Todos estos conocimientos dieron lugar a que la transmutación, eje central de las doctrinas alquímicas, tuviera un rechazo creciente. No obstante, y aunque la alquimia no cuente ya en su historia con nombres importantes, de una manera u otra seguía teniendo adeptos. Dejando aparte los fraudes, muchos de ellos fáciles de conseguir entre una población bastante crédula ante determinados fenómenos, hay que considerar que la filosofía corpuscular permitía en principio la transmutación. Esto puede justificar, al menos en parte, la pervivencia de la alquimia, si bien en un franco proceso de declive. No obstante, es sorprendente el hecho de que mentes de tanta valía y de un cientifismo fuera de toda duda como las de Robert Boyle (1627-1691) e Isaac Newton (1642-1727) creyeran en la alquimia e, incluso, la practicasen. Boyle describe la transmutación a oro en algunos de sus textos y, en cuanto a Newton, se ha encontrado un enorme número de manuscritos sobre alquimia, dándose el hecho curioso de que fueron recopilados por el prestigioso economista británico John M. Keynes (1883-1943) hace relativamente poco tiempo, en 1936 (Brock, 1992: 45).

Hacia finales del siglo XVII la antigua idea de elementos o principios universales empezó a ser abandonada. Se conocían los ácidos minerales más importantes (incluso, el sulfúrico o aceite de vitriolo se obtenía comercialmente), álcalis fuertes y débiles, numerosas sales empleadas con fines medicinales y para otros usos, así como algunos —aunque no muchos— compuestos orgánicos. Todo lo cual dio paso a gran número de nuevos experimentos que condujeron a un imparable progreso hacia la química como ciencia (Ihde, 1984:30).

No obstante, también a través de algunos alquimistas se consiguen importantes avances en ciertos capítulos de la química práctica. Un buen ejemplo de ello es el descubrimiento del secreto de la producción de porcelana (a imitación de la valiosísima porcelana china), éxito reservado a los alemanes. La economía de los numerosos estados alemanes del Sacro Imperio Romano Germánico quedó devastada tras la Guerra de los Treinta Años (1618-1648). Por este motivo, entre los gobiernos de esos estados surgió un movimiento para intentar su recuperación económica. A partir de entonces se protegió la economía desde el estado, fomentando la industria y el comercio y controlando fuertemente las materias primas, con el fin de que

fueran utilizadas con mayor provecho. Este movimiento, por el desarrollo de las cámaras de industria y comercio a que dio lugar, se llamó cameralismo, de la palabra alemana «*kammera*», o sea, cámara (Brock, 1992:85). Parece ser que el inventor de la porcelana europea fue Johann Friedrich Boettger (o Böttger, 1682-1719), alquimista asistente de un boticario de Berlín, ciudad de la que se dice tuvo que huir por haber entregado a Federico I de Prusia (1657-1713) una pieza de oro falso, supuestamente obtenido con sus artes alquímicas. En 1701 se refugia en Dresde, donde es protegido por el elector de Sajonia Federico Augusto II (1670-1733), también rey de Polonia (allí conocido como Augusto II el Fuerte), quien convencido de los poderes de la alquimia, le obliga a fabricar oro para las arcas reales. El supervisor de los trabajos del joven alquimista era Ehrenfried Walther von Tschirnhaus (o Tschirnhausen, 1651-1708), matemático, físico, médico y filósofo alemán, quien a su vez estaba investigando sobre la forma de obtener porcelana. Tras morir éste, se dice que Boettger tuvo el acierto de mezclar caolín blanco con feldespato y cuarzo, sometiendo la mezcla a una cocción entre 1300 y 1400 °C durante doce horas, con lo cual consiguió en 1709 una porcelana de excelentes cualidades. Sin embargo, hay historiadores que afirman que el verdadero inventor de la porcelana europea fue von Tschirnhaus, quien muy al final de sus días habría realizado ese hallazgo. En cualquier caso, con este triunfo de la química nació la primera fábrica de porcelana en Sajonia, concretamente en *Meissen* (1710), hecho que inicia una verdadera tradición en fabricación de porcelanas europeas (Partington, 1961-1970: 723).

Con todo, la alquimia —sobre todo la esotérica— continuó teniendo una influencia considerable en ese siglo, principalmente en Europa Central, y todavía se defendía la intervención de Dios como primer principio necesario en todas las operaciones alquímicas. Sin embargo, ya en ese tiempo la comunidad científica negaba la posibilidad de la transmutación, considerando a la alquimia como una pseudociencia. Aún así seguía contando con algunos seguidores que la defendían con entusiasmo, como James Price (1725-83), miembro de la Royal Society, que financió con su propio dinero experimentos alquímicos. O con asociaciones inclinadas a la alquimia, como es el caso de la *Orden de Rosacruz*, fundada en Alemania a principios del siglo XVII, vinculada a la masonería y a la cábala judía, y a la que perteneció nada menos que Federico Guillermo II de Prusia (1744-1797). Estudiosa de los manuscritos alquímicos, publicó gran número de textos de la alquimia (más que nada en su vertiente esotérica), y en ella se llegaron a realizar trabajos prácticos de este tipo (Brock, 1992: 52).

V. Y después...

Esporádicamente han surgido personajes, incluso hasta finales del siglo XIX, que aseguraban ser testigos de transmutaciones. Y a principios del siglo XX, en 1929, se publica *El Misterio de las Catedrales*, de Fulcanelli (seudónimo de un autor desconocido), libro que ha alcanzado gran difusión y en el que a través de las esculturas de las catedrales góticas se explican muchas de las operaciones y misterios de la alquimia. Asimismo, actualmente subsisten muchas organizaciones que se declaran herederas de los rosacruces tradicionales.

Pero en cualquier caso el interés y curiosidad por la alquimia no se ha perdido ni en nuestros días. Siempre ha sido un polo de atracción, con un poder casi magnético, para muchos que sienten una mezcla de curiosidad y de respeto por una disciplina que trata de dar respuesta a preguntas sobre el sentido del hombre y del mundo. Para todos aquellos que sienten una inquietud espiritual y piensan que el funcionamiento del universo está gobernado por unas normas que trascienden las leyes estudiadas por las ciencias experimentales.

VI. Recapitulación

La alquimia, aunque se desarrolló a lo largo de muchos siglos, no ha contribuido a crear una teoría paralelamente a los progresos que indudablemente produjo, por otra parte, en los aspectos técnicos y prácticos. A causa de su vertiente eminentemente esotérica carecía de una perspectiva crítica a la luz de la cual realizar sus experimentos, y pese a la gran labor llevada a cabo por los alquimistas, su contribución a la construcción del cuerpo teórico de la química fue prácticamente inexistente. Su objetivo final era la transmutación de los metales a oro, para lo cual había que llegar a la «gran obra» alquímica, es decir, a la piedra filosofal. De esta manera, los alquimistas se vieron obligados a realizar una enorme cantidad de experimentos, con cual descubrieron nuevas sustancias, inventaron procedimientos de obtención de las ya conocidas y fueron acumulando datos sobre las propiedades de todas ellas. Pero ante todo su máxima aportación fue el idear y perfeccionar muchas técnicas de laboratorio, preferentemente las relativas a separación y purificación y, entre todas ellas, la *destilación* y el tratamiento y refinado de metales. Incluso, si nos remontamos a sus primeros tiempos, muchas de las operaciones y aparatos básicos que hoy seguimos empleando en nuestra actividad química diaria son, prácticamente, los mismos que empleaban aquellos alquimistas greco-egipcios en sus talleres. En consecuencia, dónde realiza la alquimia una aportación importantísima desde la perspectiva de la evolución de la química, es en el terreno práctico, con la invención y desarrollo de aparatos y de técnicas experimentales.

Conociendo algo más sobre la alquimia es, pues, casi imposible poner en duda su contribución al surgimiento de la química y a su posterior evolución para ser ciencia. Además, a menudo no es fácil separar el binomio alquimia/química. Y, a veces, resulta prácticamente imposible, ya que eran la misma cosa y esa diferenciación responde a un problema más bien de tipo semántico. Bien puede comprenderse si analizamos el origen de esas palabras, química y alquimia.

VI.a. Origen de las palabras química y alquimia

Existe una palabra griega, *chymia*, *chemia* o *chemeia*, según las transcripciones, relacionada con la metalurgia y cuyo significado concreto era el de fusión o colada de un metal, si bien fue un término que no se empleó hasta aproximadamente el año 300 d.C. Por esta razón, los escritores del mundo clásico, griegos o romanos, no la utilizaron aunque se refiriesen a la actividad química, pues carecían de un término específico para nombrarla. La primera vez que aparece el término «*chymia*» es en ciertos textos del alquimista griego Zósimo de Panopolis, quien utiliza en alguna ocasión esta palabra cuando habla del «arte sagrado» realizado en el templo de Menfis dedicado a Phta, dios egipcio del fuego y del trabajo de los metales.

Sin embargo, el origen de este término griego de *chymia* no es tampoco muy claro. Para algunos historiadores podría derivar de la palabra copta «*khem*» o «*chamé*», que significaba «negro» y se la asociaba a la tierra negra de Egipto, en el valle del Nilo, tierra que era utilizada en la Antigüedad en procesos metalúrgicos, en tintes y en farmacia. Incluso, a Egipto se le llamó en ciertos momentos *Chemia* y *Chamia* (país de Cham o país de esta «tierra negra»). Otros le atribuyen un origen chino, bien del término *kim-ya*, que significaba «jugo que produce oro», o bien de *chin*, relacionado con el proceso de la transmutación. En cualquier caso estaba asociado al arte de fabricar oro, y así desde China se podría haber extendido hasta los griegos para después ser recibido por los árabes.

Estos últimos antepusieron su artículo «al» a ese término, resultando *al kimiya* o *alkymia*. De aquí proviene la palabra «alquimia», con la cual se hizo referencia al hacer químico de los siglos IV al XVI, manteniendo esa idea de «arte sagrado». Ya en el siglo XVI se latinizó esa palabra y empezó a aparecer en los textos de química —o más bien de alquimia— de la época sin el prefijo *al*. De esta manera, en los escritos de Paracelso, Agrícola o Livabius cada vez son más frecuentes los términos *chymia*, *chymista*, *chymicus*..., de los que derivan las palabras chimie, química, chemistry, chemie o química en diferentes idiomas. La palabra alquimia, por su parte, se fue relegando poco a poco para designar las prácticas de carácter esotérico (Brock, 1992: 44).

Por tanto, algunos investigadores en historia de la ciencia sugieren el empleo de los términos *chymia* o *chymica*, que incluirían tanto los trabajos relativos a los objetivos meramente alquímicos, como los de la química aplicada, evitando así esa dicotomía a veces carente de un verdadero sentido.

De todo lo anterior, podemos deducir que la alquimia no está tan alejada de la química como muchos han pretendido. Y afirmar así con Liebig que, en cierto modo, fue el antecedente directo de nuestra química.

VII. Bibliografía

- Aristóteles (1997), *Los Meteorológicos*, Madrid, Alianza.
- Bensuade, Bernardette y Stengers, Isabelle (1992), *Histoire de la Chimie*, Paris, La Découverte.
- Brock, William H. (1992), *Historia de la Química*, Madrid, Alianza.
- Eliade, Mircea (1983), *Herreros y Alquimistas*, Madrid, Alianza.
- Esteban, Soledad (2001), *Introducción a la Historia de la Química*, Madrid, Col. Cuadernos de la UNED.
- _____ (2003), «Paracelso el Médico, Paracelso el Alquimista». En *Anales de Química*, Vol. 99, N° 4.
- _____ (2004), «La Química en el Renacimiento». En *Anales de Química*, Vol. 100, N° 3.
- _____ (2005), «Las Joyas en el Contexto de la Historia de la Química». En *Anales de Química*, Vol. 101, N° 2.
- _____ (2006), «Historia de la Alquimia I: la Alquimia Griega». En *Anales de Química*, Vol. 102, N° 2.
- Hoefer, Ferdinand (1866), *Histoire de la Chimie* (Tomo Primero), Paris, Gutenberg Reprints.
- Holmyard, Erick J. (1925), *Chemistry in the Time of Dalton*, London, Oxford University Press.
- Hopkins, Arthur J. (1925), «A Modern Theory of Alchemy», en *Isis*, Vol. 7.
- _____ (1938), «A Study of the Kerotakis Process as Given by Zosimos and Later Alchemical Writers». En *Isis*, Vol. 29.
- Ihde, Aaron J. (1984), *The Development of Modern Chemistry*, New York, Dover Publications, Inc.
- Multhauf, Robert P. (1966), *The origins of Chemistry*, London, Oldbourne.
- Pagel, Walter (1982), *Paracelsus: An Introduction to the Philosophical Medicine in the Era of the Renaissance*, Basel/ New York, Karger.
- Partington, James R. (1945), *Historia de la Química*, Madrid, Espasa-Calpe.
- _____ (1961-1970), *A History of Chemistry* (v. 2), London, Macmillan & Co.
- Puerto, Javier (2001), *El Hombre en Llamas. Paracelso*, Madrid, Tres Cantos/ Nivela.
- Sarton, George (1959), *Historia de la Ciencia. La Ciencia durante la Edad de Oro griega. Ciencia y Cultura en los últimos tres siglos A.C.*, Buenos Aires, Eudeba.
- Taton, René (1989), *Historia General de las Ciencias*, Barcelona, Destino.
- Tomás de Aquino (1987), *Tratado de la piedra filosofal y Tratado sobre el arte de la alquimia*, Málaga, Sirio.
- Von Liebig, Justus (1851), *Familiar Letters on Chemistry*, London, Taylor, Walton and Maberly.
- Wojtkowiak, B. (1986), *Historia de la Química*, Zaragoza, Acribia.

7. Leonardo da Vinci

Un estudio de la unidad de su pensamiento y su lugar en la historia de la ciencia²

I. Introducción

El estudio de Leonardo da Vinci se presenta como una tarea un tanto difícil de aprehender, ya que a través de los más de cinco siglos que nos separan, ha sido abordado por artistas, historiadores, científicos de diversas áreas, y filósofos, entre otros, que han encontrado, o han creído encontrar en él, una explicación para la génesis, antecedente, o desarrollo de sus campos de conocimiento. Por esta razón, sólo contamos con imágenes fragmentarias, que en muchos casos son más reveladoras de los estudiosos que del objeto estudiado. En el presente trabajo, no pretendemos pasar revista a las numerosas lecturas y relecturas de Leonardo, sino, más bien, concentrarnos en el análisis del perfil científico de este indudable genio de la historia de la humanidad. Un elemento fundamental para esto, ha sido la consciente decisión de recurrir a las fuentes primarias que poseemos de Leonardo, es decir sus propios manuscritos, dibujos, cartas, y algunos otros escritos realizados por sus contemporáneos que han llegado a nuestros días.

El presente artículo se organiza en tres grandes partes. En primer lugar, se presenta un esbozo del especial contexto histórico en que transcurren la vida y las indagaciones del maestro, para luego incluir una breve reseña de su vida. Luego, abordaremos los debates historiográficos acerca de la posibilidad de caracterizarlo como científico, su lugar en la tradición científica, la unidad de su pensamiento, y las discusiones acerca de si lo que prima en Leonardo es el artista o el científico. Por último, abordaremos sus indagaciones en las ciencias naturales, la matemática, la física y la técnica.

II. Breve contexto histórico

La vida de Leonardo da Vinci transcurrió entre los siglos XV y XVI, momento de transición cultural que ha suscitado numerosas revisiones por parte de la historiografía, llamado

² Una versión preliminar del presente artículo se encuentra en Assandri (2008).

Renacimiento. El Renacimiento, representa esa etapa intermedia del mundo occidental, momento de tránsito entre la sociedad feudal de la Edad Media —tradicionalmente ubicada entre los siglos V y XV— y el nuevo tipo de civilización que recibe el nombre de «Época Moderna» —que abarca desde finales del siglo XV hasta las postrimerías del siglo XVIII—.

La palabra «Renacimiento» en la Europa occidental del siglo XV señala ese «volver a nacer» del interés por la cultura clásica de la Antigua Grecia y Roma, que tuvo su epicentro en la península itálica. Si bien es cierto que existe un fuerte y renovado interés en el rescate de los clásicos, no es que este fuera nulo durante la Edad Media, ya que encontramos fervientes admiradores de la cultura greco-latina en escritores de la talla Juan de Salisbury y Dante Alighieri, entre otros. Además, como señala el historiador del arte Erwin Panofsky (1962), durante la Edad Media existieron importantes movimientos de renovación, los denominados protorenacimientos y protohumanismos, con lo que argumenta que no se debería hablar de un Renacimiento sino de varios Renacimientos³. Por su parte, los historiadores Romano y Tenenti consideran que este vocablo se encuentra cargado de un apriorístico juicio de valor positivo, viéndose así al renacimiento como «un momento privilegiado de la humanidad occidental, como una especie de anuncio de una revelación laica, el largo instante de concepción del mundo moderno.» (1998: 128-129) Por tanto, prefieren hablar de Humanismo, destacando su tendencia a la universalidad y su capacidad de expresar valores adecuados a un tipo de sociedad en desarrollo dinámico. El humanismo italiano en el siglo XV, aunque también es posible hablar de humanistas antes de 1350, aparece esencialmente ligado a la ideología de una burguesía mercantil, ciudadana y precapitalista. Este humanismo se caracterizará por ser una cultura abierta, libre y dinámica que no puede aceptar opresiones y alienaciones sobre el hombre (Romano/ Tenenti, 1998).

Lo cierto es que después de la crisis del siglo XIV, la vida y el pensamiento europeo experimentaron diversos cambios, aunque ninguno de ellos fue inesperado. Los hombres del siglo XV eran concientes de la gran transformación que se había operado en su tiempo con respecto a la época anterior, a la cual le negaban todo valor positivo. Vemos vestigios de este concepto en que, durante el siglo XIX y comienzos del XX los historiadores concebían a la Edad Media como época de oscurantismo. Justamente para diferenciar estos dos periodos que se valoraban como tan distintos es que se llamó a la nueva época con el nombre de «Moderna».

Como mencionamos anteriormente, el grupo social más activo en esta transformación fue la burguesía mercantil. El fin de la Edad Media trajo consigo grandes conmociones políticas y sociales, como la Guerra de los Cien Años, la Muerte Negra, las hambrunas, los levantamientos campesinos, el debilitamiento de los gremios y del régimen feudal⁴. En la Baja Edad Media los burgos crecieron para transformarse en ciudades en forma conjunta con una revolución comercial. Estos procesos también se relacionan con una serie de fenómenos que se produjeron entre los siglos XI y XIII, como ser: el final de las invasiones y la llegada de la paz y seguridad en Europa, la expansión demográfica, las Cruzadas que intensifican el comercio, y, por último, el nacimiento o renacimiento de las ciudades y de centros económicos (Le Goff, 1991). Con el desarrollo de la vida urbana cambia totalmente el tipo de organización social y de mentalidad. La sociedad medieval se hallaba clasificada

3 Panofsky considera que los movimientos de renovación a los del Imperio Carolingio, del espacio Anglosajón del siglo X y de las postrimerías del siglo XI.

4 Véase en este mismo volumen el artículo de Margarita Santana de la Cruz, «Ciencia y Filosofía en la Edad Media: la disputa entre Razón y Fe» (*comps.*).

en tres estados: el orden de los clérigos, el de los combatientes, y el de los trabajadores. Por tanto, «el ciudadano», es un ser difícilmente clasificable, pues representa una forma de vida y de mentalidad nuevas en esta sociedad feudal⁵. Esta burguesía de las ciudades, liberada de la rigidez social de la Edad Media, y de su cultura geocéntrica, elabora un nuevo modelo cultural cuyas bases son: la confianza en la razón humana, la ambición material, y el deseo de gloria. Por tanto su centro, no era Dios sino el hombre. Estos hombres tienen un papel capital en el desarrollo de una cultura laica, y si bien buscan una evasión de la Iglesia y de su mentalidad religiosa tradicional, no todos dejan de cultivar la piedad⁶. Por tanto, disciplinas hasta entonces dejadas de lado (como las matemáticas, la historia, la geografía y la literatura) llaman la atención de un público culto y laico.

A pesar de que este modelo humanista había empezado a forjarse durante los últimos siglos de la Edad Media, resultó muy difícil implantarlo frente al arraigado teocentrismo medieval. Fue necesario buscar apoyo en otros humanismos. Los textos de la Antigüedad venían suscitando cuestionamientos por parte de muchos europeos sobre el teocentrismo cultural propuesto por la Iglesia desde hacía dos o tres siglos. La estricta vigilancia de las autoridades eclesiásticas y la verdadera escasez de material clásico mantenían limitada la influencia de los antiguos, sin subestimar las contribuciones de los musulmanes al acervo cultural europeo⁷. Esta situación dio un giro cuando en 1453, Constantinopla —milenaria capital del Imperio Romano de Oriente— cae en manos de los turcos. Los bizantinos habían permanecido estudiando, comentando, y copiando, el legado cultural de los clásicos, mientras que en Europa occidental muchos de estos conocimientos eran considerados como verdaderos pecados⁸. Cuando se produjo la caída de la ciudad, muchos sabios y concedores de la antigüedad clásica se refugiaron en las ciudades italianas, donde fueron acogidos prontamente por su conocimiento del griego —fundamental para acceder a muchos textos clásicos— y porque muchos de ellos traían consigo textos desconocidos en Europa. Debido a la invención de la imprenta, estos humanistas italianos dispusieron de muchos textos antiguos, a la vez que la utilizaron para difundir el fruto de sus estudios⁹. Por tanto, estos hombres desarrollan el Humanismo, que no se inspira en fuentes cristia-

5 Para una explicación más detallada del surgimiento de la vida urbana en la Edad Media, así como de las discusiones historiográficas acerca de una ruptura o una continuidad en la historia urbana, ver Balard/Genêt/ Rouche (1989: 161-173).

6 Le Goff (1991: 104-108) resalta la necesidad por parte de los mercaderes de una enseñanza que se acomodara a sus necesidades, y por tanto la influencia de la clase mercantil sobre la enseñanza se hace sentir en los ámbitos de la escritura, la aritmética, la geografía, la historia y las lenguas vivas.

7 Cabe recordar que fueron los musulmanes quienes, en el siglo VII, al invadir Egipto, el norte africano, España, y en Oriente hasta la India, entraron en contacto con los manuscritos antiguos que habían sido llevados por estudiosos alejandrinos. Ellos tradujeron obras de Aristóteles, Ptolomeo, Arquímedes y Euclides, y llevaron estos saberes a los territorios conquistados. De esta manera, en pleno «oscurantismo» medieval, ellos reanudaron el debate científico sobre las áreas de la astronomía, la óptica y la matemática.

8 La actitud de la Iglesia con respecto a la investigación científica de la naturaleza fue heterogénea. Hasta el siglo X, cuando la autoridad de la misma se consolida, el pensamiento cristiano fue hostil a la ciencia y filosofía natural, siendo identificados como elementos paganos. Esta situación cambia a partir del siglo X, cuando algunos integrantes del clero, habiéndose organizado la Iglesia y afianzado su hegemonía cultural, se interesan por la discusión del estudio de cuestiones naturales (Boido, 1996: 45-56).

9 Si bien es cierto que la invención de la imprenta significó una mayor divulgación de los textos antiguos y los del Renacimiento, algunos historiadores señalan que en realidad esto ocurre en la segunda mitad del siglo XVI, ya que de acuerdo a las pruebas que se poseen, antes de la mitad del siglo XV no existía prensa alguna para imprimir, época en la cual ya se hallaba en pleno desarrollo el Renacimiento italiano. Además, la mayoría de los primeros humanistas demostraron contrarios al invento nuevo ya que no

nas, sino en fuentes latinas, griegas y judías. En algunos casos se deja de lado a Aristóteles, en otros se lo revaloriza, pero las miradas se concentran en Platón.

Esta coyuntura política benefició enormemente a las ciudades italianas, las que se vieron favorecidas, luego de la caída de Constantinopla, con la reanudación del comercio con Oriente. De este modo, los puertos de Venecia, Nápoles, Génova y Pisa gozarán por años del control del comercio Mediterráneo, mientras que la burguesía mercantil de Florencia, Bologna y otras ciudades lombardas, actuarán como principales agentes en el comercio entre el norte y sur de Europa. Este enriquecimiento económico fue el fundamento sobre el cual se desarrolló el progreso intelectual y artístico.

Por último, debemos referirnos a un grupo de personas que aceleraron el desarrollo del Renacimiento, los protectores de la cultura o mecenas. Éstos eran tanto seglares como eclesiásticos, destacándose entre los primeros, los Médici de Florencia, y los Sforza de Milán. La mayoría de estos protectores habían forjado su riqueza en la actividad mercantil, y tenían gran poder político en las ciudades-repúblicas, donde vivían. En el segundo grupo, el de los mecenas eclesiásticos, encontramos a los papas Nicolás V, Pío II, Julio II, y León X.

A modo de balance final de este contexto histórico, es imperioso destacar que este Renacimiento fue mucho más que una simple restauración de la cultura pagana, pues si bien sus bases fueron clásicas, implicó novedosas realizaciones en la ciencia, la política, la filosofía, la literatura, el arte, y la religión, que poco tenían que ver con el legado greco-latino. Además, el Renacimiento, por ser puente entre dos épocas, implicó un cierto continuismo del espíritu naturalista y secular medieval. Pero, por otra parte, muchas de sus creencias y actitudes lo diferencian de las del mundo medieval, como es el caso del resurgimiento de la teoría heliocéntrica en el siglo XV¹⁰, con la consecuente ampliación de la meta del conocimiento humano y de la crisis de la filosofía escolástica.

Es en esta Italia, poblada ciudades pujantes, de mercaderes empaquetados de una cultura laica, que encontramos a la ciudad de Florencia, primer centro desde donde se irradia el Humanismo. El autor clásico más venerado fue Platón, así como también lo fueron sus seguidores neoplatónicos, en especial Plotino, del siglo III. Estas obras, junto con las de Epicuro y Lucrecio, se podían ahora leer en el original, pudiendo prescindir de la intermediación de la filosofía cristiana. Entre los renacentistas neoplatónicos que más se destacan en las traducciones y comentarios de Platón encontramos a Marsilio Ficino, erudito de gran importancia en la Accademia florentina fundada a principios del siglo XV por Cosimo de Medici. En esta Accademia, debatían artistas, literatos y filósofos, quienes encontraron en este ámbito una posibilidad de libertad frente a las rígidas universidades medievales de la península itálica y Francia. Estos hombres que adherían al neoplatonismo, y que se oponían a la escolástica y resaltaban los valores greco-latinos, buscaron los orígenes de la doctrina cristiana entre los autores paganos. Creían que la razón por la cual el hombre era creador, era porque compartía la naturaleza divina¹¹. Es este un momento de cambios a nivel de la filosofía, en donde la escolástica se encuentra en declinación, así como también hay un re-

deseaban que sus obras llegaran a las manos de un vulgo que no sería capaz de comprenderlas (Mc Nall Burns, 1962: 394-395).

10 Véase en este mismo volumen el artículo de Marina Camejo, «Conceptos fundamentales de la teoría copernicana» (*comps.*).

11 Pico della Mirándola, otro famoso miembro de la Accademia florentina, argumentaba que Dios había instalado al hombre en el centro del universo para que desde allí pudiera ejercitar su libre albedrío, como si fuera él mismo el creador.

surgimiento de la búsqueda de soluciones a problemas prácticos y su consecuente desarrollo de las técnicas. Es en este complejo e intrincado momento histórico que Leonardo da Vinci desarrolla su obra, personaje, para muchos, que tuvo un papel de suma importancia como antecedente directo de la Revolución Científica del siglo XVII.

III. Reseña biográfica: Leonardo da Vinci (1452-1519)

Leonardo nació en la ciudad de Vinci el 15 de abril de 1452. Hijo natural de un importante notario llamado Piero y de una campesina, Caterina, de la que sólo se sabe que al poco tiempo de dar a luz, deja a su hijo en manos de la familia paterna, contrayendo, tiempo después, nupcias con un tal Acattabriga di Pietro del Vacca y desapareciendo para siempre de su vida. Es poco lo que ha llegado a nuestros días de la infancia de Leonardo, sólo que desde pequeño tenía un excepcional talento para el dibujo. Giorgio Vasari, su primer biógrafo, relata que su padre llevó un día algunos de los dibujos de su joven hijo al famoso escultor y orfebre Andrea del Verrocchio, para consultarle si, de dedicarse al dibujo, su hijo podría destacarse. Andrea habría quedado impactado por estos dibujos, alentando a Ser Piero a llevar a Leonardo para que se convirtiera en aprendiz de su taller.

Así comienza su aprendizaje en la ciudad de Florencia, donde frecuenta el taller de Verrocchio, desde 1467 o dos años después hasta 1472. En esta primera etapa adquiere conocimientos más allá del dibujo y de la pintura, como son los de la *artes mechanicae*, que habría de hacer de él un artista técnico. Los talleres formaban a los aprendices en diversas áreas para que, pudieran desempeñarse en la pintura, escultura, construcciones de iglesias, palacios, fortalezas, máquinas de guerra, puentes, diques, máquinas teatrales o máquinas de guerra. En esa época el empirismo iba de la mano con indagaciones científicas, siendo estos los conocimientos transmitidos generación tras generación en los talleres florentinos (Marioni, 2005: 14-15).

Después de pasar algunos años en Florencia, y habiendo desarrollado sus cualidades artísticas, el joven Leonardo ofrecería sus servicios como ingeniero en una carta al duque Ludovico Sforza de Milán, apodado El Moro¹². Esta carta, que data de alrededor de 1482, sorprende por el hecho de que fundamenta sus capacidades para desarrollar inventos en el arte de la guerra y de urbanismo, dejando solamente un párrafo para promoverse como pintor y escultor, pero aclarando que, en este aspecto, es uno de los mejores (Marioni, 2005: 149-151). Leonardo se traslada a Milán en ese año, donde se dedicó a variados asuntos, desde trabajos de arquitectura e ingeniería militar y civil, pasando por estudios de anatomía, geometría y física, a sus famosas obras artísticas «La Virgen de las Rocas» y «La Última Cena». Es en este periodo, que también escribe gran parte de su *Tratado de la Pintura*. En esta época, iba creciendo en Leonardo el interés por problemas específicos que lo llevaron a estudiar el latín y libros de ciencia, así como a proyectar diversos libros. Con la invasión de Milán por parte de tropas francesas en 1499, se pone al servicio de esta nueva corte, pero poco después comienza su largo peregrinaje, pasando por Venecia, Florencia, Urbino, y Roma.

¹² Se ha destacado que Leonardo deseaba ir a Milán con el probable propósito de obtener encargos de mayor importancia que los que había tenido en Florencia hasta ese momento. Además, en esa época Ludovico el Moro había convocado a un concurso para diseñar y fundir un monumento ecuestre de tamaño mucho mayor que el natural para celebrar la memoria de su padre, Francesco Sforza (Zöllner, 2000: 29).

Regresa a Milán en 1506, poniéndose a la orden del gobernador francés Carlos d'Amboise, pero por poco tiempo, ya que el control francés es derrotado en el ducado. De este modo, Leonardo vuelve a Roma, donde trabajó hasta 1516 para Giuliano de Médicis, hermano del papa León X. En este período también trabaja como ingeniero militar a las órdenes del general César Borgia, con quien recorrió la zona central de Italia elaborando dibujos geográficos cuyo principal objetivo era el estratégico militar. También, por un breve lapso, vuelve a Florencia donde pinta su famosa «Mona Lisa» (ver figura 1) y trabaja en la realización de pinturas murales para la Sala del Consejo del Palacio de Gobierno de Florencia, memorable ocasión en la cual se encuentra con el otro encargado de estas obras, el joven Miguel Ángel.



Figura 1. *La Gioconda (Mona Lisa)*, c. 1503-1506. Museo del Louvre.

Cabe destacar, que en estas últimas épocas su producción artística fue en declive, concentrándose en problemáticas y estudios de índole científicos. Además, una constante en los escritos de sus contemporáneos es la repetida queja acerca de la característica del maestro de no terminar sus encargos¹³. No se tienen datos acerca de las razones por las cuales abandona la Ciudad Eterna, pero al poco tiempo de llegar, Leonardo se traslada a Francia¹⁴. Es interesante recordar que en este viaje final el artista y científico lleva consigo alguno de los cuadros que hoy se conservan en el museo del Louvre, así como varios millares de hojas con manuscritos y dibujo. En Francia, su gran admirador el rey Francisco I, le ofreció un sueldo relativamente alto y el Palacio de Cloux en Amboise, donde pasa los tres últimos años de su vida. En ese palacio muere el 2 de mayo de 1519, según cuenta Vasari, en los brazos del fiel Francesco Melzi, a quien habría legado todos sus manuscritos.

A partir de esta breve biografía podemos destacar características relevantes para nuestro estudio. Por un lado, que Leonardo, por su condición de hijo ilegítimo, no recibió educación

13 El humanista Paolo Giovio, en su biografía de Leonardo de 1527, expresa su siguiente opinión sobre Leonardo: «Pero mientras ocupaba su tiempo con investigaciones en áreas de importancia subsidiaria para el arte, solo fue capaz de terminar muy pocas obras a causa de su carácter veleidoso e inconstante; su talento aspiraba de tal modo a la perfección y era tan exigente consigo mismo que comenzaba muchas cosas y después las abandonaba.» (Zöllner, 2000: 7). También Vasari señala lo mismo: «Se encuentra que Leonardo para la inteligencia del arte comienza muchas cosas que nunca termina, pareciéndole que la mano no podía añadir mas perfección a las cosas, que imaginaba, con esto, ideaba tales dificultades, que con las manos, aún que ellas fueran muy excelentes, no sabrían expresarlo nunca.» (Vasari, 2001).

14 Posiblemente la muerte de su protector Giuliano de Médicis en marzo de 1516 haya constituido una razón importante por la cual abandona Roma a fines del mismo año.

formal. Su formación fue aquella recibida en la casa de ser Piero y en el taller de Verrocchio. El historiador de la ciencia José Babini destaca positivamente esta cualidad de bastardo, ya que posiblemente un hijo legítimo de un escribano florentino habría cursado estudios en la universidad convirtiéndose en un médico, jurista o científico, pero se pregunta que si este hubiera sido el caso «...el mundo ¿habría tenido un Leonardo?» (Babini, 1969: 26).

IV. ¿Leonardo científico? Visiones y re-visiones historiográficas

En los últimos tiempos, se ha revalorizado la figura de Leonardo como precursor del método experimental, así como la de ser un adelantado en cuanto a los estudios, entre otros, de anatomía, zoología, botánica, física y geología. Esto se explica por la publicación y re-descubrimiento de nuevos manuscritos de Leonardo que permitieron una comprensión más cabal de sus investigaciones y procesos de pensamiento. Los estudios de un Leonardo científico datan de principios del siglo XX, con algunas pequeñas contribuciones del siglo anterior, época en la cual la mayoría de sus artículos son publicados.

Contamos hoy con muchas más fuentes que con las que contaban sus contemporáneos que, si bien nos brindan interesantes datos sobre Leonardo, teñían su imagen con los colores de leyenda. Ellos conocían más que nada al artista, y en parte al técnico, ya que sus manuscritos, que tratan fundamentalmente de sus estudios científicos, fueron publicados de forma más completa a fines del siglo XIX. Hagamos un breve repaso del destino de sus manuscritos, y de cuándo vieron la luz pública. Francesco Melzi, fiel discípulo en los últimos años de la vida de Leonardo, fue su quien por testamento del maestro heredó todos sus manuscritos. A la muerte de Melzi, los manuscritos leonardianos fueron heredados por sus familiares, a partir de quienes se dispersan por el mundo¹⁵. Luego de varios siglos de dispersión, compra, robos, donaciones y re-localización, los manuscritos que se han conservado, en líneas generales, se encuentran en Italia, Francia, Inglaterra y España y constituyen poco más de 6000 páginas, habiéndose perdido por lo menos una cuarta parte o cuatro quintas partes de los mismos. De estos manuscritos, el famoso *Tratado de la pintura*, posiblemente haya sido organizado por Melzi y publicado por primera vez en 1615 y luego en variadas ocasiones, hasta la edición crítica de 1882¹⁶.

A partir del estudio de estos manuscritos, que tienen la característica de tratar diferentes temáticas y encontrarse sumamente desorganizados, los estudiosos han tratado de encontrar una unidad en el pensamiento y en la producción de Leonardo. Esta unidad, para

15 A fines del siglo XVI, el escultor Pompeo Leoni consigue recolectar varios de estos folios y cuadernos y los reúne en volúmenes. Uno de ellos es el que se conocerá como el *Códice Atlántico*, fundamental para nuestro estudio pues los textos allí reunidos versan sobre varios de sus estudios científicos. En el siglo XVII se dispersan nuevamente, emigrando unos a Madrid o a Milán y perdiéndose otros para siempre. Con la invasión de Napoleón Bonaparte a Italia y su decreto de 1796 que requisaba obras de arte consideradas de interés, muchos fueron a parar a la Biblioteca de París. Otros, como los *Códices Forster*, antes llamados *South Kensington*, luego de pasar por Austria, terminaron formando parte del acervo del Victoria and Albert Museum en Londres. Los que en nuestros días pertenecen a la Colección de Windsor, fueron comprados por un lord inglés en varios países europeos en el siglo XVII. En 1967 se descubrieron dos manuscritos guardados en la Biblioteca de Madrid. Algunos otros Códices vincianos actuales se conocen con los nombres de *Códice Arundel*, *Códice Acerca del Vuelo de los Pájaros*, pero también hay colecciones de manuscritos clasificados según las letras del alfabeto, además de hojas y dibujos hoy en posesión de manos privadas y bibliotecas.

16 El *Tratado de la pintura* tiene la característica de incluir manuscritos hoy perdidos. Augusto Marioni, estudioso de los manuscritos leonardianos, explica que hoy sólo disponemos de una cuarta parte de los manuscritos que allí se compilan (Marioni, 2005).

algunos, estaría reflejando una típica mentalidad científica¹⁷. Siguiendo esta línea de pensamiento, las discusiones historiográficas giran en torno a tres ejes centrales: 1) si existe una continuidad entre los hallazgos medievales y/o de los hombres del Renacimiento, especialmente de Leonardo, y los grandes cambios generados por la Revolución Científica del siglo XVII; 2) si es posible considerar a Leonardo efectivamente un científico; 3) si Leonardo era un científico devenido en artista o un artista devenido en científico.

IV.a. La Revolución Científica: ¿continuidad o ruptura?

El periodo del desarrollo de la historia de la ciencia conocido con el nombre de «Revolución Científica» o «Revolución Copernicana» ha sido sujeto a visiones diversas por parte de historiadores, filósofos de la ciencia y epistemólogos¹⁸. Se han propuesto diversos criterios para su análisis, diferentes investigadores que habrían participado de ella y diferentes marcos cronológicos. En nuestro estudio, sólo resaltaremos que se ubica convencionalmente desde mediados del siglo XVI hasta fines del siglo XVII y que durante este proceso se instala un nuevo sistema de pensamiento que se opone y colabora con el derrumbe de concepciones continuistas de los griegos, que además habían sido cubiertas con un halo de autoridad por parte de la escolástica medieval¹⁹. Bernal explica, «Una imagen nueva del mundo, cuantitativa, atómica, infinitamente extendida y secular sustituyó a la imagen antigua limitada y religiosa que los escolásticos musulmanes y cristianos habían heredado de los griegos», agregando, «El jerárquico universo de Aristóteles dio paso al mundo mecánico de Newton» (Bernal, 1989: 285)²⁰.

Una de las mayores conquistas de la Revolución Científica del siglo XVII fue el desarrollo del método científico. Éste encuentra sus bases en el cambio de mentalidad, de sistemas de pensamiento, en el que operó el surgimiento y afianzamiento de una burguesía poderosa en lo económico e interesada en hacer evolucionar un sistema de ideas propio. En este proceso se vuelve a la lectura y estudio de los antiguos, algunos no considerados durante la época medieval, pero no para citarlos como autoridad, sino para utilizar sus métodos, que, unidos a los nuevos, permitieron su superación.

Los historiadores presentan diferentes visiones con respecto a la característica ‘revolucionaria’ de la transformación científica del siglo XVII. Algunos, seguidores de una tesis ‘continuista’, destacan que los hallazgos del siglo XVII son, en gran parte, una reelaboración creativa del pensamiento medieval²¹. Otorgan, además, a los eruditos de fines de la Edad Media y del Renacimiento la importancia de haber puesto los cimientos de la ciencia

17 Martin Kemp (2006) explica que la hipótesis central en sus trabajos es que «bajo la diversidad que tanto caracterizó a Leonardo subyace una sólida unidad.» También comparten esta visión José Babini (1969), Marioni (2005) y Capra (2008).

18 Para profundizar en las diferentes percepciones históricas de las Revoluciones Científicas, ver Boido (1996: 228-232).

19 La Revolución Copernicana comprendería ese siglo y medio que tendría como comienzo el libro de Copérnico *De revolutionibus orbium caelestium* (Sobre la revolución de las esferas celestes) en 1543, y como finalización el libro de Isaac Newton *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Principios matemáticos de filosofía natural), publicado en 1687.

20 Véase en este mismo volumen los artículos de Marina Camejo, «Conceptos fundamentales de la teoría copernicana», Inmaculada Perdomo Reyes, «J. Kepler (1571-1630): la creatividad y el rigor en la búsqueda de la armonía del mundo», y Godfrey Guillaumin, «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*).

21 Véase en este mismo volumen el artículo de Margarita Santana de la Cruz, «Ciencia y Filosofía en la Edad Media: la disputa entre Razón y Fe» (*comps.*).

moderna.²² Otros, sin embargo, destacan que no existe continuidad con la Edad Media y argumentan que los fundamentos de la Revolución Científica se encuentran en los neoplatónicos renacentistas²³. Por otra parte, los historiadores sociales ponen el énfasis en el surgimiento de una nueva sociedad que se gesta durante el Renacimiento y que utiliza el conocimiento para obtener un mayor poder técnico, descartando la influencia de las teorías medievales y neoplatónicas. Por último, otros investigadores que continúan con esta última línea, como es el caso de Bernal, consideran que la primer gran fase de este proceso de transformación fue el Renacimiento, y, buscando una nueva síntesis en el abordaje historio-gráfico, y afirman que no se puede comprender esta revolución científica sin observar tanto los elementos de continuidad como los nuevos (Bernal, 1989: 286).

El historiador José Babini (1969: 5-10) destaca que si bien los aportes del periodo renacentista en relación a las ciencias exactas y naturales son claros en el desarrollo de la ciencia moderna, no ocurre lo mismo con las conquistas de los progresos técnicos. Esto se debería a que algunos historiadores creen que no existe interrelación entre la ciencia y la técnica de la modernidad, y que los progresos técnicos renacentistas no influyeron en absoluto en el surgimiento de la concepción heliocéntrica, la geometría cartesiana o la dinámica moderna. Sin embargo, otros argumentan que los anteriores se centran demasiado en el desarrollo de los contenidos científicos, cuando deberían tomar en consideración las características generales de la ciencia moderna. De esta manera, señalan dos elementos de importancia con respecto a la vinculación de la técnica renacentista con la moderna. Una de las características de la ciencia moderna es el valor otorgado a la experimentación directa, y esto encuentra antecedentes en los progresos de los artesanos a la ciencia experimental, quienes combinaron razonamiento con experimentación. La segunda característica que destacan es el ‘afán de penetración de la naturaleza con los ojos, la mano y la mente’ que tuvieron los primeros científicos modernos. La génesis de esta característica podría rastrearse hasta los esfuerzos de los técnicos por comprender la naturaleza y lograr así explotar las fuentes naturales de energía. No se puede dejar de lado tampoco que la ciencia moderna logró indagar los fenómenos naturales para encontrar leyes utilizando los progresos técnicos que existieron en cuanto a los materiales e instrumentos.

De todas formas, las vinculaciones entre la ciencia exacta y natural y la técnica durante el Renacimiento son imprecisas. El grupo de hombres que las ponen de manifiesto son los que se han catalogado como los ‘artistas-técnicos’ del Quattrocento. Estos artistas indagan la naturaleza y analizan las reglas de la perspectiva y de la geometría, estudian los materiales y las bases de sus invenciones mecánicas, civiles, militares e hidráulicas. Si se embarcan en estos estudios por inquietudes de índole científica o para lograr una mayor perfección estética, no nos incumbe en este momento. Lo interesante es que estos hombres, como es el caso de Leonardo da Vinci, se preocuparon por conocer los fundamentos científicos y técnicos de su labor²⁴. Y en el caso particular de Leonardo, donde la práctica y la teoría van de la mano, se ha valorado su rol de precursor del método experimental.

22 Fue Pierre Duhem el que, a comienzos del siglo XX, investigó escritos medievales y sugirió la existencia de una continuidad entre la mecánica de la Edad Media y el siglo XVII (Boido, 1996).

23 Es el caso de Alexander Koyré en sus *Estudios galileanos* de la década de 1930 (Boido, 1996).

24 Entre estos primeros artistas-técnicos del siglo XV encontramos, entre otros, a Brunelleschi, famoso constructor de la cúpula de la catedral de Florencia, quien estudió la perspectiva y construyó mecanismos autómatas; a Lorenzo Ghiberti, escultor de las puertas del Baptisterio de Florencia y estudioso de la

IV.b. Discusiones acerca de la unidad del pensamiento y del cientificismo de Leonardo

Muchos de los últimos estudios sobre Leonardo versan sobre si se lo podría calificar como el ‘primer científico moderno’. La cualidad que más se ha destacado es el enfoque empírico de sus estudios de la Naturaleza. Ya hemos mencionado que Leonardo forma parte de la tradición de artistas-técnicos italianos que, en los talleres, recibieron una formación ecléctica y empírica, aprendiendo destrezas para desempeñarse no sólo como pintores o escultores, sino también como arquitectos e ingenieros. Por lo tanto, Leonardo, como muchos de sus colegas contemporáneos, había adquirido una gran habilidad manual que le proporcionaba seguridad en sus capacidades de observar la naturaleza y realizar aplicaciones prácticas. Sin embargo, estos hombres adolecían de formación literaria —de conocimientos seguros del latín—, cosa que los mantenía al margen de la tradición del pensamiento científico escrito. Se ha señalado que por la necesidad de superar esa carencia, muchos de ellos buscan la ayuda de literatos que hacían las veces de ‘traductores’ de la ciencia de los libros —escritos en latín— para poder ahondar en sus investigaciones empíricas. Es el caso de la colaboración entre Leonardo y el matemático Luca Pacioli en Milán, y la carta redactada a Ludovico Sforza, posiblemente con la ayuda de un amigo literato (Marioni, 2005: 15).

Una de las citas más recurrentes de Leonardo es su definición personal como *uomo senza lettere*. En palabras del maestro:

Sé bien que, por no ser yo literato, algún presuntuoso creará poder criticarme con razón aduciendo que soy hombre sin letras. ¡Gente necia! No saben estos tales que yo podría, tal como Mario respondió a los patricios romanos, responder también: ‘Los que se adornan con las fatigas de otros, no me quieren reconocer las mías’. Dirán que, por no tener yo letras, no puedo decir bien lo que quiero tratar. No saben que mis cosas son más para ser tratadas por la experiencia que por la palabra ajena; la cual fue maestra de quien escribió, y así por maestra la tomo y a ella apelaré en todos los casos. (en Marioni, 2005: 104)

Leonardo, como podemos observar en la cita anterior, sentía un fuerte antagonismo con sus contemporáneos humanistas, más versados en la lectura de textos antiguos. Este sentimiento seguramente se haya visto profundizado al ir dedicándose más al estudio de la ciencia y al notar que sus invenciones y hallazgos no eran apreciados en forma debida por muchos de sus eruditos contemporáneos. Durante el renacimiento había ido cambiando la posición social de los artistas, obteniendo las artes manuales un mayor prestigio al ser requeridas por príncipes y comerciantes con la consecuente elevación social de los técnicos²⁵. Estos artistas-técnicos iban a proporcionar importantes aportes en el desarrollo de la perspectiva, geometría y el estudio de la naturaleza y su utilización, transformando al arte en ciencia.

Enfrentado al mundo de los libros, que, aunque en su edad madura había estudiado en forma autodidacta, no logra comprenderlos cabalmente, Leonardo opta por hacer valer el mundo natural, ya que consideraba que lo dominaba mejor que muchos de sus contemporáneos²⁶.

óptica y la perspectiva; a León Battista Alberti, humanista que se ocupa de la perspectiva, de problemas científicos y matemáticos, del estudio de la profundidad de las aguas y de la velocidad de las naves.

25 Desde la Antigüedad, todas las actividades manuales que tenían como fin un objetivo práctico eran consideradas inferiores a las liberales, que iban dirigidas a la pura contemplación de la verdad. En la Edad Media estas artes mecánicas eran, además, consideradas la consecuencia del pecado original.

26 Muchos creerán poder reprenderme con razón aduciendo que mis pruebas van contra las autoridades de hombres que merecen gran reverencia por sus inexpertos juicios, sin considerar que mis cosas han

Llama a los literatos «trompetas y repetidores de obras ajenas»²⁷, y considera que «Quien disputa aduciendo autoridades, no utiliza el ingenio, sino más bien la memoria.» (*Códice Atlántico*, folio 76 r.a. En Marioni, 2005: 104). De esta manera, Leonardo pone a la experiencia como la maestra de las autoridades y de los inventores. Argumenta, además, que sus indagaciones de la naturaleza y su pintura constituyen efectivamente ciencia, ya que su método basado en la experiencia le confería una certeza de la que carecían los estudios humanistas. Este sería el eje vertebrador que daría unidad a todo el trabajo de Leonardo, y su discusión estaría prefigurada en la primera parte de su *Tratado de la Pintura*.

No se tienen registros de la relación de Leonardo con la *Accademia* florentina que albergaba las teorías neoplatónicas. Algunos autores interpretan el abandono de la ciudad de Florencia y su re-localización en Milán como sus deseos por escapar a la hegemonía de los neoplatónicos. Pero más allá de las dificultades que implica probar esto, Marioni (2005: 17-18) considera que es posible encontrar influencias de la academia neoplatónica en el impulso poético del arte de Leonardo y en la unidad de su pensamiento. De ellos habría tomado, además, el sentido de un mundo espiritual que es posible de encontrar bajo los fenómenos naturales. Los neoplatónicos lo habrían explicado a través de sus lecturas de las mitologías neopaganas, pero Leonardo habría detectado esta fuerza misteriosa en su observación de la naturaleza. Marioni explica que «en el pensamiento de Leonardo el mundo natural o de la evidencia, y el espiritual o de las facultades arcanas, se contraponen como dos polos opuestos de la realidad.» (Marioni, 2005: 18). Este mundo de las fuerzas espirituales sería imperceptible para nuestros sentidos, pero se apreciaría en los movimientos y en las formas de los cuerpos físicos que estarían expresando una unidad interna.

El método que Leonardo utiliza se encontraría, por tanto, en toda su obra, desde sus contribuciones al estudio de la anatomía, pasando por sus invenciones mecánicas, hasta en su arte. Todas sus creaciones, de gran diversidad, son prueba de su propio proceso de conocimiento, lo que les da unidad a las anteriores. Martin Kemp (2006: 19-20), defensor de la teoría unitaria del trabajo de Leonardo, explica que partía de una observación rigurosa de los efectos que ocurrían en la naturaleza e intentaba discernir sus causas, sus principios básicos. Esto era posible a través del estudio de casos específicos que presentaran una evidencia. El investigador habría alcanzado la prueba sólo cuando hubiera demostrado la perfecta relación entre las causas y sus efectos. Todas estas demostraciones particulares estarían mostrando cómo la naturaleza funciona como un todo²⁸. De esta manera el investigador, yendo de lo particular a lo general, podría reconstruir los efectos ya existentes. Es esto lo que estaría haciendo Leonardo en sus obras de arte, en las cuales presenta nuevos efectos visuales basándose en el estudio de las causas básicas de la óptica.

En sus manuscritos, Leonardo alerta que en las creaciones de cualquier índole no sería suficiente quedarse con la práctica, sino que sería necesario incluir a la ciencia. En el

nacido de la simple y mera experiencia, que es la verdadera maestra (*Códice Atlántico*, folio 119 v.a. En Marioni, 2005:103).

27 Esta calificación de los literatos humanistas está tomada del *Códice Atlántico*. Reproduzco el fragmento: «Aunque no supiera aducir autoridades como ellos, mucho mayor y más digna cosa aduciré, aduciendo la experiencia, maestra de sus maestros. Éstos van hinchados y pomposos, vestidos y adornados, no con las suyas, sino con las fatigas ajenas; y a mí no me reconocen las mías; y si me desprecian a mí, inventor, cuánto más podrán ser reprobados ellos que no son inventores, sino trompetas y repetidores de obras ajenas.» (*Códice Atlántico*, folio 117. En Marioni, 2005: 103)

28 «Ningún efecto se produce en la naturaleza sin una causa; conoce la causa y no necesitarás de la experiencia» (*Códice Atlántico*, folio 147 v.a. En Marioni, 2005: 50).

Códice G, que se encuentra actualmente en París, recomienda: «Los que se enamoran de la práctica sin ciencia son como el piloto que entra en la nave sin timón ni brújula, que nunca está seguro de dónde va.» (*Códice G*, folio 8 r. En Marioni, 2005: 49). Algunos diez años antes habría explicado «La ciencia es el capitán y la práctica, los soldados.» (*Códice I*, folio 18 r. En Marioni, 2005: 49). Se puede comprobar entonces que Leonardo distinguió la razón de la experiencia, otorgándole una jerarquía mayor a la teoría, debiendo someterse la práctica a la primera. En palabras de Leonardo, «La sabiduría es hija de la experiencia» *Códice Forster III*, folio 20 v. A su vez, la razón, que estaría guiando y permitiendo las aplicaciones prácticas, obtiene su certeza de las matemáticas²⁹.

Leonardo utilizó la técnica de la analogía, que estaba en boga en su época, para explicar el comportamiento de las cosas, pero él le agrega, según Kemp, fuerza argumentativa y eficacia visual permitiéndole nuevas aplicaciones. Capra (2008: 27), por su parte, explica que para comprender un fenómeno Leonardo lo ponía «en conexión con otros fenómenos mediante una semejanza de modelos», denominándolo con la terminología actual, y con todos los riesgos que eso implica, un pensador sistémico y encontrando en esta habilidad la razón de ir tan lejos en sus investigaciones³⁰.

Cada observación y dibujo representaba, para el maestro, un acto de análisis de las causas y los efectos que, con base en los cuales, el hombre creador era capaz de reconfigurar el mundo. Leonardo le otorgaba un papel fundamental al dibujo como técnica del estudio científico de los fenómenos naturales:

Oh, escritor, ¿con qué palabras describirás tú la figura completa con la misma perfección que hace aquí el dibujo? [...] ¿Con qué palabras podrás describir un corazón sin llenar un libro? Y cuanto más te detengas en detalles, tanto más confundirás la mente de quien te oye y siempre necesitarás ejemplos y volver a la experiencia, la cual en vosotros es muy poca, y da noticia de pocas cosas respecto a la totalidad del objeto del que deseéis dar noticia completa. (Cuadernos de Anatomía II, folio I r. En Marioni, 2005:106)

Kemp (2001: 21) argumenta,

la máquina voladora y la Mona Lisa reorganizan de manera similar el mundo natural según los propios términos de la naturaleza, es decir, en completa obediencia a las causas y los efectos naturales. La primera es un 'ave' artificial, la segunda es una reconstrucción artificial de la experiencia visual que provoca la presencia física de una persona. [...] la Mona Lisa y la máquina voladora eran, para Leonardo, el mismo tipo de cosa.

Leonardo, preocupado por encontrar fundamentos racionales, se opone a las explicaciones de disciplinas como la alquimia y la nigromancia. Sin embargo, podría sorprender su hostilidad marcada contra toda creencia espiritista, cuando él mismo declara observar en el mundo fuerzas espirituales invisibles. Marioni explica que lejos de ser contradictorios, estos comentarios de Leonardo estarían permitiéndonos comprender aún más la concepción leonardiana de las potencias espirituales. A diferencia del vulgo que se ve engañado por las artes del brujo sobre las fuerzas espirituales, que pretenden dominar la naturaleza violando

29 «Ninguna certeza hay donde no se puede aplicar una de las ciencias matemáticas o que no se relaciona con esas mismas ciencias matemáticas» (*Códice G*, folio 96 v. En Marioni, 2005: 49).

30 Capra cita diversos ejemplos de la utilización de semejanzas de modelos «Cuando estudió las proporciones del cuerpo humano, las comparó con las proporciones de los edificios de arquitectura renacentista. Sus investigaciones sobre músculos y huesos lo condujeron a estudiar y dibujar engranajes y palancas, interrelacionando así fisiología animal e ingeniería. Los modelos de turbulencia en el agua lo llevaron a observar modelos similares en la corriente de aire; y de allí pasó a explorar la naturaleza del sonido, la teoría de la música y el diseño de instrumentos musicales» (Capra, 2008: 27).

sus leyes, las misteriosas fuerzas que mueven la máquina terrestre obedecen a las leyes de la Necesidad³¹. El hombre sólo podría utilizar esas fuerzas cósmicas una vez haya entendido sus estructuras y procesos. Presumir que es posible imponerse a la naturaleza por deseos de avaricia sería, además, inmoral (Marioni, 2005: 21-22/ 40-41).

Pero, ¿es posible hablar de un Leonardo científico? La historiografía ha resaltado su originalidad y que en él se pueden observar elementos que se hacen presentes en la ciencia moderna. Sin embargo, no es claramente un científico ya que no reúne las características que lo constituirían como tal.

Se ha destacado que es una figura de excepción en la historia de la ciencia por tres motivos centrales. Primero, porque es difícil ubicarlo en el desarrollo del pensamiento científico, ya que no resulta sencillo encontrar cuáles fueron los autores que tuvieron una influencia significativa en su obra, como tampoco lo es comprobar con fidelidad quiénes vieron sus escritos o se inspiraron en sus trabajos. En su época probablemente se hayan conocido sus dibujos técnicos, pero no existen registros acerca de sus observaciones de índole científica (Babini, 1969: 35-37). Segundo, porque fue un autor inédito, lo que no se corresponde con la naturaleza de la ciencia que es, ante todo, una actividad social que se basa en la comunicación y la publicación para hacer posible la crítica. Si bien dejó múltiples manuscritos, y probablemente pensara publicarlos —como es posible de suponer basándonos en sus anotaciones—, esto nunca ocurrió. De esta manera su influencia en el desarrollo de las ciencias fue menor Babini (1969: 35-37)³². Se ha argumentado asimismo que la razón principal por la que Leonardo no compartió su conocimiento científico se debió a que lo consideraba su «capital intelectual», siendo sus habilidades en ingeniería y escenografía —Leonardo montaba interesantes propuestas a nivel teatral— sus fundamentales fuentes de ingreso, además de que no veía a la ciencia como una empresa colectiva como es entendida hoy (Capra, 2008: 53)³³. Tercero, porque al no tener formación universitaria no tuvo el enfoque sistemático ni los conocimientos matemáticos necesarios para fundamentar sus hallazgos, ni para que la comunidad científica los corroborara³⁴.

Pero lo más importante del trabajo de Leonardo es que expandió los horizontes de todas las ramas de la ciencia del Renacimiento. Se ha resaltado que fue un pionero que se adelantó a su siglo con sus hallazgos, percibiendo en forma intuitiva el método experimental (Kemp,

31 «La experiencia, intérprete entre la artificiosa naturaleza y la especie humana, enseña lo que la naturaleza opera en los mortales obligada por la necesidad, es decir, sin poder actuar de otra forma que como la causa, timón suyo, le indica» (*Códice Atlántico*, folio 86 r.a. En Marioni, 2005: 50).

32 Papp coincide con el anterior explicando: «Desgraciadamente DA VINCI guardó el secreto de sus magníficos hallazgos. Este superhombre, que hubiera podido abrir el camino a tantas de las penosas adquisiciones posteriores, prefirió no publicar casi nada y cifrar sus lúcidas ocurrencias en notas escritas al revés y parcialmente en criptogramas, cuya gran mayoría permaneció inédita hasta el siglo XIX. En una palabra, LEONARDO DA VINCI, el investigador, actuaba al margen de la historia.» Papp (1997: 97-99).

33 Capra hace la distinción de que Leonardo si bien compartió sus descubrimientos y realizaciones artísticas, no hizo lo mismo con lo que respecta a sus hallazgos científicos. Destaca que de haber sido de otro modo, «tal vez su influencia sobre el desarrollo posterior de la ciencia occidental habría sido tan profunda como su impacto en la historia del arte.» (Capra, 2008: 54).

34 «Trató siempre de penetrar más ampliamente en el significado subyacente de la Naturaleza y de la sociedad. En esto se vio favorecido por carecer de educación universitaria y por tanto de menos cosas que olvidar, pero por la misma razón le faltó el enfoque sistemático y la educación matemática suficientes para desarrollar sus ideas o para convencer a los demás de su verdad. No dejó escuela, y fue más bien una inspiración que un guía.» Bernal (1989: 301).

2006/ Papp, 1997). Fue de los primeros en analizar la naturaleza con ojos modernos, penetrando en su significado en forma sistemática, construyendo modelos teóricos y algunas generalizaciones matemáticas (Capra, 2008). Sin embargo, este método y sus descubrimientos no son elaborados, sino, en palabras de Papp (1997: 97) «son como chispazos o ráfagas de luz... ocurrencias asombrosas de un espíritu universal.»

IV.c. Leonardo: ¿ciencia o arte?

Es indiscutible el impacto que Leonardo tuvo en los campos de las artes y las ciencias, lo cual hace que su valoración como científico o como artista se relacione con los intereses propios de los historiadores. Dependiendo de sus miradas, han generado, como mencionamos anteriormente, visiones fragmentarias acerca de este hombre. Los historiadores del arte han resaltado que, antes que nada, era un artista, y que en su preocupación por perfeccionar su arte incursionó en diferentes áreas del saber. Para ellos, Leonardo reuniría las típicas características de los artistas renacentistas, quienes tenían formación técnica y científica, pero habría dado un paso más allá que muchos de sus contemporáneos como lo prueba la envergadura de sus estudios científicos. Por otra parte, algunos historiadores de la ciencia, invierten la ecuación, explicando que si bien comienza como artista, su verdadero interés radica en la investigación y explicación de la naturaleza, con características de metodología científica. Destacan, además, que sus cualidades como dibujante son de gran utilidad en el desarrollo de sus estudios científicos. Por último, una tercera línea de investigación de historiadores del arte y de la ciencia, propone una visión más unitaria, de síntesis, explicando que en su trabajo no es posible comprender al Leonardo artista sin el Leonardo científico y *viceversa*.

Los historiadores del arte plantean que si bien el desarrollo de la investigación científica durante el Renacimiento fue realizado esencialmente por artistas, no debe entenderse que éste haya formado parte de una intención deliberada por parte de los mismos. Durante la Edad Media la teoría y la práctica habían estado separadas en compartimentos estancos, pero durante el Quattrocento se rompieron las fronteras llevándose a cabo la unión entre práctica y teoría. Los artistas de este nuevo tiempo consideran a la práctica como un medio imprescindible, pero demuestran interés en tener conocimientos más amplios para poder perfeccionar su oficio. El arte comienza entonces a moverse dentro de un campo de conocimiento más amplio (Nieto Alcalde/ Checa, 1993: 187-201).

Este sería el caso de Brunelleschi, quien con su construcción de la cúpula de la catedral de Florencia fija las bases de un nuevo tipo de arquitecto que dista de las realizaciones empíricas de los constructores medievales, incorporando la racionalización del trabajo arquitectónico. Su estudio sobre perspectiva, más allá de tener consecuencias directas en la arquitectura, plantea hallazgos científicos válidos. También es este el caso de Alberti, quien recomendaba al pintor que estudiara geometría para poder hacer de la pintura una ciencia. La revalorización de la teoría por parte de estos artistas no implicaría el desprecio de la práctica, ya que la primera resulta de la segunda, y no de la transmisión docta de los libros. Leonardo sería el último eslabón de estos artistas que culmina el proceso de unión de teoría y práctica desde el punto de vista teórico. Los historiadores Nieto Alcalde y Checa encuentran en el pensamiento de Leonardo dos momentos lógicos: el de la razón y el del momento empírico. En el primero, Leonardo habría sometido su visión de la naturaleza como organismo vivo a la matemática, la perspectiva, la proporción y la simetría. El segundo, sería el momento de la experiencia concreta. De allí que se interesara por la mecánica y por la pintura como práctica científica,

ya que la realización sería el fin último de la investigación (Nieto Alcalde/ Checa, 1993; Panofsky, 1981).

Muchos de sus contemporáneos no comprendieron este nuevo equilibrio entre pensamiento y realización al que habían llegado los artistas. En *El Cortesano*, el conde B. Castiglione critica negativamente la actividad de Leonardo de la siguiente manera: «Otro más entre los primeros pintores del mundo desprecia el arte en el cual descuella y se ha puesto a aprender filosofía, de la que tiene tan extrañas concepciones y nuevas quimeras que él mismo, con toda su pintura, no sabría pintarlas.» (en Nieto Alcalde/ Checa, 1993: 189).

Esta nueva ideología de los artistas que plantea la unión de la práctica y la teoría y que se opone a la cultura oficial de las universidades, las cuales continuaban apoyando el estudio de la ciencia a partir de los libros, es la que abre nuevas vías para la investigación. Los artistas se inmiscuyen en áreas de conocimiento nuevas, como la anatomía y la botánica, y, si bien estudian— por sus propios medios— la tradición científica de las mismas, en muchos casos la superan. Los artistas desarrollan entonces una ciencia que es ante todo práctica, encontrando sus fundamentos en la observación y la verificación. A partir de la experiencia desarrollan investigaciones de claro valor científico, sobre todo con la importancia que le otorgan al dibujo, el llamado *diseño*. En el campo de la anatomía Leonardo inició la etapa científica del *pittore anatomista* que si bien, como veremos más adelante, está marcada por planteamientos revolucionarios, existen en sus estudios errores típicos de su tiempo.

Por su parte, algunos los historiadores de la ciencia encuentran en el interés por los estudios científicos y técnicos de la última etapa de la vida de Leonardo, una prueba contundente de que en el desarrollo del pensamiento del maestro pesa más el estudio de tipo científico—si bien no es posible considerar la existencia de un Leonardo científico en un sentido estricto— que el del arte mismo. De esta manera, se propone invertir la fama popular de Leonardo de artista con intereses científicos, por la de pensador científico con realizaciones artísticas. Sería su mentalidad científica, no su arte, lo que daría unidad a su trabajo. Destacan, al igual que los historiadores del arte que mencionamos anteriormente, que existe en Leonardo una armonía entre la teoría y la práctica, la ciencia y el arte. Por lo tanto, sus dibujos y cuadros se basan en el conocimiento de tipo científico, conocimiento que logró obtener a través del estudio teórico y práctico de la anatomía y de las investigaciones geométricas y ópticas. Se señala, además, que si bien no es posible hablar de un Leonardo matemático o astrónomo de la misma manera que se habla de él como anatomista y técnico, sí realizó interesantes aportes al estudio de estos campos del saber. Por otra parte, tampoco se podría hablar de un Leonardo físico, aunque es a partir de este campo del saber por el cual se conoció por primera vez su labor científica, por la única razón de que durante su vida no existió este tipo de científico (Babini, 1969: 33-59).

La última y más reciente re-lectura de Leonardo que comentaremos con respecto a este debate, es aquella que plantea que no es posible encontrar en Leonardo al científico separado del artista, sino que el maestro mismo habría abordado diferentes intereses a lo largo de su vida y que había entendido a su arte como creación científica, declaración que no lo distingue de otros artistas de su tiempo (Bernal, 1989; Zöllner, 2000; Marioni, 2005; Capra, 2008).

Capra ilumina esta comprensión sobre la síntesis de arte y ciencia en Leonardo al resignificar estos términos situándolos en el momento histórico de la vida del maestro. En su época *arte* se entendía como habilidad, mientras que *scientia* implicaba conocimiento o teoría. «Leonardo insistió... que el ‘arte’, o habilidad, de la pintura debía apoyarse en la ‘ciencia’ del pintor, esto es, en un sólido conocimiento de las formas vivas, así como en la

comprensión intelectual de su naturaleza intrínseca y de sus principios subyacentes», señala Capra (2008: 61-62)³⁵. Como prueba de esta interpretación, los historiadores de la ciencia y del arte, citan del *Tratado de la Pintura* las apreciaciones de Leonardo sobre la pintura como una ciencia:

Están comprendidos en la ciencia de la pintura los colores de la superficie y las imágenes de los cuerpos que se revisten de ellos, su lejanía y proximidad de acuerdo con la proporción entre las distintas disminuciones y las distancias diversas. Dicha ciencia es madre de la perspectiva, la ciencia que estudia las líneas de la visión, que se divide en tres partes. La primera comprende la construcción de los cuerpos mediante líneas; la segunda, el difuminado de los colores según las diferentes distancias, y la tercera, es la pérdida de definición de los cuerpos con relación a las distintas distancias. Sin embargo, se llama dibujo a la primera de ellas, que se ocupa de la representación de los cuerpos, de sus configuraciones y límites. A partir de allí nace otra ciencia, que abarca la luz y la sombra o, más sencillo, lo claro y lo oscuro, ciencia que requiere de un extenso discurso. Se debe indicar que la ciencia, atenta a las líneas de la visión, dio origen a la Astronomía: lo que en ella hallamos son líneas visuales y secciones de pirámides.» (Da Vinci, 2004: I, 12-13)³⁶

De esta manera, Leonardo intenta revalorizar a la pintura como ciencia, oponiéndose a la tradición que la consideraba como arte mecánico, y enfatiza la importancia de la experiencia como fuente de todo conocimiento y a la operación manual de la pintura como medio superior por el cual comunica sus hallazgos ya que «La ciencia de mayor utilidad será aquella cuyos frutos sean más comunicables [...] La pintura presenta las obras de la naturaleza a los sentidos con verdad y certeza mayores que las letras o las palabras» (Da Vinci, 2004: I, 14-15). Leonardo afirmaba que la pintura era verdadera ciencia porque se valía de los instrumentos instintivos de la vista o de las manos y porque se fundaba, además, en un sistema de normas teóricas. En palabras del maestro:

Decimos que un saber es mecánico cuando surge de la experiencia; científico si su inicio y finalización se hallan en la mente, y semimecánico al surgir de la experiencia y cuando desemboca en la operación manual. En mi opinión, tales ciencias son vanas y rebosan de errores, dado que no nacieron de la experiencia, fuente de todas las certezas, así como tampoco son confirmadas por ella; y que ni su origen, vía, ni fin pasan jamás a través de alguno de los cinco humanos sentidos. (...) Verdaderas ciencias, son aquellas que han penetrado los sentidos gracias a la experiencia; silenciando de esta suerte toda disputa, las cuales no adormecen a los investigadores, y que proceden siempre partiendo de primeras verdades y principios evidentes, punto por punto, sin interrupciones, hasta el final; de la forma en que es comprobable en las fundamentaciones matemáticas, según sabemos: número y medida o, incluso, aritmética y geometría, que toman como verdadera suma la cantidad continua y discontinua. En matemáticas no argumentaríamos que $3 + 3$ da 6, ni que fuera inferior a dos rectos la suma de los ángulos de un triángulo. Toda argumentación es reducida al silencio eterno, y pueden así estas ser disfrutadas en paz por sus devotos, cosa que no sucede con las ciencias falaces de la mente. Y si tú sostienes que esas ciencias verdaderas y evidentes deben considerarse mecánicas —al no poder concretar su objetivo sin recurrir al trabajo

35 Capra además, agrega a esta síntesis de arte y ciencia otro elemento: la *fantasía* o imaginación creativa, que para Leonardo siempre habría estado ligada a su comprensión intelectual de la naturaleza y que no sólo relacionaba a la creatividad del pintor, sino que la reconocía como una 'cualidad general de la mente humana'. Siguiendo con su línea de análisis, lo califica más que nada de diseñador —además de pintor y científico—, sosteniendo que si bien diferenciaba entre el proceso de diseño y el de producción material, se mostraba más interesado en el primero, lo que quedaría demostrado por el hecho de que la mayoría de sus invenciones no fueron plasmadas en la práctica (2008: 62-64).

36 Subrayado nuestro.

manual—, te responderé que lo mismo sucede con todas las artes que se deslizan por las manos de los escritores, similares al dibujo, parte constitutiva de la pintura. La Astronomía y las demás ciencias recurren a operaciones manuales, aunque en su origen sean mentales; de la misma manera la pintura, aunque primero se plasma en la mente de su hacedor, sin la operación manual no puede lograr su perfección. Los principios verdaderos y científicos de la pintura determinan, en primera instancia, qué debe ser un cuerpo que posee sombra y qué debe ser sombra primitiva y sombra derivada, y qué debe ser luz: oscuridad, luz, color, figura, cuerpo, distancia, posición, cercanía, reposo y movimiento. Cosas que se pueden comprender con la mente sin necesidad de tarea manual. Todas componen la ciencia de la pintura, que reside en las mentes de los contempladores, y de la que más tarde nace la implementación manual, más digna, en cierto grado, que la contemplación o ciencia precedente. (Da Vinci, 2004: I, 13-14).

En esta última línea de debate acerca de la unicidad del arte y de la ciencia en Leonardo y de su importancia para la ciencia moderna reconocemos original el pensamiento del físico Fritjof Capra en cuanto éste destaca que los aportes de Leonardo no han logrado ser comprendidos debido a la utilización de un enfoque newtoniano, de una cosmovisión mecanicista-cartesiana (Capra, 2008: 17-18). Capra argumenta que es posible comprender la ciencia de Leonardo en forma más fidedigna a partir del enfoque científico contemporáneo holístico y ecológico. En palabras del físico, su consciente reinención de Leonardo se relaciona en términos científicos contemporáneos con «un Leonardo pensador sistémico, ecologista y teórico de la complejidad; un científico y un artista con profundo respeto por la vida en su integridad y un hombre con un fuerte deseo de trabajar en beneficio de la humanidad.» (Capra, 2008: 20)³⁷. Si bien su aplicación de conceptos actuales a la obra y pensamiento de Leonardo puede ser criticable por no encontrarse contextualizado en la época en que vivió el maestro, haremos mención en los próximos apartados a algunas de las apreciaciones de Capra por introducir elementos novedosos al debate y a la relectura de este personaje.

V. Leonardo y las ciencias de la naturaleza

La temática más importante del arte de la Edad Media y del Renacimiento es la figura humana, constituyendo los animales, las plantas y la topografía, meros accesorios que actúan como escenario. Por tanto, los intereses de Leonardo por estudiar estas creaciones de la Naturaleza derivan de su calidad de artista, ya que su exploración del funcionamiento de los seres vivos tenía como origen el objetivo artístico de perfeccionar su representación. Sin embargo, Leonardo no sólo superó los conocimientos artísticos de su época, sino que también los de los especialistas científicos. De esta manera, las investigaciones del maestro en este aspecto se sitúan en el difuso espacio-visagra que separa, o, en su caso, une, la ciencia del arte. Mientras que en sus indagaciones de las ciencias exactas y físicas prevalece un

37 En palabras del autor: «[El paradigma mecanicista] consta de un conjunto de ideas y valores profundamente arraigados, entre los que cabe mencionar la visión del universo como sistema mecánico compuesto por elementos básicos, el cuerpo humano como máquina, la vida en sociedad como una lucha competitiva por la existencia y la creencia en el progreso material sin límites, a lograr mediante el crecimiento económico y tecnológico [...] A medida que avanza este nuevo siglo, más claro se ve que los principales problemas de nuestro tiempo —económicos, medioambientales, tecnológicos, sociales o políticos— son sistémicos y no pueden resolverse en el actual marco fragmentario y reduccionista de las disciplinas académicas y las instituciones sociales... Durante las últimas décadas, la visión cartesiana mecanicista del mundo ha empezado a dar paso a una visión holística y ecológica semejante a la que expresan la ciencia y el arte de Leonardo da Vinci [...] la concepción de un mundo vivo como fundamentalmente interconectado, enormemente complejo, creativo e imbuido de inteligencia cognitiva, es muy similar a la visión de Leonardo.» (Capra, 2008: 337-339).

Leonardo teórico y experimental, en las ciencias naturales se pone de relieve su capacidad de observación y de artista (Babini, 1969: 50).

El arte del Renacimiento se diferencia del medieval, entre otras cosas, en su interés por hacer primar la representación realista, aunque también idealizada, de las formas existentes en la Naturaleza. Esto requería una observación más detallada del mundo natural, con sus consiguientes aportes al estudio de una geología e historia natural que no se encontraban basadas en los libros ni en la lógica (Bernal, 1989: 298). Artistas como Lorenzo Ghiberti, escultor de la Puerta del Paraíso del baptisterio de Florencia, y León Battista Alberti, humanista, arguyen que el pintor debía conocer sobre anatomía. Antonio Pollaiuolo y Andrea Verrocchio, maestro de Leonardo, en su interés por imitar las obras de la Antigüedad, habían estudiado el hueso, el músculo y el tendón. No se tienen registros que confirmen la práctica de la disección por parte de los contemporáneos de Leonardo, pero, no cabe duda que si sus conocimientos sólo provenían de una observación superficial, la habrían realizado de forma profunda (Kemp, 2006: 92-93).

Como pintor, Leonardo estaba interesado en la anatomía de superficie, aquella que describe de manera visible el juego de los músculos y del esqueleto bajo la piel. Fue pionero en la representación de figuras donde el hombre aparecía sin piel (llamada más tarde *ecorchés*), elemento que se impuso como parte fundamental de la formación del pintor después de la muerte de Leonardo (Zöllner, 2006). En su *Tratado de la Pintura* resalta la importancia de conocer la estructura del cuerpo humano:

El pintor que conozca la naturaleza de los músculos, los nervios y los tendones, sabrá cuáles y cuántos nervios causan cada movimiento y qué músculos, al dilatarse, tiran de ellos, y cuáles tendones convertidos en cartílagos delgadísimos soportan y rodean dicho músculo. De este modo, mostrará diferentes músculos según las variadas actitudes de los cuerpos, evitando así lo que muchos hacen, esto es: servirse de los mismos accidentes de los brazos, torso, piernas y espalda para todos los movimientos por diversos que estos sean (Da Vinci, 2004: 189).

Leonardo va más allá de la práctica y pasa, como vemos en este fragmento, de la representación de una figura estática a la figura en movimiento.

Es posible dividir en tres etapas diferenciadas los estudios de Leonardo como anatomista, que, además, conllevan cambios en su actitud como dibujante. La primera época comenzaría durante su estadía en Milán, en 1487, donde se manifiesta su estudio de la anatomía de superficie, a la cual nos referimos anteriormente. Una segunda etapa sería aquella que transcurre entre 1506 y 1510, en donde sus conocimientos de la anatomía se encuentran basados en las disecciones que practicó sobre cadáveres y manifiesta su intención de hacer un modelo anatómico del hombre. La última época es aquella posterior a 1510, donde ya está más desarrollado su método de estudio de anatomía, y de la anatomía humana comparada con la animal (Zöllner, 2006).

En la época temprana, sus dibujos reflejan las concepciones del anatomista griego Galeno (129-199 d.C.), las cuales conoció a través del libro de Johannes Ketham de 1495 llamado *Fasciculus medicinae*. Sus dibujos manifiestan una clara simplificación debido, posiblemente, a que en este tiempo no practicaba disecciones y adquiriría sus conocimientos a través de la observación de la superficie del cuerpo humano, de los animales y esqueletos. Este es el tiempo en que Leonardo, fiel a Galeno, explicaba su intención de partir a la mitad al corazón, el hígado, los pulmones y riñones para poder representar el sistema vascular. Todos los vasos aparecen aquí integrados en un sistema único a través de uniones, en parte, ficticias. También es simplista su representación de un coito de alrededor de 1490 (ver figura 2) y

su dibujo del conducto digestivo con dos estómagos, en el que Leonardo aplica al hombre sus conocimientos de la anatomía animal (Zöllner, 2006:82). Uno de los grandes logros de esta etapa serían sus tempranos estudios de cráneos, ya que demuestran su extraordinaria capacidad como dibujante, tanto en la definición de la forma como en la combinación de aspecto y sección. Impacta su representación de la forma exacta de la cavidad del maxilar superior del pómulo, cosa que no se había logrado hasta el momento (ver figura 3). Una de las motivaciones para realizar estos estudios sobre el cráneo era la especulación sobre dónde se ubican las facultades mentales. Intentaba comprender el centro mismo del sistema intelectual, que constituiría el don específico que Dios otorgó al hombre (Kemp, 2006: 98).



Figura 2. El acto sexual en sección vertical, c. 1490. Castillo de Windsor, *Biblioteca Real*.



Figura 3. Estudio anatómico del cráneo humano, sección sagital, vista frontal, 1489. Castillo de Windsor, *Biblioteca Real*.

En la segunda etapa, sus estudios reflejan la influencia de las numerosas disecciones en las que Leonardo se embarcó. Cabe destacar que en sus manuscritos sobre anatomía, Leonardo manifiesta los grandes obstáculos a los que se enfrenta el que trabaje con disecciones,

Y si te aficionas a esto, puede que te lo impida el estómago; y si no te lo impide, tal vez te lo impida el miedo de estar en las horas nocturnas en compañía de esos muertos descuartizados, desollados y espantosos a la vista; y si eso no te lo impide, podría faltarte el arte de dibujar bien, tal como lo requiere este tipo de representación (en Marioni, 2005: 105).

Este texto pone de relieve dos elementos interesantes de la práctica de la disección. En primer lugar, supuestamente, la práctica de la disección era ilícita en esos tiempos, práctica que desterraría a aquel que la efectuara de los dominios de la iglesia. Sin embargo, Leonardo no manifiesta esta problemática en sus manuscritos, lo que nos lleva a pensar que no se habría encontrado expuesto a denuncias y persecuciones de las autoridades políticas y religiosas¹. En segundo lugar, este texto es testimonio de los inconvenientes materiales existentes de una época en la que no existían medios de desinfección ni de conservación, lo que aún hace más admirable su interés por conocer el funcionamiento del cuerpo humano. Esta admiración existía ya en sus contemporáneos, como lo manifiesta Paolo Giovio (1483-1552), primer biógrafo de Leonardo,

En las escuelas de anatomía de los médicos diseccionaba cadáveres de criminales sin que le afectasen lo horrible ni lo desagradable de estos estudios y sólo aspiraba a aprender cómo podría representar en su pintura, con fidelidad a las leyes de la naturaleza,

1 Kemp (2006: 93) menciona que al final de su carrera en la Roma papal, Leonardo fue denunciado por sus disecciones ante el mismo Papa por un técnico alemán con el que tenía conflictos.

las distintas articulaciones y los diversos músculos, sus flexiones y sus estiramientos (en Zöllner, 2006, 82).

Este comentario trae el debate de qué es lo que estaría primando en Leonardo, si el pintor o el científico. Según Giovio, Leonardo estaría haciendo estas investigaciones anatómicas para poder perfeccionar su pintura, pero para esto era suficiente un estudio anatómico superficial. Por esta razón, es posible argüir que en estas indagaciones el artista deja paso al científico, ya que sus intereses radican en el estudio de las partes profundas del cuerpo humano.

Leonardo habría realizado alrededor de veinte disecciones del cuerpo humano, pero sólo existe un registro sobre una completa de un cadáver humano. Éste sería el famoso caso del «vecchio», de un anciano cuya muerte presenció Leonardo en el hospital de Santa Maria Nuova en el invierno de 1507-1508². Además, practicaba disecciones de animales, cuya anatomía, según las creencias tradicionales, eran similares a la de la anatomía humana excepto en sus formas y dimensiones. Este método de la anatomía comparada se puede observar en sus estudios del cerebro y del corazón del ser humano, que se basaron en los órganos de un buey.

Si bien Leonardo ha sido catalogado como el primer y más grande anatomista del siglo XVI, es posible encontrar influencias de la sabiduría tradicional en la nomenclatura y en la división de su obra y en algunas de sus descripciones y funciones. Además, el hecho de no publicar sus láminas no permite circunscribirlo dentro de la línea de tradición científica, ya que no tuvo influencias directas sobre la creación de la anatomía moderna, de la cual es representante Vesalio³. Sin embargo, su carácter pionero se muestra en sus observaciones sobre anatomía y fisiología comparadas, y en sus dibujos. Cabe destacar, además, que trabajó solo, realizando él mismo las disecciones, siendo su propio ayudante y dibujante⁴. En sus manuscritos sobre anatomía establece el método a seguir en las disecciones, así como las condiciones físicas que debe reunir el anatomista. Además, para Leonardo, la anatomía no era sólo «descriptiva», sino «funcional», viendo siempre la forma en relación con su función dentro del marco de la ley natural (Kemp, 2006:95).

Su tratado sobre anatomía sería un manual de técnica de autopsias, en donde se propuso realizar una anatomía completa, y priorizó el dibujo de la representación del dinamismo de la forma viviente en tres dimensiones. El dibujo implicaría un modo de representación y una vía de investigación, sirviendo, además, como experimento (de la forma y su función) y como prueba definitiva. Con este encare, Leonardo se oponía a la práctica tradicional de disección que tenía lugar en las universidades. Era norma que el catedrático, ateniéndose a la autoridad de los textos antiguos, describiera los miembros y los órganos del cuerpo humano desde el anfiteatro, mientras un ayudante los señalara sobre el cadáver. Por tanto, mientras el catedrático se ceñía a los libros e investigaba desde la teoría, Leonardo partía de la imagen y se basaba en la práctica directa. En sus estudios, el dibujo primaba sobre las explicaciones escritas, siendo estas últimas meras aclaraciones de las ilustraciones⁵. Capra señala que el maestro se refería a sus dibujos como ‘demostraciones’, ya que por sí mismos proporciona-

2 Este hombre, que había declarado tener cien años, participó de un programa del hospital, en el que daba su consentimiento para que practicaran su autopsia y que luego le dieran un entierro formal.

3 Vesalio (1514/1515-1564), que es considerado el primer anatomista moderno, publica su obra *De Humani Corporis Fabrica* en 1543 (Vesalio, 1998-2009).

4 Si bien Vasari (1550) menciona que recibió la ayuda del anatomista Marcantonio Dalla Torre, Babini (1969: 57) asegura que fue una colaboración mutua y efímera, ya que duró poco tiempo, y ocurrió en una época en la cual Leonardo ya había investigado gran parte de su obra anatómica.

5 Leonardo criticaba a la medicina tradicional que insistía en evitar las ilustraciones, enfatizando la superioridad de la representación visual en anatomía, y poniendo a la pintura por encima de la poesía

ban ‘conocimiento verdadero’, acercándose a la jerga utilizada por los matemáticos (Capra, 2008: 67). La ciencia de Leonardo sería una ciencia de la comprensión visual (Zöllner, 2006). De este modo, las técnicas de ilustración anatómica que habrían de emplearse en los manuales anatómicos del siglo XIX, tendrían su primera utilización en Leonardo. Kemp (2006: 96) explica estas técnicas de la siguiente manera:

Su aspiración no era sólo convertirnos en testigos oculares de lo que podía verse en una disección sino también que pudiéramos alcanzar un entendimiento veraz de las maravillosas formas y funciones del cuerpo como un todo y de cada una de sus partes. Con tal propósito muestra los componentes del cuerpo no sólo en su forma sólida (a menudo bajo perfiles transparentes del cuerpo) sino también seccionados de modos diversos y dibujados uno separado del otro en diagramas ‘proyectados’ – a veces incluso en versiones que funcionan como si viéramos a través de ellas— y, luego, transformados en diagramas lineales que explican las acciones de cada órgano.

Como es evidente, la representación del funcionamiento de las partes móviles era más difícil que las de estructuras fijas. Por lo tanto, aunque en sus comienzos Leonardo comienza haciendo representaciones transversales de la musculatura, termina representándola a través de cordones de la transmisión de las fuerzas (ver figura 4).

Es en esta segunda época, que Leonardo realiza una impresionante representación del cuerpo femenino, realizando una síntesis en la cual se explicitaban la distribución espacial de los órganos y de sus conexiones (ver figura 5). Aunque en este dibujo se evidencia que todavía el maestro se encuentra lejos de un entendimiento preciso de las funciones y de la interacción de los órganos, es importante destacar que prevalece su capacidad para representar este complejo conjunto de forma clara (Zöllner, 2006: 84; Kemp, 2006, 103-104).

En su obra tardía se destaca su famoso estudio sobre el feto, que según apreciaciones de Leonardo estaría en su cuarto mes (ver figura 6). Es un gran logro de representación plástica de la posición embrionaria, además de que pretende describir la disposición de la placenta a través de una serie de estudios concretos y demostrar la alimentación del embrión a través del cordón umbilical (Capra, 2008: 249). Pero no debemos olvidar que, aún en esta época, el maestro debe completar sus observaciones del cuerpo humano con sus conocimientos de anatomía animal, reproduciendo sus observaciones del riego sanguíneo del feto en la matriz de una vaca preñada. De esa manera, el útero se representa de forma exageradamente esférica y presenta una placenta en cotiledones, múltiple, típicos de una vaca en vez de la placenta singular de la especie humana (Kemp, 2006: 105). También realiza investigaciones cuantitativas sobre el desarrollo y crecimiento del feto. Otro elemento notable de sus estudios, es que mientras sus contemporáneos sostenían que todas las características heredadas provenían del padre, Leonardo arguyó que tanto la madre como el padre tienen la misma influencia sobre el embrión (Capra, 2008: 249).

como medio de representación de las maravillas del mundo sensible (Kemp, 2006: 102). Además, no confiaba en la labor de los médicos, sobre los cuales advierte en sus escritos.



Figura 4. Análisis anatómico de los movimientos del hombro y del cuello, c. 1509. Castillo de Windsor, Biblioteca Real.



Figura 6. Representación del feto en el útero, c. 1510. Castillo de Windsor, Biblioteca Real.

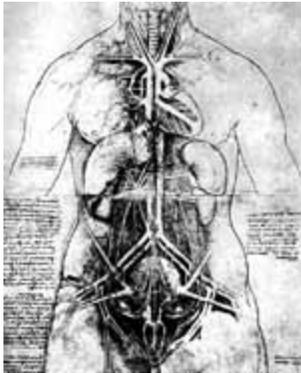


Figura 5. Vista de los órganos femeninos del pecho y del abdomen, así como del sistema vascular, c. 1508. Castillo de Windsor, Biblioteca Real.

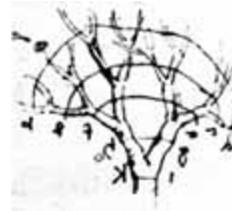


Figura 7. Estudios de las igualdades de las áreas de los cortes seccionales en el ramaje de un árbol, *Codex Urbinus*, folio 346 r.

Durante los últimos años en que se dedicó a la anatomía, Leonardo realizó investigaciones sobre el corazón. En este caso también da mano a la comparación con los bóvidos, ya que estaba convencido que el proceso de la «depuración» de la sangre, que se realizaba mediante un complejo proceso de ósmosis entre los ventrículos, era similar en los hombres y en los animales. En estos estudios se ve la influencia de Galeno, ya que Leonardo describe los inexistentes poros del tabique intraventricular que le sirven para explicar el movimiento de la sangre (Babini, 1969: 58). Pero, de todas maneras, Leonardo descubrió que la sangre recorre todo el cuerpo humano, llevando alimento a las diferentes partes y retirando los deshechos, adelantándose así al descubrimiento de William Harvey del mecanismo de la circulación de la sangre. En opinión del médico y estudioso de Leonardo Kenneth Keele

Los logros de Leonardo en anatomía cardíaca son tan grandes, que algunos aspectos de su obra aún no han sido igualados por la ilustración anatómica moderna... Su coherente representación del corazón y sus válvulas, tanto en sístole como en diástole,

que compara las posiciones de las partes, raramente, si acaso alguna vez, se ha visto realizada en un manual de anatomía.⁶

En cuanto a sus contribuciones sobre temáticas geográficas, Leonardo no se aboca al estudio de la Tierra en su totalidad, sino a observaciones parciales del paisaje. Realizó dibujos topográficos, especialmente en su trabajo cartográfico bajo la dirección de César Borgia, e ilustraciones para la realización de fortificaciones o para obras de drenaje o canalización. Uno de los aportes más relevantes de Leonardo en este campo, es su estudio de las conchillas fósiles y de restos de huesos de grandes peces, corales y caracoles. Negando que hubieran sido transportados a las cimas de las montañas por el diluvio universal, logra, a través de argumentos y observaciones, delinear que serían restos fósiles orgánicos que se habrían encontrado en antiguos mares, habiendo sido depositados, por tanto, en aquellos lugares tan inverosímiles (Babini, 1996: 50-54).

Leonardo manifestó tempranamente su interés por la zoología y la botánica, como lo resalta Vasari en su biografía. Desde su juventud estuvo interesado por toda clase de animales, a los que dibujó, diseccionó y disecó en grandes cantidades. En su edad madura, los estudió de manera científica, siendo, como mencionamos anteriormente, uno de los pioneros en el método de la anatomía y fisiología comparada. Por razones artísticas, aunque también se manifiesta su interés científico, realizó especialmente estudios óseos y musculares del caballo. Sus investigaciones sobre botánica, elemento que considera imprescindible representar de manera auténtica en la pintura, estarían indicando su conocimiento sobre: el ordenamiento de las hojas en las ramas (conocido posteriormente como filotaxis), el geotropismo y el heliotropismo, las funciones de la savia en conexión con los fenómenos de capilaridad, entre otros. Se ha destacado que también le pertenece a Leonardo el primer método de representación de hojas o de secciones de las plantas por «impresión directa» (Babini, 1969: 55-56). Leonardo reconoció, además, que los árboles mismos no se bifurcaban simétricamente y que, aunque las variedades de árboles poseían sus propias características, era posible distinguir una regla general acerca del crecimiento de las ramas. Explicó que si se traza un arco centrado en el tronco a través del sistema de las ramas, la suma total de las áreas de los cortes transversales resultaría igual a las de las áreas producidas por cualquier otro arco trazado desde el mismo centro (ver figura 7). La razón de esta igualdad se basaría en el flujo de la savia, que se comporta de la misma manera que el agua en los ríos o que el aire en los bronquios. Es en este intento por encontrar una ley general más allá de las particularidades que vemos la intención científica general de Leonardo (Kemp, 2006: 132-133).

VI. Incursiones en la matemática y la geometría (perspectiva, óptica, proporción)

La búsqueda por encontrar explicaciones racionales para su arte, su inagotable observación y cuestionamientos sobre los elementos de la naturaleza, y sus innovaciones técnicas, llevaron a Leonardo a estudiar matemática. En sus palabras, «Ninguna certeza hay donde no se puede aplicar una de las ciencias matemáticas o que no se relaciona con esas mismas ciencias matemáticas.» (*Códice G*, folio 96 v. En Marionni, 2005: 49).

6 Keele, Kenneth, *Leonardo da Vinci on Movement of the Heart and Blood*, Filadelfia, 1952, p. 122. Citado en Capra (2008: 248).

Las matemáticas podrían llegar a la certeza absoluta, ya que manejan conceptos mentales ideales de valor universal. Pero la verdadera ciencia, para el maestro, sería aquella que basándose en la observación, aplicaría razonamientos matemáticos para obtener mayor grado de certeza.

Se ha estudiado que Leonardo no tenía conocimientos avanzados de aritmética ni de álgebra, como es posible apreciar en sus manuscritos. Sin embargo, sus bocetos demuestran que poseía buenos conocimientos geométricos. Leonardo reverenciaba a la geometría sobre todas las otras ramas de las matemáticas. Esta preferencia radicaba en su creencia de que la aritmética no le era útil en su intento por explicar el diseño de las formas en la naturaleza, según habían sido originadas por el creador supremo. La geometría le permitía no sólo analizar el diseño divino, sino que le permitía representar las formas de este mundo natural en su arte —dibujo, pintura y arquitectura—.

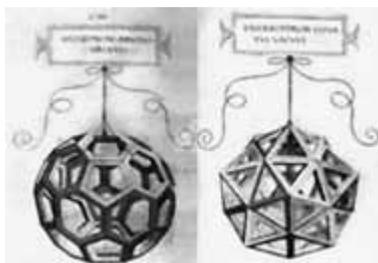


Figura. 8. Basado en Leonardo. Extraído del *De divina proportione*, Florencia, 1509.

Leonardo se sintió atraído por las figuras regulares, los cinco sólidos regulares (o «platónicos») que la filosofía y la matemática habían reverenciado tanto. Estos sólidos regulares son los únicos cuerpos sólidos que se constituyen de polígonos idénticos y son simétricos alrededor de todos sus vértices (el tetraedro, el hexaedro, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro). Estos cuerpos pueden ser truncados —rebanados simétricamente desde sus vértices— para transformarse en sólidos semirregulares⁷. Lo interesante, es que al truncar dos poliedros diferentes se producía un mismo cuerpo semirregular, cosa que fascinaba al maestro. Leonardo se interesó por estos cuerpos regulares durante su primer estadía en Milán, cuando conoció a Luca Pacioli, matemático que trabajó a las órdenes del duque de Sforza a finales del siglo XV. El libro de Pacioli, *De divina proportione*, publicado en 1506, se ocupaba de la «proporción divina» (o proporción áurea) incluye ilustraciones que Leonardo realizó para el mismo (Pacioli, 1991). Esta «Proporción divina» sería la proporción que resulta cuando una línea se divide de tal manera que la porción menor es a la mayor como la mayor es al todo. Los dibujos de Leonardo representan a los sólidos en perspectiva, con sus sombras, y con una configuración espacial en esqueleto (ver figura 8). Más que diseños geométricos, parecían objetos reales (Kemp, 2006: 85-91).

Las dos ramas de la geometría en las que Leonardo se interesa por resultar esenciales para su perfeccionamiento de la pintura son la perspectiva y la óptica. El sistema de perspectiva lineal había sido descubierto a comienzos del siglo XV por Filippo Brunelleschi, y había sido desarrollado por Leone Battista Alberti. Todo el arte florentino, desde entonces, se basaba en el principio de que el artista utilizaba las reglas tomadas de la naturaleza para emplearlas en sus escenas pictóricas. Este método unía la «invenzione», la creación de algo

⁷ Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno, «Astronomía y Física en Platón» (*comps.*).

nuevo que era verdadero o verosímil, con la «scienza», un sistema de conocimientos basado en principios racionales y verificables (Kemp, 2006: 60-61). Leonardo contribuye a este desarrollo de la perspectiva, dedicando gran parte de su *Tratado de la pintura* a este sistema (Da Vinci, 2004)⁸. Algunos autores destacan que existen documentos que prueban que dos décadas después de la muerte del maestro aún circulaban sus manuscritos sobre esta temática (Babini, 1969: 40).

En cuanto a la óptica, Leonardo realiza innumerables investigaciones sobre la forma y la función del ojo. El maestro consideraba que el ojo, que estaba diseñado para ver la luz y la sombra del mundo exterior, funcionaba de manera geométrica. Estudió la anatomía del ojo, encontrando conexiones entre el ojo y el cerebro que mostró en sus dibujos en forma pionera⁹. Debido a esto, estudió la perspectiva, y luego los efectos de la luz sobre cuerpos sencillos o múltiples, diversas fuentes a distintas distancias y de distintas formas, desarrollando en la pintura un sistema «tonal» (Kemp, 2006: 65-63; Capra, 2008: 30-32/ 305-328).

También se preocupó por el estudio de la proporción, pues consideraba que a través de ésta se manifestaba el diseño perfecto de Dios en la naturaleza. Si bien los artistas florentinos¹⁰ habían estado ocupados por estudiar la belleza que surge de un diseño proporcional desde comienzos del siglo XV, Leonardo dio un paso más allá, ya que relacionó esta visión artística de la belleza proporcional con la acción proporcional de todas las fuerzas de la naturaleza. El más famoso estudio sobre la proporción en la arquitectura en esa época, era el libro *De Architectura* del arquitecto romano Marcus Vitruvius Pollio (Vitruvio) del siglo I a.C (Vitrubio, 2009). En él, el romano destacaba cómo el cuerpo humano con brazos extendidos y piernas separadas podría incluirse dentro de un círculo y un cuadrado, siendo éstas las dos figuras geométricas más perfectas. Este sistema partía del entendimiento de que la «brazo» —la medida de los brazos extendidos tomada sobre el pecho— corresponde a la altura de un hombre adulto y debe dividirse según determinadas proporciones. Cada parte

8 En sus manuscritos Leonardo explica, «Entre los estudios de las observaciones naturales, la luz deleita más al espectador; entre las cosas grandes de las matemáticas, la certeza de la demostración eleva más preclaramente los ingenios de los investigadores. La perspectiva, pues, debe ser antepuesta a todas las traducciones y disciplinas humanas, en el campo de la cual la complicada línea de rayos proporcionala los modos de las demostraciones, donde reside no tanto la gloria de las matemáticas cuanto de la física, adornada con las flores de la una y de la otra; los enunciados de ésta, expresados con circunloquios, yo los condensaré con conclusiva brevedad, tejiendo, según el tipo de materia, naturales y mecánicas demostraciones, a veces extrayendo los efectos de las causas, otras las causas de los efectos, añadiendo asimismo a mis conclusiones alguna que no está en ellas; sin embargo de ellas se extrae luz de cada cosa, si el Señor se digna ilustrarme a mí, estudioso de la luz, que dividiré la presente obra en tres partes.» (*Códice Atlántico*, folio 203 r.a. En Marioni, 2005: 105). Aunque este fragmento es sumamente interesante, es una traducción literal de la obra *De la Perspectiva* de John Peckham (1970).

9 Capra explica: «Leonardo mostró por primera vez el itinerario completo de la visión a través de la pupila y el cristalino, el nervio óptico y todo el recorrido hasta una cavidad específica del cerebro, conocida por los neurólogos de hoy como el tercer ventrículo cerebral. Es allí donde situó la ‘sede del alma’, donde se encuentran todas las impresiones sensoriales. El concepto que Leonardo tenía del alma se aproxima mucho a lo que los científicos cognitivos de hoy llaman ‘cognición’, es decir, proceso de conocimiento.» (Capra, 2008: 31).

10 El estudio sobre las proporciones ideales del cuerpo se remonta a la Antigüedad, cuando Policeto realiza estudios precisos. En la Edad Media, los artistas seguían un esquema de proporciones menos preciso, que subdivide la altura del cuerpo humano en 9 partes (el canon del monte Athos). Muchos artistas del siglo XV continúan con el esquema medieval, rompiéndose esta tradición con los estudios de Leone Battista Alberti, quien, efectuando sus propias mediciones, corrige los esquemas de proporciones en su famosa obra *De statua* de 1434-1435.

del cuerpo humano estaba inscripto en un sistema de dimensiones relacionadas unas con otras, por lo que cada parte se mantenía en una razón proporcional con las demás.

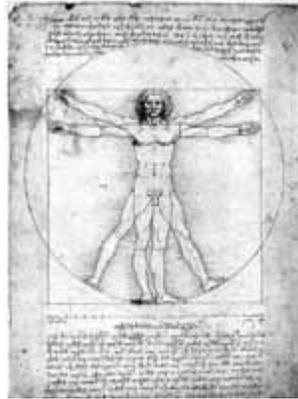


Figura 9. Demostración del diseño geométrico del cuerpo humano, basado en Vitruvio, Venecia, *Galleria dell'Accademia*.

Parece indudable que Leonardo se haya inspirado en Vitruvio, cuya obra había sido publicada en 1486 en Roma, y, en su estudio, Leonardo manifiesta su interés en mostrar al cuerpo humano como el modelo del universo, sede donde se encuentran representadas las proporciones de la naturaleza (ver figura 9). Pero Leonardo, debido a sus estudios antropométricos, sabía que no podía seguir todos los puntos del canon de Vitruvio. De esta manera, notó que la proporción del pie de la convención de la Antigüedad que era de $1/6$ de la altura total del cuerpo, era empíricamente inexacta. Por lo tanto, la corrigió fijándola en $1/7$, abandonando entonces el sistema duodecimal de proporciones de Vitruvio (Zöllner, 2006: 74). De esta manera, con su famoso «Hombre de Vitruvio», Leonardo introduce la geometría en el estudio de las proporciones físicas.

VII. Indagaciones en la astronomía y aportes a la física

Si bien Leonardo no se ocupó de la astronomía con el mismo interés e intensidad con el que estudiará los fenómenos físicos, sí cabe destacar que tuvo algunos aciertos en sus estudios. Por otra parte, la mayoría de las consideraciones del maestro acerca del Sol, la Luna y la Tierra, comparten elementos con las cosmografías antiguas. Leonardo, de acuerdo a los manuscritos que han sobrevivido, no indaga en las cuestiones relativas a los movimientos de la Tierra, y, si bien, como destaca Babini (1969: 42), en un sus *Cuadernos anatómicos* incluye la frase «el Sol no se mueve», en otros escritos admite la existencia de movimientos diurnos. No habría existido, por tanto, un «Leonardo copernicano antes de Copérnico.»

Por otra parte, sus estudios del campo de la física son reveladores, y es en este campo en donde muestra Leonardo sus características de pensador científico. Son justamente sus escritos sobre elementos de la física, lo que da a conocer su faceta de científico en el siglo XVIII¹¹. Es

11 Babini explica que el físico italiano Giovanni Battista Venturi, que estudia los códices leonardianos en París en 1797, arguye que «debe ubicarse a Leonardo a la cabeza de aquellos que, entre los modernos, se han ocupado de ciencias físico-matemáticas y del verdadero método de su estudio.» (Babini 1969: 43).

en este campo, que Leonardo se convierte en un precursor de los investigadores de la Época Moderna.

Tuvo la característica de utilizar un ojo analítico sobre lo que se presentaba ante él y, diferenciándose de muchos de sus antecesores, no utilizó lo que observaba para llegar a conclusiones precipitadas o fantasiosas. Sus estudios sobre la dinámica y la estática surgen de las problemas que se le presentan como ingeniero, entendiendo a esta profesión como se lo hacía en el Renacimiento, para resolver problemas de índole arquitectónica, urbanística, hidráulica, mecánica, y técnica.

En lo referente a la estática, Leonardo estudió los centros de gravedad y del equilibrio de máquinas sencillas. Había estudiado las explicaciones que la física medieval proporcionaba con respecto, entre otras cosas, a los brazos de una balanza. Se postulaba que para que los brazos de una balanza lograsen equilibrio, las longitudes de cada brazo multiplicadas por su peso debían ser iguales. Leonardo realiza muchos estudios sobre distintas combinaciones de diversos pesos a diversas distancias en los brazos, realizando ejercicios sobre el funcionamiento de las proporciones. También estudió con profundidad teórica el funcionamiento de poleas múltiples, que eran utilizados para resolver problemas prácticos para levantar objetos pesados (Kemp, 2006).

Si bien la estática ayuda en nuestra comprensión de la naturaleza de las cosas, es la dinámica la que logra completar el cuadro de entendimiento. Para explicar la causa por la cual los objetos se mueven, Leonardo adhirió a las proposiciones medievales: cuando un objeto móvil se sometía a una fuerza, se le otorgaba una cantidad determinada de *ímpetu*. Este *ímpetu* se iría agotando en forma progresiva, con ciertas condiciones de velocidad y distancia, y abandonaría al cuerpo. Este ímpetu sería la causa por la cual el objeto sigue en movimiento una vez separado de su motor. Se ha señalado, tal vez en forma excesiva, que es posible encontrar en esta explicación un preludio a la ley de inercia, si bien el maestro no va más allá de éste (Babini, 1969: 45). Leonardo se dio cuenta de que la respuesta aristotélica de que un cuerpo al que se le aplicara el doble de fuerza recorrería el doble de distancia, o de que un cuerpo de la mitad de peso se le aplicara la misma fuerza recorrería el doble de la distancia, no se demostraba en la práctica. Esto lo comprobó en sus estudios prácticos con los cañones, en donde los grandes cañones no logran disparar pequeños proyectiles a distancias enormes. Sin embargo, el desarrollo teórico de la dinámica de esa época no le permitió resolver este problema (Kemp, 2006: 77-78).

También estudia por mucho tiempo la dinámica del agua, por sus intereses como ingeniero hidráulico. Si bien mencionó en variadas ocasiones que iba a componer un tratado sobre este tema con sus manuscritos, esto nunca ocurrió durante su vida. Recién en el siglo XVII se compiló el *Trattato del moto e misura dell'acqua*, siendo publicado en 1826 (Da Vinci, 1923). Este tratado constituye un progreso para la época, y estudia diferentes temáticas: el movimiento del agua, de las olas y remolinos, de los cuerpos flotantes, de la conducción por canales, de las cosas consumidas por el agua, de los molinos, de otras máquinas hidráulicas. En estos estudios se pone una vez más de relieve la importancia del dibujo para representar sus estudios científicos sobre el agua, ya que las palabras no le eran efectivas para describir estos complicados movimientos. En ellos no sólo existen representaciones de lo que Leonardo veía, sino también incluyen observaciones y construcciones teóricas, ya que Leonardo pretendía reproducir sus efectos a partir de las causas. Se ha destacado que en estos estudios aparecen ideas novedosas: el principio de los vasos comunicantes, los fenómenos en que participa el sifón, un atisbo del «principio de continuidad», que explica que

la velocidad de la corriente es inversamente proporcional a la sección, y, un reconocimiento de la naturaleza del movimiento ondulatorio (Babini, 1969: 46).

Leonardo también estudia el principio de propagación de la luz y del sonido. Con respecto a esto propone las siguientes analogías:

Así como la piedra que arrojada sobre el agua se convierte en centro y causa de varios círculos, y el sonido en el aire se propaga circularmente, así todo cuerpo colocado en el aire luminoso se despliega circularmente llenando las partes circunstantes de infinitas imágenes semejantes a la propia y apareciendo totalmente en todas y cada una de las partes (en Babini, 1969: 47).

A partir de esta analogía Leonardo concluye que tanto la luz como el sonido son ondas, extendiéndolo años más tarde a los cuatro elementos (tierra, aire, agua y fuego —entendido como luz—). Capra destaca que si bien estas primeras intuiciones son revolucionarias para su época, sería exagerado sostener que el maestro logró presentar una teoría ondulatoria de la luz como la que presentara Christian Huygens doscientos años después:

Hacerlo habría implicado el dominio de la representación matemática de una onda y la capacidad para poner en relación su amplitud, frecuencia, etcétera, con fenómenos ópticos observados... estos conceptos no se utilizaron en ciencia hasta el siglo XVII, cuando se desarrolló la teoría matemática de las funciones (Capra, 2008: 293-303).

Por último, mencionaremos que también Leonardo ha estudiado otros fenómenos que se relacionan con la química y «las artes del fuego». En relación a la química, se ha podido reconocer en los manuscritos de Leonardo más de cien productos: minerales, compuestos químicos, aceites, jabones, drogas, entre otros (Babini, 1969: 50). En lo referente con lo segundo, existen dibujos de Leonardo en donde hace demostraciones de cómo perfeccionar el proceso de destilación, técnica en el que estaría muy interesado por sus necesidades como pintor (en el caso de fabricar barnices y pinturas). También estudia la combustión y, en este campo, se adelanta un siglo al descubrimiento de la relación entre combustión y respiración, afirmando «Donde no vive la llama, no vive animal que respire» (en Babini, 1969: 48-49).

VIII. Leonardo técnico:

artes bélicas, arquitectura, mecánica, hidráulica y vuelo

En el borrador de la carta que escribe en 1483 a Ludovico el Moro, Leonardo se promueve ante todo como ingeniero (Marioni, 2005). En esta carta, que posiblemente nunca haya sido enviada, enumera una larga lista de proyectos para elementos de guerra: puentes fuertes y móviles, gatos, cañones, carros, morteros, y trabucos. Además, menciona que es capaz de, en caso de ataque, desecar los fosos de agua de la fortificación de un enemigo. También dedica unas líneas a sus habilidades como arquitecto e ingeniero hidráulico. Como ya mencionamos, llama la atención que sólo haya mencionado a lo último y muy escuetamente que es un muy buen pintor y escultor. La razón para esto debe ser, probablemente, que Leonardo esperaba recibir la invitación del duque, un personaje sumamente interesado en la guerra, a partir de sus dotes como ingeniero bélico, y así recibir una muy buena remuneración. Pero también es posible observar su interés por incursionar en este campo, demostrando, una vez más, que poseía otros intereses, más allá de los artísticos, que deseaba desarrollar.

A partir de los numerosos campos en los que incursionó para poder encontrar fundamentos más racionales para su arte, como ser los de anatomía, geometría, zoología, botánica y física, Leonardo no sólo dejó de lado sus intereses artísticos para avanzar más allá de lo

que lograron muchos científicos de su tiempo, sino que se basó en estas teorías para lograr aplicaciones prácticas. Esta característica es propia de su tiempo, como señalamos en una sección anterior, ya que representa la unión entre la teoría y la práctica llevada a cabo por estos artistas-técnicos del siglo XV.

Las cualidades de Leonardo como técnico son también originales en su tiempo. Aunque en algunos casos se valió del método de «ensayo y error», típico del técnico, en ocasiones su habilidad técnica es más mental que manual, destacándose su fuerza inventiva (Babini, 1969: 59-60). Incluso, mucho de sus proyectos, aunque logró proyectarlos de manera asombrosa, no podían ser construidos con los conocimientos mecánicos de su época (Bernal, 1989: 301). Otra característica que tuvo Leonardo que lo distinguió de otros ingenieros de su época, en opinión de Capra, fue que de la ingeniería pasó a la ciencia convirtiéndose ésta para él en un ‘discurso mental’: «A Leonardo no le bastaba con saber *cómo* funcionaba algo, sino que necesitaba saber *por qué*. Por tanto era forzoso que se desencadenara el proceso que lo condujo de la tecnología y la ingeniería a la ciencia pura.» (Capra, 2008: 85).

En sus manuscritos sobre máquinas de guerra diseña objetos con distintos mecanismos tanto para la defensa como para el ataque. Estos bocetos tienen la característica, como la mayor parte de los dibujos de Leonardo, de no estar acompañados por textos explicativos. Entre algunos de sus inventos más destacados de maquinaria de defensa, se encuentra la ballesta gigante (ver figura 11), y los cañones de órgano que sirven para aumentar la velocidad y la cantidad de disparos (ver figura 12).

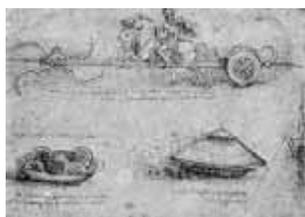


Figura 10. Esbozo de un carro falcado y un carro blindado c. 1485-1488. Museo Británico, Londres.



Figura 11. Esbozo de una ballesta gigante, c. 1485. Milán, Biblioteca Ambrosiana, *Códice Atlántico*, fol. 149 h-r.

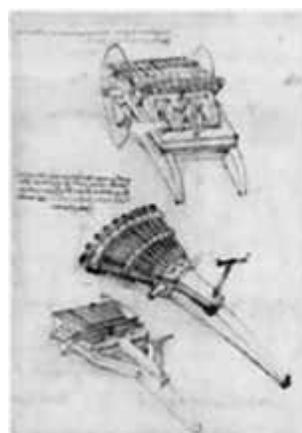


Figura 12. Hoja de estudios de cañones de órgano, c. 1482. Milán, Biblioteca Ambrosiana, *Códice Atlántico*, fol. 157r.

Si bien a Leonardo le disgustaban los efectos de la guerra, a la que llamó *pazzia bestialissima* (locura bestial), le fascinaba el diseño de armas cada vez más destructivas, que amplificaran enormemente el poder humano (Kemp, 2006: 115)¹². Por ello diseñó maquinarias

¹² Si bien resulta contradictoria su oposición a la guerra y su empleo como ingeniero militar, Capra explica que es comprensible teniendo en cuenta su actitud eminentemente pragmática, ya que la realización de estos inventos le permitiría solventar y desarrollar su investigación científica. Además, nunca participó en forma directa en ninguna acción ofensiva, siendo la mayoría de su asesoramiento la proyección de estructuras de defensa y preservación de un pueblo o una ciudad (Capra, 2008: 47-48).

móviles para el ataque. Es el caso de los carros falcados y de los carros de combate blindados, que llevaron a Leonardo a pensar diversas soluciones para su impulsión, partiendo de caballos, para posteriormente elegir la fuerza muscular de los hombres, por la certera conclusión de que los caballos se asustarían debido a la estrechez del vehículo y del ruido del combate. En este aspecto, el maestro expresa que los carros de combate deben ser acompañados por tropas de infantería, cosa que efectivamente va a ocurrir en la milicia moderna (Zöllner, 2006: 188). El Renacimiento es, además, una época en la cual hubo un cambio de mentalidad en el campo de la tecnología militar. La artillería comenzó a ser utilizada cada vez más, debido a las innovaciones en las tácticas bélicas. Al tanto de esa evolución, Leonardo contribuyó con observaciones acerca de la fundición y el montaje de cañones y morteros, así como sobre la construcción de los cañones órgano a los que nos referimos anteriormente. Es así, que su labor como ingeniero militar lo llevó a incursionar en la metalurgia, sobretudo la fundición y modelado de bronce, y el ondulado, estirado, cepillado y taladrado del hierro (Sarton, 1952: 77). También trabajó sobre el proyecto de un cañón a vapor, el famoso «Architonito» de Arquímedes, que propulsaba una bala de alrededor de 30 kg a una distancia de 1 km, incluso cuando no estaba clara su efectividad práctica en la guerra.

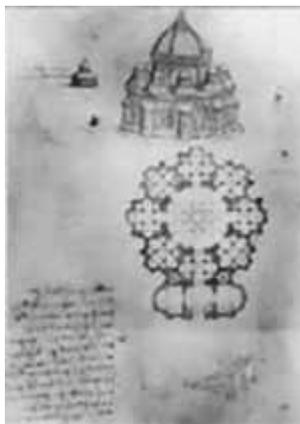


Figura 13. Estudios de una edificación de planta central, c. 1487-1490. *Biblioteca del Instituto de Francia, París.*

Muchas de las máquinas que inventó son más bien una muestra de los intereses y posibilidades de proyección de Leonardo de aparatos sumamente complejos, ya que no eran tan útiles en la práctica. Lo mismo ocurre con muchos de sus inventos sobre hojas de hacha, lanzas, flechas y alabardas. Por más que trabajó como consejero, y en algunos casos como ingeniero, bélico para César Borgia (1502-1503), para el gobierno de la ciudad de Florencia en su guerra contra Pisa (1503-1504), y, probablemente, para Venecia (1500), no se encuentran dibujos que se relacionen directamente con estos puestos. Es posible que sus inventos militares sean más fantasiosos que lo que se supone, pero muchas de sus ideas son preludio de las actuales ametralladoras y tanques (Zöllner, 2006:188). En arquitectura y urbanismo, si bien Leonardo proyectó edificios profanos y sagrados, y planos para una reconstrucción de la ciudad de Milán, no existen pruebas de que haya llevado ninguno de estos diseños a la práctica. Lo relevante de estos estudios es que el maestro haya propuesto algunas concepciones arquitectónicas propias y las haya ilustrado en forma sistemática en sus dibujos. Entre sus dibujos de arquitectura profana, se destacan sus templos de planta central (como

es el caso de una iglesia que presenta siete capillas radiales y un nártex longitudinal acabado en curva en los lados estrechos (ver figura 13), palacios y villas y fortificaciones. En sus proyectos de arquitectura religiosa, es recurrente su utilización de una cúpula monumental que descansa sobre un tambor, clara influencia de la cúpula realizada por Brunelleschi en la catedral de Florencia¹³. Leonardo también realiza esbozos para una remodelación urbanística de Milán. Es posible que su diseño de reparar las vías de circulación y las cantarillas de los caminos peatonales, ubicándolos en planos diferentes, se deba a la peste que asoló Milán en los años 1484-1485. En su planificación del diseño de esta ciudad, Capra señala que Leonardo mostró también en este caso su visión orgánica, la ciudad como sistema vivo, en la cual dio principal atención a los edificios y al ‘metabolismo’ de la ciudad (proveyendo alojamiento a las personas, protección a los animales y haciendo posible la limpieza regular de las calles con agua)¹⁴. Otras de las funciones que Leonardo realizó como arquitecto de la corte, fue la de construir escenografías con motivos festivos, como lo demuestran muchos de sus dibujos¹⁵. También en su época en Milán se dedicó a esbozar distintos tipos de fortificaciones, tema al que regresaría posteriormente. En estos estudios intentó modificar el tipo constructivo de las fortalezas, respondiendo a los cambios en la técnica de guerra, en la cual la artillería cada vez tenía una función más predominante. De esta manera, intentó crear formas que resistieran de mejor manera a los impactos de la artillería, concentrándose en aplanar muros y bastiones, y en construir torres de defensa redondas en vez de cuadradas (Zöllner, 2006:153). Diseñar fortificaciones, se convirtió, por tanto, en un ejercicio de cálculo de impactos, desviaciones y rebotes.

En su mayoría, el *Códice Atlántico*, llamado de este modo por su enorme tamaño, ofrece más de mil hojas de estudios técnicos y mecánicos. Si bien sus dibujos no gozan de la perfección y dedicación que el maestro otorgó a *El hombre de Vitruvio*, ofrecen interesantes innovaciones con respecto a algunas herramientas. Este es el caso de su estudio para un automóvil, que refleja el modo de trabajar muy poco sistemático, característico de la primera época de Leonardo. Concibió, parecería, el principio del automatismo, en otras palabras, que una máquina obtiene mayor eficiencia cuanto más independiente es de la atención del hombre (Sarton, 1952: 79). Pero también hizo diseños para variadas maquinarias, para la industria textil y metalurgia, grúas móviles, máquinas para trabajar espejos, acuñar monedas o confeccionar tornillos, entre otros. Sus

13 Capra destaca el énfasis que Leonardo pone a las semejanzas entre estructuras arquitectónicas y estructuras naturales que lleva más allá de las analogías comunes a sus contemporáneos, comparando la cúpula de una iglesia con el cráneo humano, o los arcos de su bóveda con la caja torácica. «En paralelo al vivo interés con que seguía los procesos metabólicos orgánicos —a inspiración y la espiración en la respiración y el transportador de nutrientes y de productos de deshecho en la sangre— prestaba especial atención al ‘metabolismo del edificio cuando estudiaba la manera en que las escaleras y las puertas facilitaban el movimiento en su interior.»(Capra, 2008: 89).

14 En opinión de Capra (2008: 90-91) «De las notas de Leonardo se desprende con claridad que concebía la ciudad como una suerte de organismo vivo en el que, para mantener la salud, la gente, las mercaderías, el alimento, el agua y la basura debían poder moverse con facilidad por ella. Ludovico, desgraciadamente, no puso en práctica ninguna de las novedosas ideas de Leonardo. De haberlo hecho, tal vez la historia de las ciudades europeas habría sido muy distinta... La idea de salud urbana de Leonardo, basada en la concepción de la ciudad como un sistema vivo, reapareció hace muy poco, en la década de 1980, cuando la Organización Mundial de la Salud inició su Proyecto de Ciudades Saludables en Europa.»

15 En su caracterización de ‘artista como mago’, Capra (2008: 92-93) muestra la versatilidad de Leonardo como diseñador en sus incursiones en las representaciones teatrales como productor, escenógrafo, diseñador de vestuario, maquillador y constructor de maquinaria escénica. Cita ejemplos de sus logros, como son la invención del escenario giratorio y efectos especiales en las obras representadas que provocaban la admiración de sus contemporáneos.

dibujos de hidrotecnia presentan un método de trabajo más sistemático, donde Leonardo delineó mecanismos para subir agua de un nivel a otro. En otro dibujo, incluso ideó posibilidades de locomoción sobre y bajo el agua, como es el caso de un buzo con una especie de tubo por el cual podría respirar (esta escafandra no es una invención de Leonardo, ya que existían estudios anteriores similares; Leonardo lo desarrolla y le da un aspecto muy similar al creado posteriormente).



Figura 14. Resorte templado con rueda escalonada, 1493. *Códice Madrid*, Madrid.

Los dibujos que aparecen en el *Códice Madrid*, que fueron realizados durante la década del 90 en Milán, son mucho más sistemáticos y claros. Es posible que Leonardo haya realizado estos manuscritos con la intención de editarlos. En su mayoría, estos dibujos tratan de la transformación de fuerza y movimiento (ver figura 14), como es el caso de un mecanismo por el cual la tensión parte de un resorte y que se transforma en un movimiento regular gracias al engranaje representado (Zöllner, 2006: 166). Entre muchos de los proyectos que forman parte de su incursión en la ingeniería hidráulica, encontramos: sus proyectos de desecación y drenaje de pantanos, su proyecto de canalización para desviar el curso del río Arno, proyectos de dragas y excavadoras, y tornillos de Arquímedes (Babini, 1969: 62). Dentro de los estudios del movimiento de las aguas, Capra señala que el maestro incluye una dimensión ecológica del agua como medio y fluido nutriente de vida, y que, por tanto, no desarrollaba la ciencia y la ingeniería con el propósito de dominar la naturaleza —como lo habría hecho Francis Bacon en el siglo XVII—, sino que manifestaba un gran respeto y admiración hacia ella y a las posibilidades de aprendizaje que ofrece, buscando más que nada cooperar con ella (Capra, 2008: 35/ 334)¹⁶. En cuanto a sus proyectos en ingeniería hidráulica, Capra destaca el estudio minucioso que Leonardo realiza de las corrientes de las aguas con el fin de modificar mínimamente su curso, incluyendo presas pequeñas en lugares óptimos. El autor fundamenta su interpretación con la siguiente cita del maestro extraída del *Códice Leicester*, folio 13r: «Para desviar un río de un sitio a otro, es menester halagarlo, no forzarlo con violencia.» (en Capra, 2008: 336). En esta actitud de tomar la naturaleza como modelo, Capra encuentra similitudes con el resurgimiento contemporáneo del diseño ecológico, que estudia los patrones y los flujos del mundo natural e intenta tomar sus principios para incluirlos en sus procesos de diseños, y con el movimiento cultural del

16 Capra cita una interesante reflexión de Leonardo de sus *Estudios anatómicos*, folio 114v: «Por mucho que el ingenio humano emplee diferentes instrumentos en diversas invenciones con el mismo fin, jamás encontrará una invención más bella, más fácil, ni más concisa que la naturaleza, porque en las de ésta no falta nada ni nada es superfluo.» (en Capra, 2008: 334).

pensamiento medioambiental conocido como «ecología profunda», que entiende al mundo vivo en su íntima interrelación e interdependencia¹⁷.

El último gran estudio al que nos referiremos, y quizás el más renombrado y original, es el del estudio acerca del vuelo de los pájaros y el mecánico. La temática del vuelo interesó al maestro desde su juventud, quien va a reunir sus afinadas observaciones en un tratado que hoy conocemos como el *Código acerca del vuelo de los pájaros*. En estos manuscritos investiga la anatomía y la fisonomía de las aves —aunque también estudia la de los insectos y murciélagos—, tanto en vuelo como en reposo, e incluye sus observaciones mecánicas sobre el vuelo, y las necesarias condiciones de equilibrio y estabilidad (con y sin viento). Su gran proyecto era confeccionar una máquina voladora que fuera accionada por fuerza humana, y en algunos casos por resortes que llevaban la energía hacia las alas de la misma. Pero más allá de la creación de este «pájaro mecánico», el famoso «*ucello*», Leonardo incursionó en la investigación del planeamiento, diseñó el primer paracaídas (su proyecto era una estructura piramidal de base cuadrada con un lado y una altura de 7 metros, ver figura 15), y un tornillo aéreo (ver figura 16), que se ha señalado como el primer helicóptero (Babini, 1969: 64)¹⁸.

Este estudio está considerado como el más antiguo del diseño de un helicóptero. Su mecanismo se basa en la idea de que un tornillo helicoidal, unido con pernos a un eje de rotación tiende a levantarse en el aire si se hace girar rápidamente. Su diseño consiste en un radio de cinco metros, una estructura de cañas revestida de tela con fino almidonado, con un borde metálico de refuerzo. Muchos de sus planteamientos estaban acertados, pero se necesitaron de cinco siglos para poder concretarse técnicamente.

Como hemos visto en estas páginas, existen posiciones diversas con respecto a la ubicación de Leonardo da Vinci dentro de la historia de la tradición científica. Más allá de que sea considerado científico, o simple artista que en su unión de la teoría con la práctica abordó problemáticas propias de la ciencia, es innegable que las indagaciones de este hombre con respecto a las ciencias naturales y exactas, así como en el desarrollo de la técnica, han impactado por sus características de pioneras, en un tiempo en que las ciencias aún se hallaban en formación. Su rasgo más notable fue su característica de abordar campos diversos a través de una observación directa de los fenómenos de la naturaleza, prefigurando lo que luego se conocería como el «método científico». El historiador de la ciencia Desiderio Papp resalta la importancia de Leonardo, más allá de que no haya dejado escuela:

Mientras *Colón* desplazó con sus viajes los límites explorados de la Tierra, *Leonardo Da Vinci* (1452-1519), gracias a los dones de su genio —el más universal que conoce la historia—, dilató los horizontes de todas las ramas de la ciencia de su tiempo. Pintor, escultor, arquitecto, ingeniero, físico y biólogo, este espíritu casi sobrehumano se adelantó a su siglo con sus admirables descubrimientos. [...] Desgraciadamente *Da Vinci* guardó el secreto de sus magníficos hallazgos... el investigador, actuaba al margen de la historia. Su verdadera influencia sobre el desarrollo de las ciencias fue menor, en mucho, que la de algunos espíritus mediocres comparados con el suyo. (Papp, 1997: 98-99)

17 Capra va incluso más allá en su análisis y encuentra que tanto la ecología profunda como la visión del mundo que tenía Leonardo tienen una base de conciencia religiosa: «Cuando la espiritualidad se entiende como manera de ser que emana de un profundo sentido de unidad con todo, como sensación de pertenencia al universo concebido como una totalidad, no hay duda de que, en su esencia más profunda, la conciencia ecológica es espiritual. Para que la visión del mundo que profesaba Leonardo da Vinci tenía esa suerte de dimensión espiritual. A diferencia de la mayoría de sus contemporáneos, casi nunca se refirió a la creación divina, sino que prefería hablar de las obras infinitas y las invenciones maravillosas de la naturaleza.» (Capra, 2008: 337).

18 Debemos destacar que Leonardo no llegó a probar este invento.



Figura 15. El paracaídas. *Códice Atlántico*.
Biblioteca Ambrosiana, Milán.



Figura 16. Máquina voladora. *Códice B*, Institut de France, París.

IX. Bibliografía

- Antillón, J. J. (2003), *Lo Humano de los Genios*, Costa Rica, Editorial Universidad de Costa Rica.
- Assandri, A. (2008), *Leonardo da Vinci y sus aportes a la historia de la ciencia*, Montevideo, CEBA.
- Babini, J. (1969), *Leonardo y los técnicos del Renacimiento*, Buenos Aires, Centro Editor de América Latina.
- Balard, M.; Genêt, J-P. y Rouche, M. (1989 [1978]), *De los Bárbaros al Renacimiento*, Madrid, Akal.
- Bernal, J. (1989 [1954]), *Historia Social de la Ciencia*, Barcelona, Península, 2v.
- Bloch, M. (1986), *La Sociedad Feudal*, Madrid, Akal.
- Boido, G. (1996), *Noticias del Planeta Tierra. Galileo y la revolución científica*, Buenos Aires, AZ.
- Capra, F. (2008 [2007]), *La ciencia de Leonardo. La naturaleza profunda de la mente del gran genio del Renacimiento*, Barcelona, Anagrama.
- Da Vinci, L. (1923 [1826]), *Trattato dell'acqua*, Bologna, Zanichelli.
- _____ (2004 [1615]), *Tratado de la pintura*, Buenos Aires, Andrómeda.
- Freud, S. (1970), *Psicoanálisis del Arte*, Madrid, Alianza.
- Friedenthal, R. (1987), *Leonardo da Vinci*, Barcelona, Salvat.
- Gelb, M. (1999), *Pensare come Leonardo*, Milán, Pratiche.
- Gombrich, E. H. (1998 [1950]), *La Historia del Arte*, Madrid, Debate.
- Gómez, S. (1975), «El Renacimiento en Italia en el siglo XVI», en *El arte. Pueblos, hombres y formas en el arte*, Buenos Aires, Centro Editorial de América Latina, N° 19.
- Hauser, A. (1969 [1951]), *Historia social de la literatura y el arte*, Madrid, Guadarrama, 2v.
- Kemp, M. (2006), *Leonardo*, México, FCE.
- Le Goff, J. (1991), *Mercaderes y Banqueros de la Edad Media*, España, Oikos-Tau.
- Marioni, A. (2005), *Leonardo da Vinci. Escritos literarios*, Madrid, Tecnos. Trad. G. Gabriele Muñiz.
- Mc Nall Burns, E. (1962), *Civilizaciones de Occidente*, Buenos Aires, Peuser.
- Nieto Alcalde, V. y Checa, F. (1993), *El Renacimiento. Formación y crisis del modelo clásico*, Madrid, Istmo.
- Pacioli, L. (1991 [1506]), *La Divina Proporción*, Madrid, Akal.
- Panofsky, E. (1981 [1962]), *Renacimiento y renacimientos en el arte occidental*, Madrid, Alianza.

- Papp, D. (1997), *Historia de la Ciencia*, Caracas, Andrés Bello.
- Peckham, J. (1970), *Perspectiva communis*, Madison, University of Wisconsin Press. Ed. D. Lindberg.
- Peladán, J. (1945), *La Filosofía de Leonardo Da Vinci*, Buenos Aires, Araújo.
- Romano, R. y Tenenti, A. (1998), *Los fundamentos del mundo moderno*, Madrid, Siglo XXI.
- Sarton, G. (1952), *La Vida de la Ciencia. Ensayos de Historia de la Civilización*, Buenos Aires, Espasa-Calpe.
- Vasari, G. (1550), *Le Vite de' più eccellenti architetti, pittori et scultori italiani*, Florencia, Edición Torrentina.
- _____. *Vida de Leonardo Da Vinci*. Disponible en español en *Avisora*, 2001. http://www.avizora.com/publicaciones/textos_historicos/giorgio_vasari/0001_vida_leonardo_da_vinci.htm
- VitruvioPolión, M. (2009), *Los diez libros de Arquitectura*, Madrid, Alianza.
- Vesalius, A. (1998-2009), *On the Fabric of the Human Body*, San Francisco, Norman Publishing, 5 v.
- Von Martin, M. (1946), *Sociología del Renacimiento*, México, FCE.
- Zöllner, F. (2000), *Leonardo da Vinci 1452-1519*, Alemania, Taschen.
- _____. (2006), *Leonardo da Vinci 1452-1519. Esbozos y dibujos*, Alemania, Taschen.

8. Conceptos fundamentales de la teoría copernicana¹⁹

I. A modo de introducción

Se conoce con el nombre de *Revolución Copernicana* al cambio a nivel científico y conceptual que supone la hipótesis propuesta por Nicolás Copérnico en su obra *Sobre las revoluciones de las esferas celestes*, (*De Revolutionibus orbium coelestium*) que fue publicada en 1583 de forma póstuma por Andrea Osiander, según la cual es el Sol quien ocupa el centro del universo y no la Tierra. Esta revolución supone pasar de una concepción geocéntrica y geostática teniendo en cuenta el modelo de Aristóteles (384-322 a.C.) y Ptolomeo (100-170 d.C.), a un modelo heliocéntrico, cambio que es impulsado por Copérnico pero que es continuado por Galileo, Kepler, y culminado por Newton tras la conciliación de los resultados obtenidos por los científicos anteriores. Esta revolución no solo conlleva diferencias en el plano científico sino también en el plano antropológico ya que implica un cambio de perspectivas y valores en la propia concepción del hombre, iniciada en cierta manera por René Descartes en el terreno de la filosofía.

Entre los problemas de carácter antropológico podemos mencionar los vinculados a la fe cristiana. Si como planteaba la teoría copernicana la tierra no era más que uno de seis planetas, entonces qué sentido poseían ahora las historias de la caída y de la redención, o también, si la tierra es un planeta, y por consiguiente un cuerpo celeste situado fuera del centro del universo, ¿qué se hace de la posición intermedia, pero central, del hombre, situado entre los demonios y los ángeles? [...] Y lo peor de todo: si el universo es infinito, tal como piensan muchos copernicanos, ¿dónde puede estar situado el trono de Dios? ¿Cómo van a poder encontrarse el hombre y Dios en el seno de un universo infinito? (Kuhn, 1996)

La teoría copernicana al ubicar a la Tierra en una nueva posición respecto al Sol, trajo consigo cuestionamientos vinculados al lugar que el hombre ocupa en la Tierra, en el universo y respecto a su relación con Dios, afectando las bases de su moral.

Alberto Coffa (1969) menciona que Copérnico ha resultado uno de los escalones más importantes en el proceso de transformación de la cosmología clásica y medieval; idea que

19 Una versión preliminar y abreviada del presente artículo fue incluida en Camejo (2007).

es compartida entre otros por Alexander Birkenmajer (1973) quien entiende que la obra de Copérnico es decisiva en la historia de la astronomía, pues gracias a ella la humanidad pudo resolver un enigma de vieja data. Copérnico al igual que otros hombres de ciencia intenta explicar los complejos movimientos de los astros que se advertían en el firmamento.

Durante la Edad Media (siglos V-XV d.C.) la física de Aristóteles logra dar cuenta del mundo empírico por medio de un sistema donde filosofía y física gozan de una relación armoniosa. Pero a su vez, los pilares físicos comienzan lentamente a ser socavados por las críticas que desde esta misma época comienzan a realizarse a los errores aristotélicos.

La Edad Media hereda la visión griego-aristotélica según la cual podemos dividir el cosmos en dos sectores: la región supralunar y la región sublunar. La región sublunar es material, finita e imperfecta, ocurriendo en ella la generación y la corrupción. Aquí podemos observar la presencia de cuatro elementos: tierra, fuego, aire y agua.

En esta región se dan distintos tipos de movimientos, hay cuerpos que poseen un movimiento «natural» (como las piedras cuando caen), o cuerpos que poseen un movimiento «forzado» (como los proyectiles), esta distinción dio lugar al desarrollo de una teoría de los movimientos. Los movimientos naturales dependen de la materia en que se dan, de esta manera elementos pesados como el agua y la tierra tienden naturalmente al centro de la Tierra, mientras que los elementos livianos como el aire y el fuego tienden naturalmente a ir hacia arriba, en dirección opuesta al centro del universo. Para Aristóteles todo lo que se mueve es movido por algo, por lo que no hay movimiento sin fuerza que lo genere²⁰.

Es importante notar que el esquema griego aristotélico poco a poco comienza a ser blanco de discusión respecto a su teoría de los movimientos forzados en su aplicación al movimiento de los proyectiles. El caso paradigmático consiste en explicar cómo dar cuenta del movimiento de la flecha una vez que ha cesado su contacto con el arco. Para Aristóteles esto era posible porque la cuerda del arco no solo imprimía movimiento a la flecha sino también al aire circundante, además el aire tenía capacidad de engendrar nuevos movimientos.

Juan Filopón (siglo VI d.C.) plantea que el aire más que causar los movimientos forzados parece ser un factor de resistencia a los mismos. Filopón expone que los movimientos forzados son provocados por un motor interno al móvil en lugar de externo tal como entendía Aristóteles. Es decir la mano que impulsa la flecha le imprime a la misma una fuerza motriz que permanece en ellos y que decrece en el transcurso del movimiento hasta que se anula en el punto en el que cesa. Buridán en el siglo XIV retoma las críticas de Filopón así como las realizadas por Averroes, Avicena y Avempace, desarrollando la teoría del ímpetu (Coffa, 1969).

Para él el aire no puede ser el responsable del movimiento forzado, porque si esto fuera así entonces al cubrir un disco que gira sobre su eje este debería detenerse por estar aislado del aire, sin embargo no es así. Si el disco continua moviendo se debe, plantea Buridán, a que el motor le ha impreso al móvil un ímpetu que se conserva salvo que actúen fuerzas que tiendan a reducirlo.

Mediante esta hipótesis pueden explicarse tanto los movimientos forzados de la región sublunar como el movimiento natural supralunar, porque la rotación de las esferas celestes se puede atribuir a un impulso original otorgado por Dios, que tiene la capacidad de conservarse debido a la ausencia de resistencias en las regiones etéreas. Para Buridán el ímpetu es proporcional a la masa y a la velocidad del móvil. Es decir la masa de un cuerpo se puede describir como la relación entre *ímpetus* y velocidad, la fórmula es correcta si la entendemos

20 Véase en este mismo volumen el artículo de Elena Díez de la Cortina Montemayor, «Ciencia y método en Aristóteles» (*comps.*).

como la relación entre fuerza y aceleración. Sin embargo, los teóricos del ímpetu no lograron matematizar las descripciones, tal vez a consecuencia de su visión aristotélica de la naturaleza (Zupko, 2006).

Es importante hacer notar que la influencia de la teoría del ímpetu llegó en el siglo XVI hasta la Universidad de Padua, universidad en la que se encontraba Galileo Galilei. No expondremos aquí la teoría de Galileo, solo diremos que Galileo desarrolla los fundamentos de la ciencia nueva, basándose en la teoría del ímpetu y en sus lecturas de las obras traducidas de Arquímedes. De esta manera Galileo logra oponerse a Aristóteles al plantear que lo natural en los cuerpos no es el reposo sino la persistencia en los estados de movimiento. Para él no hacen falta fuerzas ni al interior ni al exterior del móvil para explicar la constancia del movimiento. Lo que debe ser explicado es la variación de los estados de movimiento, esta preocupación le permitirá llegar al principio de inercia: lo ‘natural’ es que los cuerpos perseveran en su estado de movimiento²¹.

La región supralunar por el contrario es incorrupta y perfecta, siendo lo natural el movimiento circular. Los griegos consideraban en esta región la presencia de un quinto elemento denominado *éter*. El *éter* posee también el movimiento circular, y al igual que los objetos celestes gira espontáneamente en torno al centro de la Tierra. No hay que olvidar que propio de este esquema es sostener que la Tierra es inmóvil y que se encuentra en el centro del universo. Esta tesis se fundamenta en la experiencia cotidiana de nuestros sentidos. A pesar de la aparente perfección de la región supralunar, los griegos habían observado que la marcha de los cuerpos celestes se veía perturbada por la presencia de cinco planetas que desarrollaban un trayecto diferente.

Estos cinco planetas parecían retrasarse en su marcha, en relación a la posición que mantenía el resto del universo una vez que reaparecían cada veinticuatro horas. Además de este retraso, los griegos habían observado que llegaba cierto momento en el que los planetas reducían su marcha hasta detenerse, para reiniciar la marcha en sentido contrario. Luego se observaba desaceleración y detención para retomar la dirección original. Este movimiento de retrogradación se observaba solo en los planetas, y coincidía con el incremento de la luminosidad en el astro.

Estas observaciones provocan en los griegos la necesidad de salvar esa «aparente» falta de armonía introducida por el movimiento retrógrado. El problema consiste en cómo dar cuenta de los hechos astronómicos «rebeldes» por medio de movimientos que sean circulares y de velocidad uniforme. La solución a este problema fue dada por hombres como Eudoxio, Calipo o el mismo Aristóteles que basándose en la tesis de la inmovilidad de la Tierra, así como en la tesis de la circularidad del movimiento celeste crearon un sistema astronómico conocido con el nombre de «sistema de esferas homocéntricas».

Según este sistema la Tierra se encuentra inmóvil en el centro del universo, girando alrededor de ella esferas homocéntricas cuyo centro coincide con el de la Tierra. La esfera exterior es la mayor de ellas, y gira con velocidad angular invariable alrededor del eje del mundo, lo que es suficiente para que se dé el movimiento de las estrellas fijas adheridas a esa esfera. Para explicar los movimientos de los planetas, se recurre a varias esferas concéntricas con la Tierra, cada una de estas esferas gira con velocidad uniforme, pero cada una de ellas lo realiza alrededor de un eje distinto, con distinta velocidad angular y en muchas ocasiones en un sentido contrario al de la esfera más próxima. Atribuyéndole a estos ejes inclinaciones

21 Véase en este mismo volumen el artículo de Godfrey Guillaumin «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*)

apropiadas y a las velocidades adecuados valores numéricos, se puede reproducir de una forma bastante aproximada el movimiento irregular de los planetas en el firmamento.

Sin embargo este sistema no lograba explicar todos los fenómenos, de hecho no daba cuenta de porqué algunos cuerpos celestes se encontraban a veces más cerca de la Tierra y otras más lejos, como es el hecho de que los eclipses de sol a veces son totales y a veces anulares. En su intento de explicar este problema Ptolomeo crea un sistema para explicar el movimiento de los cuerpos celestes con algún otro mecanismo que concordara mejor con los fenómenos observados. Ese mecanismo es conocido en la historia de la ciencia como «sistema de excéntricos y epiciclos».

En el *Almagesto* Ptolomeo expone que el mecanismo de los movimientos planetarios está compuesto por círculos o esferas de dos tipos, los excéntricos (o círculos deferentes), con órbitas circulares cuyos centros no coinciden exactamente con el centro de la esfera de las estrellas fijas, como tampoco con el centro de la Tierra que permanece inmóvil en el centro del universo. Y los epiciclos que son círculos cuyos centros se desplazan sobre las órbitas excéntricas²².

El sistema ptolemaico no logró sustituir totalmente al sistema aristotélico, eso se debió en buena medida al prestigio de la física aristotélica, de todas formas hacia el 1200 la pugna entre ambos sistemas se trasladó al ámbito de la Europa cristiana, esa pugna estaba representada por los astrónomos que seguían a Ptolomeo, y por los filósofos que seguían a Aristóteles.

Tras este breve recorrido podemos concluir que llega un momento entre los siglos XV y XVI en que este proceso de cuestionamiento genera que los pilares de la física clásica, la astronomía y la teoría general de los movimientos, sean reemplazados por concepciones incompatibles con las de Aristóteles. Esto ocurre de la mano de Galileo Galilei en el terreno de la física (mecánica), y de Nicolás Copérnico junto más tarde a los desarrollos realizados Johannes Kepler en el dominio de la astronomía, cuyos aportes serán conciliados por Isaac Newton en un nuevo sistema.

Poco a poco comienza a desarrollarse en Europa una nueva actitud mental decidida a discutir a los teólogos y a los filósofos su injerencia a la hora de discutir, de explicar, de describir fenómenos naturales. Ya no será suficiente que se construyan teorías para salvar los fenómenos, es decir teorías que supongan una construcción correcta de los aspectos observables del mundo, porque como señala Coffa «La ciencia comienza a reclamar derechos gnoseológicos. Al astrónomo no le bastará con ‘salvar los fenómenos’, predecir la marcha aparente de trazas luminosas en el cielo: ahora querrá decir también si la Tierra, en realidad se mueve.» (Coffa, 1969: 6).

Resumiendo podemos decir que los astrónomos del siglo XVI heredan dos tradiciones diferentes, las cuales resultan ser: un conjunto de técnicas de cálculo que no habían cambiado desde Ptolomeo, y un cuadro cosmológico general que consiste en el andamiaje entre la física de Aristóteles y los epiciclos de Ptolomeo. Es en este contexto que se enmarca la obra de Nicolás Copérnico.

II. Breve Reseña biográfica

Nicolás Copérnico nace en Torun en 1473 en el seno de una familia burguesa, clase social que desempeñaba un papel muy importante en la vida política y económica de la época.

²² Véase en este mismo volumen el artículo de Cristián C. Carman, «La teoría planetaria de Claudio Ptolomeo» (*comps.*).

La primera infancia de Copérnico parece haber transcurrido en la casa familiar, ubicada primero en la calle Santa Ana (hoy llamada Copérnico) desde 1480 junto a la Plaza Mayor de la Ciudad Vieja²³.

Se considera que sus primeras enseñanzas las recibió en la escuela municipal adyacente a la catedral de San Juan. Esta escuela poseía cierto reconocimiento en la enseñanza de la astronomía, además había sido dirigida durante varios años por Lucas Watzenrode (1447-1512), tío de Copérnico. Después de estudiar en Cracovia, Colonia y Bolonia, Watzenrode supo ocupar numerosos cargos eclesiásticos y fue desde 1489 obispo de Warmia. Fue uno de los políticos más brillantes de la época, y tras la muerte del padre de Copérnico (1483) influyó notablemente sobre la vida de su sobrino.

Luego Copérnico prosiguió sus estudios probablemente en la escuela de los Hermanos de la Vida en Común, en Chelмно. Hacia el año 1491, Copérnico comienza a estudiar en la Universidad de Cracovia tal vez siguiendo los pasos de su tío. Allí permaneció cuatro años, y estudió en la facultad de artes liberadas (*artium*) sin obtener ningún título académico. El programa de la facultad de artes liberadas incluía una sólida formación en matemática. Copérnico pudo asistir a clases de astronomía sobre los *Sphaera* de Juan Sacrobosco (elementos de cosmografía) y sobre *Theoricae novae planetarium* de Peurbach, así como a los cursos preparatorios para la aplicación de las tablas astronómicas, por ejemplo de la versión cracoviana de las *Tabulae resolutae*, las tablas de eclipses de Peurbach, las efemérides de Regiomontano, etcétera. Junto con las clases de astronomía se dictaba un curso astrológico, siguiendo el *Quadripartium* de Ptolomeo, y el tratado astrológico de Alí Aben Rabel (Yañez, 2003).

Es importante resaltar que las *Theoricae novae* realizaban una descripción simplificada de los mecanismos orbitales, no estando presente el complicado aparato matemático propio de la teoría ptolemaica, y haciendo omisión de los métodos que llevaban de la observación a la generalización geométrica. Además las clases sobre las tablas astronómicas proporcionaban recetas de cálculo para satisfacer necesidades de corte astrológico, pero sin referir a las teorías contenidas en tales tablas (Dobrzycky, 1973).

De todos modos la formación científica de Copérnico se nutrió de la adquisición de conocimientos matemáticos junto con el descubrimiento de las contradicciones existentes en la teoría astronómica enseñada. Esto en parte fue posible por el clima científico que reinaba en la Academia de Cracovia, este lugar era famoso por el nivel de las matemáticas. Allí Copérnico tuvo la oportunidad de conocer los problemas de la astronomía geocéntrica.

En 1495 Copérnico deja Cracovia para dirigirse a Frombork, donde es nombrado canónigo del capítulo de Warmia, con residencia junto a la catedral de Frombork. Una vez allí, en 1496 marchó hacia Bolonia a estudiar Derecho en la célebre escuela de juristas de la Universidad de Bolonia. En 1497 observó la ocultación de Aldebarán por la Luna, entrando al servicio del astrónomo Domenico Maria de Novara (1464-1514), no «... como discípulo sino como ayudante y testigo de sus observaciones.» (en Vernet, 2000: 35). Novara explicó a Copérnico que había comprobado la disminución de la oblicuidad de la eclíptica y que creía haber descubierto un aumento sistemático de las latitudes desde la época de Ptolomeo.

La observación de la ocultación de Aldebarán por la Luna resultaba importante para verificar la teoría de Ptolomeo sobre el movimiento de la misma, dicha teoría contenía un error esencial respecto a los cambios de distancia entre la Luna y la Tierra. Poder dar cuenta de

23 Todos los datos extraídos de Dobrzycky (1973) y Birkenmajer (1973), salvo indicación contraria.

un error presente en la teoría ptolemaica no era suficiente para derribar el sistema geocéntrico, pero probaba que es posible cuestionar las afirmaciones de autoridades reconocidas basándose en los resultados de observaciones realizadas.

Hacia el 1500 realizó una corta estadía en Roma, relacionada con un periodo de práctica legal en la Curia. Parece ser que allí dio una serie de conferencias sobre astronomía, y a las que asistió Miguel Ángel, y observó el eclipse de Luna del 6 de noviembre de 1500. Copérnico regresa a Polonia para solicitar permiso al capítulo para continuar estudiando en Padua en su escuela de Medicina. Dos años de estudios le prepararon para ejercer tal profesión hasta el último día de su vida. En Padua Copérnico toma contacto con la filosofía y la filología humanista, conoce la lengua griega y profundiza sus conocimientos de literatura clásica.

Es en esta época que se puede situar la fase constructiva de la revolución copernicana, en su *Commentariolus* expone que fue en su estancia en Italia donde se le ocurrió la idea de desarrollar las doctrinas heliocéntricas de la antigüedad provistas de un soporte matemático. Se propone la búsqueda de soluciones geométricas que al ser aplicadas a la astronomía cumplieren con los postulados de homogeneidad y armonía del Cosmos, librando a la astronomía de incoherencias como la del ecuante.

Regresa a Polonia a hacerse cargo de su diócesis, sin ser sacerdote ni religioso sino tan sólo humanista. Lleva a cabo tareas propias de su cargo y de sus títulos. Fue secretario y médico de su tío Lucas y vivió con él en el palacio episcopal de Lidzbark hasta la muerte del mismo (1512), además fue administrador de los bienes del capítulo y delegado de éste en el gobierno de la diócesis de Warmia (1516-1521) que rigió desde Olsztyn.

Solicitó auxilios a Segismundo I (rey de Polonia, 1506-1548) y logró poner a la ciudad en condiciones de defensa (1520) ante un posible ataque de los caballeros teutónicos y se preocupó de mejorar las condiciones económicas de sus vasallos, ya que la Orden Teutónica había realizado emisiones de moneda de baja ley.

Su permanencia en Lidzbark se relaciona con un acontecimiento importante para la historia de la ciencia, allí preparó un pequeño tratado denominado *Fundamentos de la Astronomía* donde se expone por primera vez la teoría heliocéntrica. Jerzy Dobrzycky (1973) plantea que no podemos estar seguros ni de las circunstancias ni de la fecha en que la obra surge, así como tampoco podemos estar seguros de su título original. Las copias de fechas posteriores que se han conservado tienen un título dudoso *Nicolai copernici de hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus*. Se ha podido establecer con aproximación la época en que apareció gracias a los estudios de Birkenmajer (1973). Por lo que Birkenmajer establece que el *Commentariolus* fue redactado aproximadamente hacia 1507, este tratado circuló en forma manuscrita entre algunos de sus allegados en Cracovia, pero no estaba destinado a la imprenta.

Al comienzo del *Commentariolus* hay una referencia al principio fundamental del movimiento absoluto (movimiento uniforme) y una crítica a los sistemas astronómicos que dominaban hasta el momento.

Para desarrollar las hipótesis expuestas en el *Commentariolus* Copérnico necesitaba de un observatorio, por lo que el 31 de marzo de 1513 compró al capítulo ochocientas piedras y un barril de cal para levantar una pequeña torre en la que instalar sus instrumentos. Sus observaciones fueron creciendo en número, su obra cumbre *De Revolutionibus orbium coelestium* comenzó a ser escrita hacia el 1520, y hacia el año 1530-1531 culminada. En las

observaciones que realizaba el método que empleaba no se diferenciaba demasiado de los utilizados comúnmente en la época, y empleaba instrumentos tradicionales.

En el *Revolutionibus* describe tres de los instrumentos utilizados, para medir las declinaciones utilizaba el cuadrante solar y el instrumento paraláctico, este último sobre todo en las observaciones lunares. Mediante la esfera armilar establecía las coordenadas angulares de la Luna y el Sol como de otros cuerpos celestes de forma directa. Copérnico inventó la Tabla solar (1517) durante su estadía en el castillo de Olsztyn, la luz solar reflejada por un espejo horizontal caía sobre la pared del claustro, de manera tal que las líneas trazadas sobre la pared permitían precisar la posición del Sol con respecto al ecuador celeste, y determinar el período que mediaba entre la fecha de la observación y el equinoccio.

Las observaciones realizadas parecen responder a un programa previamente establecido así como a necesidades de orden teórico. Entre 1515 y 1516 realiza una serie de observaciones del Sol que debían precisar la teoría del movimiento aparente del mismo, sin embargo le permiten verificar la variación de la excentricidad de la órbita terrestre, y el desplazamiento de las líneas de los ápsides. Estas observaciones le permitieron darse cuenta que las tesis geométricas del *Commentariolus* necesitaban ser corregidas. Esto se puede ver por ejemplo en la modificación que introduce en el *De Revolutionibus* respecto a la órbita terrestre, donde el movimiento de la Tierra fue presentado a través de círculos excéntricos y no por medio de un círculo concéntrico con epiciclos.

Se estima que *De Revolutionibus* fue terminada hacia el 1531 porque en ella no son utilizadas las observaciones que consta que Copérnico realizó a partir de 1532. Por lo que se especula que a partir de ese momento Copérnico realizó retoques a la teoría y procuró averiguar como sería acogida la misma en el caso que se decidiera a publicarla.

Copérnico era reticente a la publicación de la misma porque temía las críticas incompetentes: «el miedo a la burla, que cabía esperar debido a la novedad difícilmente comprensible de mi obra, me inclinó casi enteramente a abandonar los propósitos que había tenido con respecto a la presente obra.» (en Dobrzycky 1973: 45).

En 1535 tras la visita de Bernard Wapowski en Frombork, accede a publicar el almanaque que contenía la posición de los cuerpos celestes para un determinado periodo calculadas sobre la base de las tablas de *De Revolutionibus*. Sin embargo este proyecto no se llevó a cabo por la muerte del promotor del mismo, y el manuscrito con los cálculos de Copérnico se perdió.

En 1539 llega a Frombork el joven profesor Georg Joachim de Porris, más conocido como Rethicus. Era matemático y astrónomo, y llegó a Frombork con el propósito de conocer a Copérnico de cuyas teorías había escuchado hablar en Wittemberg. Rápidamente se convirtió en discípulo de Copérnico, permaneciendo a su lado algunos meses, tiempo que empleó para estudiar parcialmente al *De Revolutionibus* y para hacer un resumen en la *De Libris revolutionum nicolai Copernici narratio prima* (conocido como *Narratio prima*) que envió a su maestro Johannes Schöner, editado en 1540 en Gdansk.

Rethicus abandona Frombork en el año 1541, pero el manuscrito de *De Revolutionibus* no estaba pronto, las correcciones y enmiendas introducidas por el propio Rethicus permiten inferir que éste debía llevar a cabo la corrección final del manuscrito antes de publicarlo.

La publicación de la obra de Copérnico se vio demorada por diferentes razones, por un lado Melanchton había rechazado la teoría de Copérnico por oponerse a las Sagradas Escrituras, además también confluó con la publicación de la obra las propias obligaciones que Rethicus poseía como decano. De todas formas Rethicus publicó una Trigonometría

de Copérnico que no era susceptible de causar controversias, esta trigonometría constituía la parte final del primer libro.

Rethicus viaja a Nuremberg en la primavera de 1542, y en el taller de Petreius se comienza a imprimir de *De Revolutionibus*. El manuscrito que le deja Rethicus a Petreius poseía errores numéricos, pero el problema más grave consiste en que Rethicus al abandonar Nuremberg después de dos meses deja la publicación en manos de Andreas Osiander.

Osiander mantenía correspondencia tanto con Rethicus como con Copérnico desde 1540, y le sugiere a Copérnico que para aplacar la oposición que ante el escrito los peripatéticos y los teólogos pudieran desarrollar, presentase la teoría como una hipótesis formal, y no como una descripción real del mundo. Ante esto Copérnico se negó aludiendo a la Epístola Dedicatoria que escribió en junio de 1542 y que fue enviada al editor.

Sin embargo Osiander introdujo cambios en la obra, agregó en primer lugar un prefacio anónimo «Al lector sobre las hipótesis de esta obra», marcando claramente el terreno respecto al valor con las que debe considerarse estas ideas agrega:

Y no es necesario que estas hipótesis sean verdaderas, ni siquiera que sean verosímiles, sino que bastan con que muestren un cálculo coincidente con las observaciones [...] Está suficientemente claro que esta ciencia no conoce completa y absolutamente las causas de los movimientos aparentes desiguales [...] Y no espere nadie, en lo que respecta a las hipótesis, algo cierto de la astronomía, pues no puede proporcionarlo; para que no salga de esta disciplina más estúpido de lo que entró, si toma como verdad lo imaginado para otro uso (Copérnico, 1994: 3-4).

Osiander también modificó el título del libro, que se amplió en el impreso, quedando convertido en *De Revolutionibus orbium coelestium*, eliminó la introducción de Copérnico al libro primero donde elogia a las ciencias astronómicas. El libro terminó de imprimirse en marzo de 1543 poco antes de la muerte de Copérnico que ya contaba con 70 años.

Copérnico fallece el 24 de mayo de 1543 en Frombork, siendo enterrado en la catedral de Frombork, aunque se ignora en que lugar exacto reposa, puesto que poco antes de la Segunda Guerra Mundial (1939), se exhumó lo que se creía que eran sus restos para realizar un estudio antropométrico de los mismos, pero se extraviaron durante el conflicto.

III. Revolución Copernicana

La Revolución copernicana o científica como le denominamos comienza como hemos dicho anteriormente con la publicación en el año 1543 del *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Esta obra inaugura cambios dentro del pensamiento astronómico y cosmológico. Para Kuhn (1996) es revolucionaria porque de ella se deriva un enfoque fundamentalmente nuevo de la astronomía planetaria, donde se da la primera solución simple y precisa al problema de los planetas e inaugura una nueva cosmología al adicionar nuevos elementos al modelo propuesto.

Es importante destacar que en esta obra no aparecen aquellos elementos que se suelen asociar a la revolución copernicana, es decir no aparecen en ella los cálculos fáciles y precisos de las posiciones planetarias, la desaparición de los epiciclos y de las excéntricas, la desaparición de las esferas, como tampoco aparece la idea de un universo infinito o la del Sol semejante a las estrellas. Salvo en lo que se refiere al movimiento terrestre, que es el aporte desarrollado en el *De Revolutionibus*, el resto es desarrollado por los astrónomos posteriores a Copérnico a partir de su obra. Por eso *De Revolutionibus* es una obra que se encuentra anclada a las obras de astrónomos y cosmólogos de la antigüedad y de la Edad Media, pero

a su vez en ella pueden encontrarse algunas novedades que son las que permiten romper con la tradición antigua; y por consiguiente desarrollar una revolución.

Como afirma Kuhn, *De Revolutionibus* es un texto provocador, generador de revolución más que revolucionario en sí mismo; ya que la importancia del mismo radica «... menos en lo que dice por sí mismo que en lo que ha hecho decir a otros.» (Kuhn, 1996:186). Copérnico escribe *De Revolutionibus* lo teniendo en cuenta el *Almagesto* de Claudio Ptolomeo, no obstante Toulmin y Goodfield (1963) consideran que Copérnico ataca la teoría de Ptolomeo no necesariamente porque éste ubicara a la Tierra en el centro del universo sino básicamente por razones teóricas. Para Copérnico los principios en los que se basa Ptolomeo son inaceptables, y se propone reemplazarlos por otros más razonables. Su crítica principal consiste en que las teorías anteriores a él son asistemáticas y contradictorias; y violan el *principio de regularidad*. La falta de sistematicidad y la presencia de contradicción son resultado de que dichas teorías consisten en una mezcla de construcciones inconexas e incoherentes desde el punto de vista matemático; mientras que su planteo sí goza de sistematicidad.

La regularidad se encuentra violada, a través de los métodos geométricos empleados los cuales se oponen a los principales principios desarrollados por la física. Si bien Ptolomeo rinde homenaje verbal al movimiento uniforme propuesto por Aristóteles como movimiento ideal, introduce ciertas irregularidades a través de los ecuantos, que no explica. El ecuante es el punto en torno al cual se mueve el planeta en su trayectoria, aparentemente. Para explicar la irregularidad del movimiento de los planetas, Ptolomeo afirmaba que si desde la Tierra la velocidad planetaria no parece ser regular, sí lo era desde el punto ecuante. En el *Commentariolus* Copérnico establece que

Nuestros antepasados supusieron la existencia de gran número de esferas celestes por una razón especial: explicar el movimiento aparente de los planetas por el principio de regularidad. Ya que pensaban que es enteramente absurdo que un cuerpo celeste no deba moverse siempre a una velocidad uniforme en un círculo perfecto. (en Koestler, 1986)

Lo que Copérnico observa en la teoría ptolemaica es que un planeta se mueve en círculos perfectos pero no a velocidad uniforme, dicho de otra forma el planeta no recorre distancias iguales en tiempos iguales al ser observado desde el centro de su círculo; sólo parece hacerlo cuando se lo observa desde el punto denominado ecuante. El ecuante es el ardid que introduce Ptolomeo para proteger el principio del movimiento uniforme. Ante esto Copérnico plantea:

Visto lo cual comencé a preguntarme si no sería posible idear un sistema de círculos más acertado, en el cual fuese posible explicar cualquier irregularidad aparente del movimiento con el uso de los solos movimientos uniformes, como lo exige el principio fundamental del movimiento absoluto (en Koestler, 1986).

La motivación de Copérnico consiste en extirparle al sistema ptolemaico aquellas imperfecciones o rasgos que no encajaban con los conservadores principios aristotélicos, los ecuantos no eran un problema tan terrible, pero eran un síntoma de la artificialidad del sistema ptolemaico²⁴.

El sistema copernicano es coherente y está exento de contradicciones, además está libre de las violaciones del principio de regularidad que originan el uso de ecuantos, los

24 Rethicus en *Narratio Prima* plantea lo siguiente: «Veréis que aquí, en el caso de la Luna, nos liberamos de un ecuante con la adopción de esta teoría... Mi maestro suprime también los ecuantos de los otros planetas... Mi maestro vio que tan solo en su teoría podía conseguirse que evolucionaran satisfactoriamente, de modo uniforme y regular sobre sus propios centros y no sobre otros centros, todos los círculos del universo, propiedad esencial del movimiento circular... el movimiento circular no uniforme en torno a un centro es una relación que la naturaleza aborrece.» (en Koestler, 1986: 135, 137, 166).

movimientos del Sol, la Luna y los planetas forman un sistema genuino, cuyos movimientos son circulares y uniformes.

Copérnico se ve en la tarea de tener que reordenar el Cosmos, la pregunta que surge es cómo. Para ello comienza a leer a todos aquellos filósofos que pudo conseguir con el fin de encontrar si había alguno que defendiera otros movimientos de los cuerpos celestes además de los ya supuestos por los matemáticos. Así descubre en Cicerón, que Hicetas había apoyado la creencia de que la Tierra se mueve, y añade:

Algunos piensan que la tierra permanece quieta, en cambio Filolao el pitagórico dice que se mueve en un círculo oblicuo alrededor del fuego, de la misma manera que el Sol y la Luna. Heráclides el del Ponto y Ecfanto el pitagórico piensan que la Tierra se mueve pero no con traslación, sino como una rueda, alrededor de su propio centro, desde el ocaso al orto (Copérnico, 1994: 10).

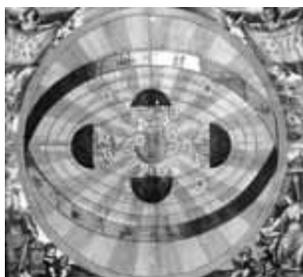


Figura 1. *Scenographia Systematis Copernicani*, 1660.
Autor desconocido. *Wikimedia Commons*.

Lo anterior nos permite plantear que Copérnico rechaza el dogma defendido por los aristotélicos y por Ptolomeo de la inmovilidad de la Tierra, de esta forma desplaza a la Tierra del centro del cosmos para colocar en ese lugar al Sol. No sólo coloca al Sol en el centro sino que además ordena a la Tierra y a los demás planetas girar alrededor de él.

Sin embargo Copérnico no fue el primero en sugerir el movimiento de la Tierra, de hecho en el prefacio menciona a todos aquellos sabios de la antigüedad que habían defendido o postulado la movilidad de la Tierra. En manuscritos más antiguos había referido a Aristarco de Samos, quien planteaba un sistema cuyo centro era el sol.

Si bien Copérnico no menciona de forma explícita los trabajos de sus predecesores más inmediatos (a saber Nicolás de Oresme, o Nicolás de Cusa) que creyeron que la Tierra estaba o podía estar en movimiento, es lícito suponer que tuvo conocimiento de los mismos.

Sin embargo, aunque Copérnico sugiere el movimiento de la Tierra, esto no es suficiente para que abandonara «el axioma de Platón», aquel principio fundamental según el cual toda la cinemática del cosmos se reduce a movimientos uniformes de trayectoria circular²⁵. De todas formas en el sistema de Copérnico el mecanismo de los movimientos es más simple y claro, lo cual se debe a la desaparición de los ecuanes y con ellos esos movimientos aparentemente uniformes, aunque no prescindió de la aplicación de los círculos deferentes y de los epiciclos.

Kuhn (1996) plantea que Copérnico fue el primero —si no tenemos en cuenta a Aristarco—, en formular que el movimiento de la Tierra podía resolver un problema astronómico existente, es decir un problema estrictamente científico; esto se debe a que Copérnico

25 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno, «Astronomía y Física en Platón» (*comps.*).

es el primero en exponer las consecuencias astronómicas que se derivan del movimiento de la Tierra. Lo que distingue a Copérnico de sus antecesores la matematización que acompaña a sus hipótesis, siendo esta matematización lo que para Kuhn inaugura una revolución.

IV. Hipótesis fundamentales de la teoría copernicana

IV.a. El *Commentariolus*

Como hemos dicho anteriormente es difícil establecer con precisión la fecha hacia la cual se escribió el *Commentariolus*, obra que se considera como uno de los documentos más importantes en la Historia de la ciencia, y que ha pasado a la historia como un resumen de *De Revolutionibus*. Se data la escritura del *Commentariolus* hacia el 1507 y no hacia el 1533 o 1539 como han hecho la mayoría de los biógrafos (Dobrzycky, 1973: 38). La importancia de esta datación consiste en que Copérnico elabora un sistema heliocéntrico en el *Commentariolus* diferente al que aparece en su obra definitiva, el *De Revolutionibus*.

El *Commentariolus* empieza con una breve exposición histórica donde Copérnico muestra como filósofos o pensadores antepasados utilizaron un gran número de esferas celestes para salvar el movimiento aparente, atendiendo al principio de regularidad. Para ellos es absurdo pensar que los cuerpos celestes que son esferas perfectas no tengan un movimiento uniforme. Por ejemplo Eudoxio (390-337 aC) usa esferas concéntricas para explicar todos los movimientos de los planetas, con lo cual intenta esclarecer no sólo los movimientos aparentes sino que también el hecho de que en ocasiones veamos los cuerpos más altos o más bajos en los cielos. Esto se presenta como incompatible con el principio de concetricidad, por lo cual se emplean epiciclos y excéntricos.

En el sistema de Eudoxio se basa Aristóteles. En el sistema geocéntrico, tanto la Luna como el Sol daban vueltas alrededor de la Tierra describiendo círculos con movimiento uniforme. La Luna describe un círculo pequeño mientras que el Sol uno más grande. El círculo descrito por el Sol tiene un radio mayor en relación a la Luna, debido principalmente a que al observar los eclipses de Sol, la Luna se encuentra siempre delante del disco solar. Además la Luna cumple su revolución alrededor de la Tierra en un mes, mientras que el Sol lo realiza en un año. Para los antiguos el período de revolución de un astro es mayor, cuanto más lejos se encuentra de nosotros.

Sin embargo el movimiento de las estrellas fijas era una excepción al principio anteriormente establecido. Las estrellas fijas se encontraban ubicadas en una sola esfera, la mayor de todas, cuya revolución se completaba cada veinticuatro horas. Los antiguos al creer que la Tierra se encontraba inmóvil atribuían el movimiento a la esfera de las estrellas fijas así como al resto de los cuerpos celestes. Para Aristóteles eso era posible porque el éter que es un fluido invisible llena que todo el universo, transmitiendo su movimiento a todos los astros. La esfera de las estrellas fijas, lograba arrastrar con ella a todo el cosmos, de esta manera los planetas giraban conjuntamente con el cielo.

A su vez Ptolomeo si bien sus cálculos parecen correctos, incurren en ciertas dificultades; las cuales tienen que ver con que los planetas no se movían con velocidad uniforme ni con respecto al deferente ni con respecto al centro de su epiciclo. Mientras Eudoxio o Aristóteles habían utilizado esferas para dar cuenta del movimiento de los astros, en Ptolomeo encontramos «ruedas o norias». No olvidemos que el modelo de Ptolomeo pretende resolver por un lado el problema de la retrogradación de los planetas y el aumento

del brillo asociado a la retrogradación; por otro lado la distinta duración de las revoluciones siderales.

Para Ptolomeo el planeta no describe un círculo en el espacio sino que describe una curva producida por una combinación de movimientos circulares. El planeta visto desde la Tierra que constituye el centro de la rueda, se mueve en el sentido de las agujas de reloj hasta alcanzar un punto estacionario S_1 , luego retrocede en sentido contrario a las agujas, hasta otro punto estacionario S_2 , para volver a avanzar hasta otro punto S_3 , y así sucesivamente. El borde de la rueda se llama deferente, y el círculo descrito se llama epiciclo.

En otras palabras el planeta P se encuentra sobre un círculo, el epiciclo, y gira con movimiento uniforme alrededor del centro, que se halla a su vez dispuesto en una segunda circunferencia a la cual se denomina deferente, el cual es recorrido también en movimiento uniforme. El centro del deferente coincide con la Tierra. La combinación de estos dos movimientos circulares y uniformes va a servir para calcular la trayectoria del planeta a través de la eclíptica. Pero además Ptolomeo introduce el ecuante, según el cual la velocidad angular del centro del epiciclo, en su movimiento por el deferente es uniforme con respecto a un punto de ecuación (ecuante) que no coincidía con el centro del deferente ni con el centro de la Tierra, desde el ecuante (B) se podía observar al planeta desplazarse por el epiciclo (A) con velocidad constante sobre el círculo deferente (C) (ver figura 2).

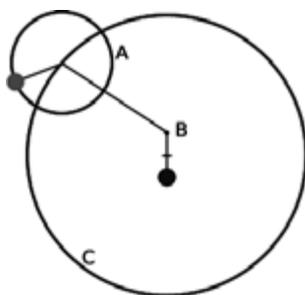


Figura 2. *Wikimedia Commons*.

Como hemos dicho estas son las razones que hacen que Copérnico considere que estos sistemas no satisfacen la razón, en el sentido que violan la regularidad y la sistematicidad antes desarrollada en la sección Revolución Copernicana. Esto es lo que lo impulsa a creer que puede encontrar una composición de círculos más razonable, con la que pueda justificar la aparente desigualdad y salvar el movimiento uniforme.

En el *Commentariolus* Copérnico expone la teoría heliocéntrica, la cual va precedida de siete postulados o axiomas que son los siguientes (en Coffa, 1969: 31-32):

1. No hay ningún centro único de todos los círculos o esferas celestes.
2. El centro de la Tierra no es el centro del universo sino el centro de la gravedad (entendiendo por gravedad peso y no «fuerza gravitacional»).
3. Todas las esferas rotan alrededor del Sol, que está en el punto medio; por consiguiente el Sol es el centro del universo.
4. La distancia de la Tierra al Sol es imperceptible... cuando se la compara con la altura del firmamento (de las estrellas fijas).
5. Todo movimiento aparente del firmamento es resultado, no del movimiento del firmamento mismo, sino del movimiento de la Tierra. Ésta, junto con los elementos

materiales que se encuentran cerca de ella, cumple una rotación completa alrededor de su eje cada día, mientras que el firmamento y los cielos superiores permanecen inmóviles.

6. Lo que se nos aparece como el movimiento (anual) del Sol es el resultado, no del movimiento de este, sino del movimiento (lineal) de la Tierra y su esfera, por el cual viajamos alrededor del Sol al igual que cualquier otro planeta. Por consiguiente la Tierra tiene más de un movimiento.
7. Las retrogradaciones y (las reanudaciones de) los movimientos directos aparentes de los planetas son el resultado, no de su propio movimiento, sino del de la Tierra. El movimiento de la Tierra por sí solo, por lo tanto basta para explicar muchas anomalías aparentes en los cielos.

En el primer capítulo enumera el orden de las estrellas celestes, entendiendo que la más alta corresponde a la esfera de las estrellas fijas, que contiene y proporciona la posición a todas las demás. A la esfera de las estrellas fijas le siguen Saturno, Júpiter, Marte y la esfera en que se encuentra la Tierra, Venus y Mercurio. Alrededor de la Tierra encontramos la esfera de la Luna, quien se mueve alrededor del centro de la Tierra como un epiciclo. En el mismo orden superan unos planetas a otros en la velocidad de la revolución, según que su órbita sea mayor o menor.

Los postulados anteriormente presentados parecen poseer un orden arbitrario, sin embargo se los puede explicar fácilmente en relación con las correspondientes afirmaciones que preceden a la exposición astronómica de Ptolomeo en el *Almagesto*, tal como Peuerbach en el *Epitome in Almagestum* le confirió. En el *Epitome* de Peuerbach, este dice conjuntamente con Ptolomeo «la Tierra en relación al firmamento es como un punto.» (en Dobrzycky, 1973: 40), Copérnico trasladó esta tesis ptolemaica a la órbita terrestre en el cuarto postulado, donde plantea las enormes dimensiones de la esfera de las estrellas fijas, incomparablemente mayores que la distancia Tierra-Sol.

La afirmación respecto a que la distancia de la Tierra al Sol es imperceptible pretende ser una respuesta a aquellos que alegan ausencia de paralaje estelar. En la sección correspondiente a las objeciones a la teoría copernicana desarrollaremos más en profundidad el problema de la paralaje, de todas formas es importante explicar de qué se trata. Con el nombre de paralaje²⁶ se conoce al desplazamiento aparente de una estrella cercana sobre el fondo de otras estrellas más lejanas, a medida que la Tierra se mueve a lo largo de su órbita alrededor del Sol. Dicho de otra forma la paralaje corresponde al ángulo formado por la dirección de dos visuales relativas a la observación de un mismo objeto desde dos puntos distintos, suficientemente alejados entre sí y no alineados con él. Estas observaciones se realizan con una diferencia de seis meses cuando la Tierra se encuentra en los dos extremos opuestos de su órbita. Si la hipótesis de Copérnico es correcta y la Tierra se encuentra en movimiento debería poder observarse la paralaje.

Como podemos visualizar Copérnico no cree que haya un centro absoluto, único del universo; si bien el Sol es el centro del universo no es el centro de todos los planetas. Con este postulado Copérnico se está oponiendo explícitamente a Ptolomeo, quien en el *Almagesto* plantea que la Tierra se encuentra en el centro del firmamento.

Pongamos por caso la Luna, cuyo centro es la Tierra. Esta dualidad de centros del sistema planetario es considerada por algunos, como una de las objeciones al sistema copernicano,

26 <<http://www.astromia.com/glosario/paralaje.htm>>

junto con el problema de la paralaje anual de las estrellas fijas, el movimiento de rotación y traslación de la Tierra, y las fases de Venus. Esto sin mencionar las objeciones desde el punto de vista teológico que recibió. Estas objeciones serán desarrolladas en otra sección.

Es por esta razón que resultan tan importante las observaciones llevadas a cabo por Galileo Galilei (1564-1642) en el año 1610 de los «planetas mediceos» o satélites de Júpiter: «Pues ahora no solamente tenemos un planeta que gira alrededor de otro, a la par que ambos recorren una vasta órbita alrededor del Sol, sino que nuestra vista nos muestra cuatro satélites que giran alrededor de Júpiter, al igual que la Luna alrededor de la Tierra, mientras todo el sistema viaja a través de una enorme órbita alrededor del Sol en el lapso de doce años.» (Galilei, 1984) Decimos que estas observaciones realizadas a partir del telescopio son sumamente importantes porque hacen imposible seguir sosteniendo que todos los cuerpos deben girar alrededor de un centro único.

Este segundo postulado, además salva la distinción aristotélica entre mundo sublunar y supralunar, puesto que la Tierra sigue siendo el lugar natural al que tienden los cuerpos pesados (agua, tierra), ya que para Aristóteles grave debe entenderse como pesado.

Para aquellos que creen que la afirmación del movimiento de la Tierra está tomada de los pitagóricos, él promete exponer pruebas rigurosas; a la vez que les recuerda a los filósofos de la naturaleza que la argumentación de la inmovilidad de la Tierra está sustentada en las apariencias. Desde el punto de vista copernicano la Tierra no sólo rota sino que además describe una órbita alrededor del sol (es decir se traslada) (desarrollado en el capítulo tres «De los movimientos aparentes del Sol». Plantea que la órbita de la Tierra es una circunferencia excéntrica al Sol, aunque tanto la dirección de las líneas de las ápsides (por ápside se conoce a los puntos extremos de la órbita de un cuerpo celeste en su movimiento alrededor de otro, en el caso de la órbita terrestre hoy en día a esos puntos le llamamos: Perigeo y Apogeo)²⁷ como la excentricidad de la órbita, son constantes para Copérnico.

El primer movimiento que la Tierra realiza es el movimiento uniforme de la Tierra sobre su órbita circular alrededor del Sol, el segundo movimiento que la Tierra realiza es el de rotación, el cual justifica mediante las siguientes ideas «en los polos en el orden de los signos, es decir, de oeste a este. En virtud de esta rotación, el Universo entero parece girar con velocidad enorme. De este modo gira la Tierra junto con las aguas y la atmósfera que la rodean.» (*Commentariolus*, en Coffa, 1969: 99).

Respecto al de traslación considera que el hecho de que los astros errantes se perciban más cercanos o alejados de la Tierra prueba que el centro de la Tierra no es necesariamente el centro de tales círculos. Para esto Copérnico se apoya en Filolao el pitagórico quien creía en el movimiento de traslación (Copérnico, 1994:110).

Copérnico postula un tercer movimiento «Pues el eje de la rotación diaria no es paralelo al eje del círculo mayor, sino que se haya inclinado respecto de él con un ángulo que, en nuestro tiempo, intercepta una porción de circunferencia de aproximadamente $23 \frac{1}{2}^{\circ}$.» (*Commentariolus*, en Coffa, 1969: 100), para poder explicar la precesión de los equinoccios de una forma más económica, dicho movimiento consistiría en la declinación o desviación del eje de la Tierra, como si este eje se viera amenazado por la traslación. Este movimiento explicaba el hecho de que el eje terrestre, cuya inclinación es de unos 66° con respecto al plano de la órbita, mantiene su dirección en el espacio mientras en planeta se mueve alrededor del Sol.

27 <<http://www.astromia.com/glosario/apsides.htm>>

Como expresa el postulado séptimo expuesto por Copérnico, muchas de las irregularidades que se le atribuyen a los planetas no son más que ilusiones ópticas. Es por esto que las retrogradaciones del movimiento de los planetas no son más que aparentes y no movimientos verdaderos sino que se deben a la traslación de la Tierra alrededor del Sol. Por lo que al no ser la Tierra el centro del universo sino el Sol, alrededor del cual gira en un movimiento anual, se explica con facilidad: 1. los movimientos aparentes de avance y retrogradación de los planetas, 2. las distancias variantes de los planetas a la Tierra, y 3. explica también la conversión de Mercurio y Venus de estrellas vespertinas en matutinas, los ortos (salida o aparición de un astro por el horizonte) y los ocasos del Sol y de las estrellas fijas.

Por consiguiente el movimiento irregular del Sol y de los planetas se explica admitiendo que el Sol no ocupa exactamente el centro del Universo, aunque está próximo al mismo. A su vez los planetas y la Tierra describen círculos excéntricos a su alrededor.

Respecto al movimiento de la Luna también difiere del formulado por Ptolomeo, expone que está constituido por tres círculos. El círculo mayor o deferente tiene su centro en el centro de la Tierra, al deferente lo recorre un círculo menor —el epiciclo— en el período de un mes. Por último el perímetro de ese epiciclo es recorrido a una velocidad similar, pero en dirección contraria por el centro de otro epiciclo menor. Esta composición de movimientos por el deferente y el epiciclo responde a una órbita circular excéntrica. El segundo epiciclo es recorrido por la Luna durante dos semanas, lo que permite determinar que las máximas desviaciones de la Luna en relación con la posición media coinciden con el primer y el tercer cuarto. Así, de esta forma Copérnico logra explicar la irregularidad del movimiento de la Luna sin la necesidad de introducir ecuantes.

En el *Commentariolus* Copérnico se preocupa, como hemos dicho por eliminar los ecuantes, cuya introducción impide que se cumplan los axiomas básicos de uniformidad y circularidad de los movimientos. Los grandes epiciclos también desaparecen, porque son reemplazados por el movimiento de traslación de la Tierra. En busca de la sencillez y la economía, intenta reducir los círculos para explicar fenómenos semejantes a los de la teoría geocéntrica.

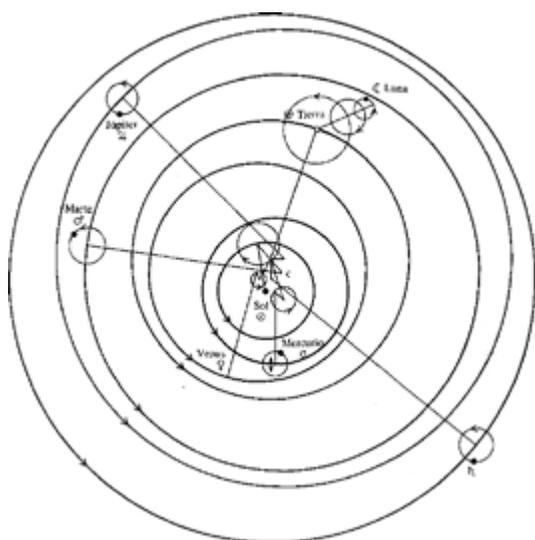


Figura 3. En Layzer (1989).

Del uso del ecuante fue liberado no sólo el movimiento de la Luna sino también el de los planetas, para los planetas Copérnico introduce un pequeño epiciclo que junto con el deferente cumple con la función de círculo excéntrico. El segundo epiciclo de radio tres veces menor y recorrido por el planeta dos veces durante una revolución alrededor del Sol, aproxima la órbita real al la elipse que más tarde propondría Kepler²⁸. El mecanismo utilizado por Copérnico en este asunto es desde el punto de vista matemático equivalente al ecuante, de forma tal que cumple con el principio fundamental del movimiento absoluto, puesto que el movimiento del planeta es en él la resultante de movimientos circulares uniformes (Dobrzycky, 1973: 42).

En todas las órbitas planetarias presentes en el *Commentariolus*, se destaca la constancia de excentricidades, salvo Mercurio, así como por una posición constante de la línea de las ápsides.

Esta obra termina postulando que Mercurio se mueve sobre siete círculos en total; Venus sobre cinco; la Tierra sobre tres; finalmente Marte, Júpiter y Saturno sobre cinco cada uno. Lo cual suma un total de treinta y cuatro círculos que él considera suficientes para explicar la estructura completa de los planetas. Concluye que son suficientes 34 libros para explicar todo el mecanismo del mundo junto con todas las revoluciones de las estrellas errantes (Copérnico, 1939).

Sin embargo en *De Revolutionibus* modifica bastantes afirmaciones y se ve obligado a aumentar el número de círculos para poder salvar de manera adecuada las apariencias. Sólo mostraremos algunas modificaciones a modo de ejemplo.

Diversas son las razones que llevan a Copérnico a introducir variaciones en el *De Revolutionibus* en relación al *Commentariolus*. Una de las mismas fue mencionada en el apartado *Breve reseña biográfica*, allí se señala las consecuencias para el movimiento terrestre que trajo consigo ciertas observaciones del Sol realizadas entre 1515 y 1516.

Al comparar sus observaciones (comenzó con la de Marte en 1523) con las cifras de Ptolomeo, descubre la movilidad de las líneas de las ápsides planetarias, lo cual le lleva a pensar la falsedad de la afirmación vertida en el *Commentariolus* respecto a que la orientación de las órbitas planetarias en el espacio permanece invariable. Además en el libro sexto donde expone el movimiento de los planetas en longitud, establece para las mismas órbitas compuestas un círculo excéntrico con un epiciclo, en lugar del círculo concéntrico con dos epiciclos.

IV.b. De Revolutionibus orbium coelestium

Como ya hemos mencionado en *De Revolutionibus*, Copérnico retoma las tesis ya desarrolladas en el *Commentariolus*, siendo algunas modificadas. A continuación se formularan algunas de ellas.

En el primer libro Copérnico postula la esfericidad del universo (mundo) «... hemos de señalar que el mundo es esférico, sea porque es la forma más perfecta de todas...» (Copérnico, 1994: 15), así como también postula la esfericidad de la Tierra. Para esto último expone argumentos de naturaleza diversa. Podemos decir que los tres primeros argumentos tienen un carácter astronómico, como el siguiente:

marchando hacia el norte, desde cualquier parte, el vértice de la revolución diurna se eleva poco a poco, descendiendo el otro por el contrario otro tanto, y muchas estrellas alrededor del septentrión parecen no ponerse y algunas hacia el punto austral parecen no

²⁸ Véase en este mismo volumen el artículo de Inmaculada Perdomo Reyes, «J. Kepler (1571-1630): la creatividad y el rigor en la búsqueda de la armonía del mundo» (*comps.*).

salir más. Así, en Italia no se ve Canopi, visible desde Egipto. Y en Italia se ve la última estrella de Fluvius, que no conoce nuestra región de clima más frío. Por el contrario, para los que marchan hacia el sur se elevan aquéllas, mientras que descienden las que para nosotros están elevadas (Copérnico, 1994: 16).

A este argumento le sigue uno de naturaleza náutica:

También se deduce porque las aguas surcadas por los navegantes tienen esta misma figura: puesto que quienes no distinguen la tierra desde la nave, la contemplan desde la parte más alta del mástil; desde la tierra, a los que permanecen en la orilla, les parece que desciende poco a poco al avanzar la nave, hasta que finalmente se oculta, como poniéndose (Ídem).

Otra de las hipótesis planteadas refiere al movimiento de los cuerpos celestes donde expone que el mismo es regular, y circular, perpetuo o compuesto por movimientos circulares. En este caso distingue varios tipos de movimientos debido a la multitud de órbitas, de hecho establece que uno de estos movimientos es el diurno:

La más conocida de todas es la revolución diaria, la que los griegos llaman *nuxqhmeron*, esto es, un espacio de tiempo de un día y una noche, por eso se piensa, equivocadamente, que todo el mundo se desliza desde el orto hacia el ocaso, excepto la Tierra. Esta revolución se entiende como la medida común de todos los movimientos, puesto que medimos el tiempo sobre todo por el número de días (Ídem: 18-19).

Otro de los movimientos mencionados es el que realiza el Sol anualmente y el que realiza la Luna mensualmente:

Así, el Sol nos proporciona el año, la Luna los meses, los períodos de tiempo más divulgados; así, los otros cinco planetas realizan cada uno su propio ciclo. Sin embargo, las diferencias son múltiples: primero porque no giran alrededor de los mismos polos a través de los que se desenvuelve aquel primer movimiento, avanzando por la oblicuidad de la eclíptica; después, porque en su propio ciclo no parecen moverse con regularidad. Pues el Sol y la Luna se observan a lo largo de su curso unas veces lentos, otras veces más rápidos (Ídem: 19).

Respecto al movimiento planetario acota:

mientras el Sol avanza constante y directamente por su camino, aquellos (los planetas) andan errantes de diversos modos, vagando unas veces hacia el norte, y otras hacia el sur. Pero, percibimos también que los planetas retroceden a veces y después se detienen: por eso son llamados planetas. Añádase también el que unas veces se presentan más cercanos a la Tierra y se llaman perigeos y otras más alejados, y se les llama apogeos (Ídem).

En el capítulo cuatro formula que como la Tierra tiene forma de globo, entonces tiene que explorarse que consecuencias trae esto, es decir si el movimiento de la misma es circular, y qué posición ocupa. Plantea que la Tierra lleva a cabo un movimiento de rotación «...si se le atribuye algún movimiento a la Tierra, el mismo aparecerá igual en el universo que le es exterior, pero como si pasaran por encima en sentido opuesto, tal es en primer lugar la revolución diaria.» (Ídem: 20), más adelante agrega:

Y siendo el cielo el que contienen y abarca todo, el lugar común de todas las cosas, no aparece claro inmediatamente, por qué no se atribuye el movimiento más al contenido que al continente [...]. Con razón eran de esta opinión los Pitagóricos Heráclides, Ecfanto, y Nicetus de Siracusa, según Cicerón, que suponían a la tierra dando vueltas en el centro del mundo (Ídem: 21).

Además del movimiento de rotación sugiere el movimiento de traslación, para lo cual apela a Filolao el Pitagórico, quién opino que «la Tierra giraba, e incluso que se movía con varios movimientos, y que era uno más entre los astros.» (Ídem: 21). Más adelante en el capítulo nueve del libro I, desarrolla que al no ser la Tierra el centro del universo sino el Sol, es mucho más fácil explicar por ejemplo (esto también se encuentra en el *Commentariolus*),

la distancia variante de los planetas a la Tierra «que no es el centro de todas las revoluciones lo manifiestan el aparente movimiento irregular de los errantes y sus distancias variables a la tierra, que no pueden entenderse mediante un círculo homocéntrico sobre la tierra.» (Ibídem: 29), también es más fácil comprender la conversión de Mercurio y de Venus de estrellas vespertinas a estrellas matutinas, así como los movimientos aparentes de avance y retrogradación de los planetas. Termina este capítulo reafirmando lo siguiente «el Sol ocupa el centro del mundo. Todo esto nos enseña la razón del orden, según la cual se suceden unas cosas tras otras, y la armonía de todo el mundo, si como dicen, con los dos ojos contemplamos esta cuestión.» (Ibídem: 30). Como vemos en este cierre de capítulo, Copérnico vuelve a reafirmar lo que para él sería un axioma de su desarrollo teórico: el orden, la armonía y en definitiva la perfección, rasgos que no estarían presentes en las teorías astronómicas que le precedieron.

En el capítulo diez Copérnico expone el orden de las órbitas celestes tras realizar una crítica al orden asignado a las órbitas en la teoría ptolemaica. En primer lugar presenta que las órbitas de Mercurio y Venus quienes giran alrededor del Sol son menores a las de la Tierra, «Venus y Mercurio giran alrededor del Sol que está en el centro y juzgan que por esta causa no se apartan de él más de lo que les permite la convexidad de sus orbes: por lo que no rodean a la tierra» (Ibídem: 32). También expone que Saturno, Júpiter y Marte realizan sus órbitas alrededor del Sol pero más allá de la Tierra:

Si alguien, aprovechando esto como ocasión, relacionará también Saturno, Júpiter y Marte con aquel mismo centro, entendiéndolo tan grande que puede contener lo que en ellos hay y rodear a la Tierra, no se equivocará. Esto lo demuestra la relación existente en la tabla de sus movimientos. Pues, consta que están siempre más cerca de la Tierra alrededor de, su salida vespertina, esto es, cuando están en oposición al Sol, mediando la Tierra entre ellos y el Sol, en cambio, están más lejos de la Tierra en el ocaso vespertino, cuando se ocultan cerca del Sol (Ídem).

Presenta a la Tierra como un planeta que gira alrededor del Sol, y a la Luna a su vez girando alrededor de la Tierra (es importante para Copérnico reafirmar la idea de que no hay un centro único de mundo, ejemplo de ello es la relación Tierra-Luna), por ello dice:

Pero al sustentarse todos en un sólo centro, es necesario que el espacio que queda entre el orbe convexo de Venus y el cóncavo de Marte, sea considerado también como un orbe o una esfera homocéntrica con aquellos, con respecto a las dos superficies, y que contenga a la Tierra, a su acompañante la Luna y todo lo que está contenido bajo el globo lunar. De ningún modo podemos separar de la Tierra la Luna que está, fuera de toda discusión, muy próxima a ella, sobre todo habiendo hallado en este espacio un lugar adecuado y suficientemente amplio para ella (Ibídem: 33).

Adelantándose a las posibles objeciones que pudieran surgir respecto al movimiento de la Tierra desde flancos geocentristas, responde correctamente al problema del paralaje al exponer lo siguiente:

por lo que permaneciendo el Sol inmóvil, cualquier cosa que aparezca relacionada con el movimiento del Sol puede verificarse aún mejor con el movimiento de la tierra, pero la magnitud del mundo es tan grande que, aunque la distancia de la tierra al Sol tenga una dimensión bastante evidente con cualquier otra órbita de las estrellas errantes en razón de sus magnitudes, no aparece como perceptible con respecto a la esfera de las estrellas fijas (Ibídem: 33).

Para Copérnico entonces el orden de las órbitas celestes es el siguiente (no olvidar la finitud del universo, cuyo límite está representado por la esfera de las estrellas fijas): la esfera de las estrellas fijas es la primera y más alta de todas las esferas, a ésta le sigue la órbita de Saturno que completa su circuito en treinta años, después le toca el turno a Júpiter quien se

mueve en una revolución de doce años. Marte gira en dos años, la Tierra realiza su revolución de forma anual, junto con la órbita de la Luna como epiciclo. En quinto lugar encontramos a Venus quien en nueve meses vuelve al punto de partida, por último Mercurio que se mueve en un espacio de ochenta días. Y en el medio encontramos al Sol de quien dice «¿quién en este bellissimo templo pondría esta lámpara en otro lugar mejor, desde el que iluminar todo? Y no sin razón unos le llaman lámpara del mundo, otros mente, otros rector.» (Ibídem: 34). La siguiente figura ilustra el ordenamiento:



Figura 4. Wikimedia Commons.

Para Copérnico este ordenamiento es ejemplo de una admirable simetría del mundo, así como de un nexo seguro de armonía entre el movimiento y la longitud de las órbitas. Los capítulos que continúan en el libro son exposiciones de trigonometría plana y esférica. Esto ya había sido publicado por Rethicus en 1542 como tratado.

A continuación sólo referiremos que es lo expuesto por Copérnico en los libros siguientes sin detenernos a desarrollar el contenido de los mismos. En el libro segundo desarrolla temas de astronomía esférica, aunque no están vinculadas con sus tesis astronómicas básicas (Dobrzycky, 1973: 50). En el tercer libro se desarrolla la teoría de la precesión, refiriéndose al sistema formado por la esfera de las estrellas fijas, los fenómenos relacionados con el movimiento aparente del Sol. Cabe señalar que el descubrimiento de las verdaderas causas de los fenómenos observados en el movimiento de precesión del eje terrestre resulta ser uno de los puntos más importantes de su teoría. La teoría del tercer movimiento de la tierra, demostrada matemáticamente se basa en más de mil ochocientos años de observaciones, esta teoría permitió establecer con cierta precisión el velocidad del movimiento de precesión. También en este libro desarrolla la magnitud básica de la teoría del Sol, concluyendo que era el año sideral (el período entre dos pasos consecutivos del Sol por la misma estrella) en lugar del año trópico (medido entre los pasos consecutivos del Sol por los puntos equinocciales en irregular traslación).

En el siguiente libro expone la teoría del movimiento de la Luna, y los métodos para calcular los eclipses. Lo expuesto aquí ya había sido anticipado en el *Commentariolus*, donde expone que el deferente concéntrico a la Tierra lleva un epiciclo mayor recorrido por un epiciclo menor. Por el perímetro del epiciclo menor se mueve la Luna a una velocidad

dos veces mayor que la velocidad del epiciclo por el deferente. Esto permite observar que los epiciclos causan desviaciones en la órbita de la Luna, debidos por un lado al carácter elíptico de la órbita real, y también a la desigualdad descubierta por Ptolomeo respecto al epiciclo menor, denominada evección.

La explicación de la trayectoria lunar tal como fue explicada no aparece por primera vez de la mano de Copérnico, de hecho en el siglo XVI Ibn as Shair (1304-1376), propuso una solución idéntica, (concéntrico con dos epiciclos) con proporciones muy similares entre los diferentes elementos de la órbita (Dobrzycky, 1973: 52).

Los dos últimos libros de esta obra refieren a los planetas, en el libro quinto presenta el astrónomo el movimiento de los planetas en el plano de la eclíptica, analiza el movimiento de cada planeta en relación a la latitud, debido a las diferentes inclinaciones de las órbitas planetarias. En el último libro (sexto) describe los fenómenos observados en el movimiento de los planetas como consecuencia del movimiento de la Tierra. En este desarrollo logra liberar al sistema planetario de los grandes epiciclos presentes en el modelo geocéntrico. En *De Revolutionibus* Copérnico da una solución geométrica diferente, ya que modifica el círculo concéntrico con dos epiciclos (*Commentariolus*) por el círculo excéntrico con un único epiciclo pequeño.

Para terminar con esta exposición retomaremos las palabras formuladas por Dobrzycky (1973), quien dice que Copérnico defendía con toda firmeza sus descubrimientos, a saber el triple movimiento de la Tierra, y el sistema heliocéntrico, como imágenes reales del mundo más allá de lo expuesto por Osiander. Por otro lado Copérnico asume una actitud diferente cuando se trata de referir al Sol, La Luna y Mercurio, ya que propone dos modelos (no desarrollados aquí) para representar los fenómenos. Lo interesante es que presenta a ambos sistemas como válidos, sin especificar cuál de ellos corresponde a la realidad. Dobrzycky considera que esto se debe a que no los consideraba soluciones definitivas, sino que pruebas de solución en el marco del sistema heliocéntrico.

V. Objeciones a la teoría copernicana

Por su carácter neoplatónico Copérnico concluye que el problema planetario debe tener una solución simple y precisa, por eso todo su desarrollo tiene como objetivo la búsqueda de la armonía, la sistematicidad y la regularidad.

Sin embargo, sus teorías matemático-astronómicas no le permiten resolver todos los problemas que había visualizado en la teoría geocéntrica desarrollada por Ptolomeo, además del hecho que el sistema heliocéntrico predice el movimiento de los planetas a lo sumo igual al de Ptolomeo, y tampoco era más sencillo.

El sistema copernicano posee tantas complejidades de detalle como el de Ptolomeo. En el *Commentariolus* promete no utilizar más de treinta y cuatro esferas, pero para poder adecuarse a los hechos se ve obligado a introducir doce más. Si bien su sistema carece de ecuantas no puede prescindir de los epiciclos y de las excéntricas, y como si fuera poco no puede ubicar geoméricamente al Sol en el centro de ninguno de los círculos planetarios. Si bien mantiene al Sol estacionario en el centro de las estrellas fijas, tiene que referir los círculos de todos los planetas a un punto vacío del espacio. Este punto se mueve periódicamente alrededor del Sol en una trayectoria epicíclica, que a su vez es el centro moviente del movimiento de la Tierra.

Como vemos en la figura, la Tierra recorre un círculo cuyo centro no es el Sol, sino un punto exterior a este. El centro de la órbita de la Tierra es un punto en movimiento que gira alrededor de E (ver figura 5), el cual a su vez se mueve alrededor del Sol. Esta imposibilidad de ubicar al Sol en el centro, así como el hecho de que a la hora de calcular no supone siempre un sistema ventajoso provocó críticas.

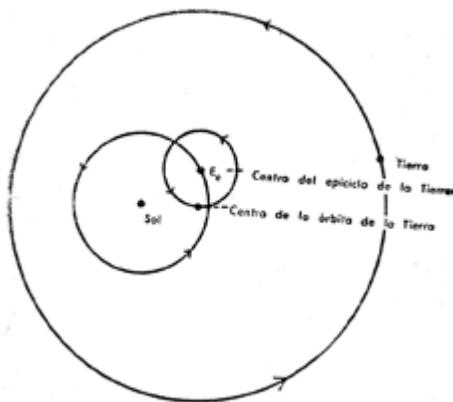


Figura 5. El movimiento de la Tierra en el sistema copernicano. En Toulmin; Goodfield (1963: 200).

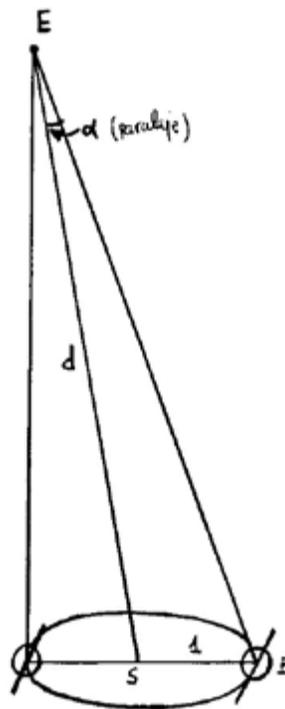


Figura 6. Paralaje estelar.

Esto junto con algunos problemas que desarrollaremos a continuación, convierten a la teoría propuesta por Copérnico es blanco de severas críticas las cuales se realizan desde una óptica ptolemaica y, consisten principalmente en los siguientes ítems: 1) la paralaje anual de las estrellas fijas; 2) el movimiento de rotación y de traslación de la Tierra; 3) las fases de Venus.

V.a. La paralaje de las estrellas fijas

Tycho Brahe (1546-1601) astrónomo danés, nunca aceptó totalmente el sistema astronómico propuesto por Copérnico tanto es así que buscó conciliar el sistema copernicano con el sistema ptolemaico. En relación a esto plantea una seria crítica al movimiento terrestre, referente a la paralaje estelar. Esta objeción consiste en que si el eje de la Tierra se mantuviera paralelo a sí mismo durante el movimiento anual que realiza no apuntaría siempre al mismo lugar sobre la esfera celeste por ser el tamaño de la órbita heliocéntrica de la Tierra no despreciable frente a la distancia de las estrellas (Thoren; Christianson, 1990). Dicho de otra manera si la hipótesis del movimiento de la Tierra es correcta, al realizar dos observaciones respecto a la misma estrella con una diferencia de seis meses entre observación y observación, se debería conformar un ángulo resultado de la variación de la posición

de la estrella en la esfera de las estrellas fijas. Por lo tanto una estrella fija no se observaría en la misma dirección mientras la Tierra gira alrededor del Sol.

Si nuestro planeta recorre un enorme órbita en torno al Sol, la observación de una misma estrella desde la Tierra en un periodo de seis meses primero en la posición T y luego T' debería dar como resultado diferentes ángulos para las correspondientes visuales. En un periodo de seis meses se desplazaría un ángulo (2ζ); A la mitad de dicho ángulo se le llama *paralaje*.

El ángulo 2ζ de las visuales en posiciones extremas es una medida de la paralaje estelar. Sin embargo las mediciones más precisas no lograban dar cuenta de tal fenómeno, ya que los valores obtenidos de ζ eran siempre nulos, lo que a las claras parece indicar la inmovilidad de la Tierra.

Para Copérnico que no se observe paralaje se debe a que la esfera de las estrellas fijas se encuentra muy lejos al compararse con la distancia de la Tierra al centro del universo. La Tierra puede girar alrededor del Sol, sin violar las apariencias siempre que su órbita no se aleje mucho del Sol, comparado con la distancia a las estrellas fijas (Copérnico, 1994: 33).

Copérnico admite un universo mucho más grande que el que se admitía en su época. El proponer la extensión casi indefinida de los límites del universo, trae como consecuencia que no sólo se le proponga al hombre que la Tierra abandone el centro del universo y la dignidad del reposo sino que quede rebajado a ser un planeta más entre otros, sino que además se pretende alejar la esfera de los cielos hasta distancias que los hombres no pueden concebir.

Si bien Copérnico considera que las estrellas están más lejos que lo que estaban dispuestos a admitir en su época, igual está errado ya que la estrella más cercana que es α , Centauri, se encuentra 240 veces más alejada de lo que Copérnico supone, es decir su distancia se cifra en 270.690 veces la distancia Sol-Tierra.

Entre 1725 y 1728, James Bradley (Papp, 1996) intentando descubrir la paralaje se encuentra con un nuevo fenómeno que se denomina aberración de la luz, que consiste en un desplazamiento similar a la paralaje pero veinte veces más grande. Este fenómeno demostró por primera vez el movimiento anual de la Tierra. En 1838 recién fue descubierta por Bessel la paralaje anual de las estrellas fijas.

V.b. El movimiento de rotación y de traslación de la Tierra

El movimiento de la Tierra se muestra incompatible con la física vigente de inspiración aristotélica. Tanto las elaboraciones propias de la tradición filosófica como la observación empírica sugieren que todo movimiento debe ser generado por fuerzas y producir además efectos físicos esencialmente diferentes de los propios del reposo. Dicho de otro modo, el movimiento terrestre es contrario a la razón y a la experiencia.

En contra del movimiento de rotación de la Tierra se arguyó (podríamos poner por ejemplo nuevamente a Brahe) que, conocido su radio, debería recorrer un punto de su superficie situado en el Ecuador, 40.000 Km. en 24 horas, viajando a 1.700 km/h, así que las nubes y todo cuanto no estuviese en contacto con la Tierra, debería retroceder a idéntica velocidad. Un objeto dejado caer se debería desviar de la vertical por efecto de la rotación. Cosas estas que eran contrarias a la experiencia. Y la propia Tierra girando a dicha velocidad debería precipitarse en el cielo por la propia fuerza centrífuga de tan rápido giro. Hoy en día estos argumentos ya no cuentan, pero hubiera alcanzado con pensar que la atmósfera

también goza del movimiento de rotación y que la gravedad se opone a la fuerza centrífuga con un valor quince veces mayor, lo que en aquel momento resultaban argumentos muy sólidos.

Más grave aún es explicar el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. Como ya sabemos se intenta explicar el mismo haciendo referencia a la posibilidad del paralaje estelar (lo que Copérnico explicó correctamente). Si la Tierra está en movimiento se debería reflejar en el movimiento de las estrellas fijas. Sin embargo no es por medio de la paralaje estelar que logra argumentarse a favor de la traslación, sino que a través de otro fenómeno: la aberración de la luz. La aberración de la luz fue descubierta por Bradley, y consiste en lo siguiente: pongamos por caso que la luz de una estrella sea como las gotas de la lluvia, que caen de forma vertical. Si pretendo no mojarme y estoy quieta debo poner un paraguas vertical, de modo similar el telescopio se debe colocar vertical en dirección de la estrella para recibir la luz. Sin embargo si comienzo a moverme para no mojarme debo colocar el paraguas de forma inclinada hacia delante, e inclinarlo más en relación a la velocidad del movimiento. De igual modo, por efecto de la velocidad de la Tierra para recoger la luz de una estrella debemos colocar el telescopio de forma inclinada en un ángulo que sea la relación entre la velocidad de la Tierra y la de la Luna.

V.c. Las fases de Venus

Otra de las principales objeciones de las que fue objeto la teoría copernicana tiene que ver con las fases de Venus. Si Venus y Mercurio giran alrededor del Sol en órbitas internas entonces deberíamos poder observar un sistema completo de cambios de fases al igual que observamos con la Luna. El inconveniente reside en que estas fases no pueden ser observadas a simple vista.

Las fases de Venus no serían descubiertas hasta el siglo XVII de la mano de Galileo Galilei, quien a fines de setiembre de 1610 con su telescopio de treinta aumentos observa lo pronosticado por la teoría heliocéntrica (Galilei, 1984).

A simple vista tales fases no pueden ser observadas, y el sistema copernicano predice para Venus un sistema completo de fases al igual que el de la Luna. Pero esto también era predicho en la teoría ptolemaica. El sistema ptolemaico que sitúa a los planetas inferiores en una órbita egocéntrica por debajo de la solar también considera que Venus posee un sistema de fases aunque no completo, ya que faltaban las fases cercanas a las de nuestra Luna llena.

Para Galileo las fases de Venus, unidas a su variación de tamaño, son sólo compatibles con el hecho de que, gire alrededor del Sol, ya que presenta su menor tamaño cuando se encuentra en fase llena y el mayor, cuando se encuentra en la nueva; más precisamente cuando está entre el Sol y la Tierra. Es importante señalar que el hecho que, sin la ayuda del telescopio, no se apreciaran las necesarias variaciones de luminosidad de Venus, suponiendo que este girase en torno al Sol, se explicaba entonces por la disminución de la superficie iluminada visible desde la Tierra cuando el planeta está más próximo a ella. De esta manera Venus resultaba ser al igual que la Luna un cuerpo oscuro.

V.d. Objeciones Teológicas

La teoría de Copérnico también recibe objeciones desde el punto de vista teológico.

No podemos olvidar que dicha teoría atenta contra tres fundamentos de la ciencia de época: la Biblia, el aristotelismo, y la experiencia sensorial. Lo más difícil de superar

resultan las contradicciones entre las tesis básicas del heliocentrismo (sobre el movimiento de la Tierra) y algunos pasajes de las Sagradas Escrituras.

Entre los textos más controvertidos encontramos:

1. Los versículos 12-14 del capítulo 10 del Libro de Josué, donde se dice que Dios a pedido de Josué mandó al Sol detenerse para que los israelitas pudieran triunfar sobre los gabaonitas.
2. En Eclesiastés, capítulo 1, versículos 4-6, Salomón dice que la Tierra siempre permanece en su lugar y que el Sol sale y se pone, volviendo al lugar desde el cual vuelve a nacer.
3. En el Salmo 92, versículo 1, se dice que Dios afirmó tan bien el mundo que este no se moverá.
4. En el Libro del Profeta Isaías, capítulo 38, versículo 8, Jehová dice: «He aquí que yo vuelvo atrás la sombra de los grados, que ha descendido en el reloj de Achaz por el Sol, diez grados. Y el Sol fue tornado diez grados atrás, por los cuales había ya descendido.»

Si interpretamos de forma literal estos fragmentos y otros similares de la Biblia, es clara la contradicción entre ella y la teoría heliocéntrica; lo cual descartaba toda discusión posible entre los teólogos y los astrónomos. Sobre esta base el heliocentrismo fue condenado como blasfemia por los dirigentes de la Reforma y de la Iglesia Católica, tanto es así que en 1616 el *De Revolutionibus* fue colocado en el «Índice de libros prohibidos».

Dado los aportes de la nueva teoría, que se presentaron cada vez con mayor evidencia y que impedían rechazarla de forma a priori, los científicos se ven obligados a buscar líneas de conciliación entre las verdades científicas y las verdades reveladas. Esto lleva a que la posible solución sea una explicación alegórica (y por lo tanto no literal) de las Sagradas Escrituras.

La idea de una explicación alegórica y metafórica de las Sagradas Escrituras se expresa en: 1) Interpretar los fragmentos de diferentes maneras a veces de forma muy complicada y otras de forma muy ingeniosa, para demostrar que estos comprendidos de forma adecuada en su sentido más profundo no contradicen el heliocentrismo. Esto a su vez conjugado con otros fragmentos que son tomados y citados literalmente contradicen la teoría ptolemaica. 2) Considerar la Biblia como incompetente en formas científicas, por tratarlas solo de forma superficial, con el objetivo de hacerlas accesibles a todo el mundo, por consiguiente esto lleva a la afirmación de que ninguna afirmación de la Biblia puede utilizarse como argumento en pro o en contra del heliocentrismo, por carecer de carácter científico.

En apoyo de las dos ideas recién desarrolladas podemos poner como ejemplo a Galileo Galilei quien en carta dirigida en el año 1615 a Cristina de Lorena, Gran Duquesa de Toscana, expone dos puntos: en primer lugar la separación de poderes en este caso entre Iglesia y Ciencia, cada uno de estos poderes tiene para el físico pisano su propio ámbito en el cual debe desarrollarse, sin inmiscuirse en el ámbito del otro. En segundo lugar plantea una aparente contradicción, Galileo considera que el milagro de Josué se entiende mejor desde el sistema copernicano (Galilei, 1995).

Si la Iglesia Cristiana hubiera aceptado a principios del siglo XVII la idea de interpretar alegóricamente los pasajes cosmológicos de la Biblia habría desaparecido el punto más combustible de la controversia. Pero a partir del año 1616, con la condena de Galileo la Iglesia Católica comprometió toda su autoridad en la defensa de la interpretación literal de la Biblia. Sólo en 1757, bajo la presión de hechos científicos incuestionables, el Papa Benedicto XIV emitió un decreto que atenuó la posición de la Iglesia. Pero la idea de una

interpretación alegórica de los «fragmentos científicos» de la Biblia no fue reconocida como doctrina oficial de la Iglesia Católica sino por León XIII, en el año 1897 (Benítez, 1998). También los representantes de las Iglesias Protestantes, en el siglo XVI y principios del XVII, estuvieron en contra de la interpretación alegórica de las Sagradas Escrituras. En este aspecto la oposición protestante no fue menos violenta que la católica, pero adquirió formas menos autoritarias y fue superada relativamente más pronto por los más teólogos heterodoxos.

Como ya hemos dicho la obra de Copérnico es uno de los hitos más importantes en el proceso de renovación intelectual que culmina en la revolución científica del siglo XVII. Sin embargo en su momento los informes de Copérnico que habían intranquilizado a católicos y protestantes, hizo que la publicación del *De Revolutionibus* se diera en una circunstancia bastante particular.

Como ya hemos mencionado en el prólogo a *De Revolutionibus* Osiander trata al trabajo de Copérnico de mero trabajo hipotético, presentando al conocimiento que se desprende del mismo con carácter instrumental, convencido del mérito matemático de la teoría insiste en la necesidad de que se la presente como un mera fantasía que de ninguna forma pretende representar la realidad.

Copérnico no afirma el movimiento de la Tierra de forma gratuita, o simplemente para tener una base para el cálculo, mientras que para Osiander debe aparecer como una ficción útil y no como una descripción física adecuada. De forma contraria a lo que Osiander cree, Copérnico afirma que es posible descubrir por investigación racional la verdad acerca de los cielos.

Por otro lado, Copérnico no hizo ningún descubrimiento notable en los cielos, sólo registró unas pocas docenas de mediciones astronómicas, las necesarias como para poder relacionar sus propios cálculos con los registros heredados de Ptolomeo. Frente a esto la pregunta que surge es por qué se considera a Copérnico un revolucionario. Para Toulmin y Goodfield (1963) se debe a que su teoría fue presentada en el lugar adecuado y en el tiempo adecuado. Sobre todos si tenemos en cuenta que en casi todas sus facetas Copérnico era un astrónomo anticuado, de ninguna manera «moderno». Sus ideas están más cerca de Aristóteles y Ptolomeo que de Kepler y Newton. Algunos historiadores de la astronomía entienden que el trabajo de Copérnico supone una «vana fatiga», vana porque hasta el último de sus días Copérnico creyó sin criticar «el axioma de Platón», que exponía la circularidad de las órbitas planetarias. Esto se magnifica si tenemos en cuenta que tan solo 75 años después de su muerte, Johannes Kepler (1751-1630) abandona el axioma metafísico de la circularidad de las órbitas celestes, y en su lugar publica en 1609 la primera de sus célebres leyes, que establece que la órbita de cada planeta es una elipse en cuyo foco se encuentra el Sol. Sin embargo, ante esto último Birkenmajer plantea que nada nos autoriza a considerar el trabajo de Copérnico como una «vana fatiga», ya que las elaboradas construcciones geométricas desarrolladas en *De Revolutionibus*, le sirvieron justamente a Kepler como escalón para dar una imagen más adecuada del universo. De todas maneras lo importante es que Copérnico puso a la astronomía en el camino de la física, y como afirma Birkenmajer

Hasta ahora no ha sido —y seguramente nunca será— terminado aquel gran Almagesto nuevo en que soñó Copérnico cuando se disponía a escribir *De Revolutionibus*. Pero esto no cambia en nada el hecho de que el espléndido edificio del saber astronómico de nuestros tiempos se apoya, como en un fundamento, precisamente en esta obra (Birkenmajer, 1973: 69).

VI. Bibliografía

- Abetti, G. (1956), *Historia de la astronomía*, México, FCE.
- Armitage, A. (1938), *Copernicus: the founder of modern astronomy*, London, George Allen & Unwin.
- Benítez, H. (, «El mito de la rehabilitación de Galileo», en *Atenea*, N° 477, pp. 11-36
- Bienkowska, B. (dir.) (1973), *Nicolás Copérnico*, Buenos Aires, Siglo XXI.
- Birkenmajer, L. A., «Un astrónomo entre dos épocas», en Bienkowska (1973).
- Camejo, M. (2007), *Copérnico y el desarrollo de la concepción heliocéntrica*, Montevideo, CEBA.
- Coffa, J. A. (1969), *Copérnico*, Buenos Aires, CEAL.
- Cohen, I. B. (1985), *Revolution in science*, Cambridge, The Belknap Press of Harvard University Press.
- Copérnico, N. (1994 [1543]), *Sobre las revoluciones*, Barcelona, Altaya.
- _____ (1939), *Three Copernican Treatises: The Commentariolus of Copernicus, the Letter against Werner, the Narratio Prima of Rethicus*, New York, Columbia University Press. Ed. E. Rosen.
- Dobrzycky, J., «Nicolás Copérnico, su vida y su obra», en Bienkowska (1973).
- Flammarion, C. (1943), *Vida de Copérnico*, Buenos Aires, Glem.
- Galilei, G. (1995 [1615-1616]), *Carta a Cristina de Lorena y otros textos sobre ciencia y religión*, Barcelona, Altaya.
- _____ (1984 [1609]), *El mensaje y el Mensajero Sideral*, Madrid, Alianza.
- Gearbart, C. A. (1985), «Epicyles, eccentrics, and ellipses: the predictive capabilities of Copernican planetary models», en *Archive for History of Exact Science*, V. 32, N° 3-4/, junio, pp. 207-222.
- Geymonat, L. (1985), *Historia de la filosofía y de la ciencia*, Barcelona, Crítica.
- Gurev, G. A. (1974), *Los sistemas del mundo desde la antigüedad hasta Newton*, Buenos Aires, Problemas.
- Hanson, N. R. (1978), *Constelaciones y conjeturas*, Madrid, Alianza.
- Hoyle, F. (1973), *Nicolaus Copernicus*, London, Heinemann.
- Koestler, A. (1986), *Los sonámbulos*, Barcelona, Salvat, 2v.
- Koyré, A. (1985), *Estudios galileanos*, México, Siglo XXI.
- Kuhn, T. (1996), *La revolución copernicana*, Barcelona, Ariel.
- Layzer, D. (1989), *La construcción del universo*, Barcelona, Labor.
- Papp, D. (1996), *Historia de las ciencias*, Santiago del Chile, Andrés Bello.
- Pantin, I. (1999), «New philosophy and old prejudices: aspects of the reception of copernicanism in a divided Europe», en *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 30A, N° 2, junio.
- Rupert Hall, A. (1985), *La Revolución Científica 1500-1750*, Barcelona, Crítica.
- Reinchenbach, H. (1945), *De Copérnico a Einstein*, Buenos Aires, Poseidón.
- Sarton, G. (1965), *Historia de la ciencia*, Buenos Aires, Eudeba, 4v.
- Thoren, V. E. y Christianson, J. R. (1990), *The Lord of Uraniborg: a biography of Tycho Brahe*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Toulmin, S. y Goodfield, J. (1963), *La trama de los cielos*, Buenos Aires, Eudeba.
- Vernet, J. (2000), *Astrología y astronomía en el Renacimiento*, Barcelona, El Alcantilado.
- Yáñez, M. (2003), *Copérnico*, Madrid, Edimat.
- Zupko, J. (2006), «John Buridan», en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, disponible en <<http://plato.stanford.edu/entries/buridan/#6>>

9. Galileo Galilei

Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII¹

I. Vida y contribuciones científicas de Galileo Galilei

El nombre completo de Galileo era Galileo di Vincenzo Bonaiuti de Galilei. Nació en Pisa, Italia, el 15 de Febrero de 1564. Su padre fue Vincenzo Galilei, un teórico de la música y compositor de la misma. Su familia pertenecía a la nobleza y en la década de los 1570 se trasladan a Florencia cuando Galileo contaba con ocho años. En sus años de temprana educación consideró la idea de hacerse sacerdote, sin embargo decidió estudiar medicina en la Universidad de Pisa. Sin embargo, no concluyó estos estudios y dedicó su tiempo al estudio de las matemáticas.

En 1592 se traslada a la Universidad de Padua en donde enseña astronomía, mecánica y geometría, todas ellas desarrolladas principalmente en el mundo griego antiguo. A pesar de que en 1543 Copérnico había publicado su obra en astronomía *Sobre las revoluciones*, que hacía referencia al movimiento orbital de los orbes, no se enseñaba en la Universidades como una teoría aceptada². La astronomía que se enseñaba principalmente era el modelo Ptolemaico-Aristotélico que consideraba a la Tierra inmóvil en el centro del Universo. Hacia estos años, la física de Aristóteles era predominante en la enseñanza universitaria; dicha física explicaba el movimiento de los cuerpos sobre la superficie terrestre. Para Aristóteles, los cuerpos pesados buscan su lugar natural en la naturaleza, a lo cual le llama *movimiento natural*. La Tierra, al estar inmóvil, está simultáneamente en el centro del Universo y por ello los cuerpos pesados caen hacia el centro de la Tierra³. En su estancia en la Universidad de Pisa, Galileo empezó el estudio del movimiento del péndulo, mediante el cual mostró su notable habilidad tanto intelectual como manual en el análisis del movimiento. En 1602 descubrió que el periodo del péndulo, el tiempo que le toma una oscilación de ida y vuelta, no depende

1 Este trabajo es una versión modificada del capítulo 7 de Guillaumin (2005).

2 Véase en este mismo volumen el artículo de Marina Camejo, «Conceptos fundamentales de la teoría copernicana» (*comps.*).

3 Véase en este mismo volumen los artículos de Elena Diez de la Cortina Montemayor, «Ciencia y método en Aristóteles», y Christián C. Carman, «La teoría planetaria de Claudio Ptolomeo» (*comps.*).

del arco de la oscilación. Este movimiento no es explicable en la física aristotélica y Galileo se da cuenta que requiere de otro tipo de explicación para el isocronismo que ha descubierto, que no es más que la idea de que el movimiento oscilatorio es igual al tiempo que toma una oscilación, no al arco.

Las diferencias en las explicaciones con Aristóteles son un elemento crucial de la ciencia que Galileo desarrolló. Específicamente, por ejemplo, las explicaciones aristotélicas se fundamentaban en aspectos cualitativos y hacían descripciones verbales de los fenómenos. Descripciones que se basaban en lenguaje cotidiano articulado en silogismos, que es la estructura lógica-deductiva de la cual Aristóteles hacía depender el conocimiento genuino. Galileo, en gran medida gracias a su mente matemática y analítica, desarrolló un enfoque cuantitativo de los fenómenos y sus relaciones, a través de análisis matemáticos de la cuestión. Por ejemplo, Aristóteles afirmaba que los cuerpos más pesados caían al suelo más de rápido que los cuerpos ligeros estando ambos en el mismo medio. Galileo, muy al inicio de su carrera intelectual, afirmó que la diferencia de velocidad entre dos cuerpos de peso diferente dependía principalmente de sus propias densidades. Lo importante aquí es darse cuenta que para desarrollar ese juicio se requiere utilizar el concepto de *densidad* de un cuerpo, ese concepto era irrelevante en las explicaciones aristotélicas del movimiento. Ese concepto se convertirá más tarde en el concepto de *masa* en Newton. Para elaborar una física diferente a la de Aristóteles, a Galileo le fue muy conveniente sus estudios sobre el péndulo porque una física cuantitativa como la que desarrolló, requiere esencialmente, a diferencia de una física cualitativa como la aristotélica, un patrón de medida que en el caso de Galileo es el tiempo. Cuantificar el movimiento supone tener una manera de medirlo. El descubrimiento del isocronismo tuvo importantes implicaciones para realizar medidas del movimiento en términos de intervalos de tiempo.

En su estancia en la Universidad de Padua desarrolló igualmente su interés por la invención de diferentes artefactos. Abordó problemas de la construcción de barcos, de la manera de fortificar edificaciones, entre otros aspectos de innovación tecnológica. Por ejemplo, en 1593 se le consultó sobre la necesidad de reemplazar los remos de una galera, a lo cual él envió un reporte sobre el diseño más conveniente del remo en forma de palanca. Igualmente de esta época es su invento para repartir agua en un terreno grande utilizando sólo un caballo, de lo cual, de hecho, el Senado de Venecia le otorgó una patente por veinte años por tal invento. Galileo nunca perdió a lo largo de su vida su interés por construir dispositivos y artefactos mecánicos; contaba con una gran habilidad y gusto innatos para ello. Ello igualmente revela su mente analítica y proclive al análisis del funcionamiento de las cosas, lo cual fue un rasgo de la ciencia que posteriormente desarrolló: explicaciones sobre cómo las cosas naturales funcionan, especialmente el movimiento en el mundo natural.

Galileo admiró profundamente a Arquímedes (c. 287 a.C.- c. 212 a.C.), quien fue, al igual que Galileo, matemático, ingeniero, inventor, astrónomo y se interesó en el movimiento. Las principales aportaciones de Arquímedes fueron en los fundamentos de la hidrostática, la estática y la explicación del principio de la palanca. En 1586, Galileo publicó *La Bilancetta* (La Balancita), en la cual describe correctamente la mejor forma de pesar objetos pesados tanto en el aire como en el agua. Este desarrollo es muy importante porque le proporcionó a Galileo la posibilidad de entender la función que juega el medio, en que los objetos se encuentran inmersos, con su movimiento. Este trabajo lo llevó a cabo siguiendo la manera en que Arquímedes había analizado en la antigüedad la densidad de los objetos pesados al sumergirlos en agua, lo que se le llamó su *gravedad específica*, que no es sino la razón de la

densidad de cualquier sustancia en relación con la densidad de alguna otra sustancia tomada como parámetro, siendo el agua el estándar para los sólidos en el caso de Arquímedes.

Debido al conocimiento que desarrolló Galileo del comportamiento de objetos colocados dentro de fluidos, hacia 1603 elaboró un termómetro al cual llamó termoscopio. Como parte de la descripción cuantitativa de fenómenos, Galileo se interesó por medir el calor. En la física aristotélica, el calor (o el fuego) junto con el frío, la humedad y lo seco, eran las cualidades mediante las cuales se explicaban algunos de los rasgos y transformaciones naturales de los fenómenos. Sin embargo, la expresión de esas cualidades no se había hecho cuantitativamente hasta principios del siglo XVII. Una vez más, faltaban conceptos que capturarán el hablar de *grados* de calor o de frío, por lo que no había una distinción conceptual entre el concepto *extensivo* de calor y el concepto *intensivo* de temperatura. Su termoscopio consistía en un pequeño cilindro de vidrio que contenía líquido transparente y una serie de esferas que contenían diferentes líquidos de diferentes densidades. El cilindro de cristal podía ser calentado frotándolo con las manos, con lo cual las diferentes esferas suspendidas dentro del cilindro flotaban a diferentes distancias debido al ligero cambio de temperatura del líquido en el que estaban suspendidas.

El instrumento que se ha asociado con mayor fuerza a Galileo es sin duda el telescopio, el cual no fue inventado por Galileo. La primera descripción de lo que podría ser denominado actualmente un telescopio, procede de Thomas Digges (1546-1595), quien era un astrónomo inglés, y en 1571 describió cómo su padre, Leonardo, había construido un artefacto que acercaba y amplificaba objetos. Afirma que su padre «fue capaz [...] mediante la colocación de diferentes cristales proporcionales situados en ángulos convenientes, no solamente de descubrir cosas lejanas, sino también de leer cartas, nombrar la denominación de monedas con inscripciones realizadas en ellas, colocadas por sus amigos para tal propósito en el campo abierto, [...]». Sin embargo, el 2 de octubre de 1608, Hans Lippershey, quien vivía en Middelburg, Holanda, recibió una patente por un dispositivo que es muy similar al actual telescopio refractor (Andersen, 2007: 25-26). Este consistía en lentes convexos y cóncavos en un tubo, y la combinación de ellos incrementaba el tamaño aparente del objeto observado tres o cuatro veces. Para 1609, ya se podían conseguir en París y en ese mismo año llegaron a Italia. Se sabe que fue Thomas Harriot (1560-1621) quien observó la Luna con un instrumento de seis aumentos en agosto de 1609. Al enterarse Galileo de este instrumento, lo mejoró y para finales de 1609 ya había construido un catalejo de veinte aumentos con el cual observó la Luna, descubrió cuatro satélites de Júpiter y muchas más estrellas de las que es posible observar a simple vista. En marzo de 1610 publicó un pequeño libro titulado *Sidereus Nuncius* (*El mensajero de los cielos*) en donde daba cuenta de esas observaciones (Galilei, 1610). Posteriormente observó las fases de Venus, lo cual era evidencia directa de que Venus giraba alrededor del Sol o no alrededor de la Tierra (inmóvil) como lo sostenía Ptolomeo y Aristóteles. Igualmente observó las manchas solares, lo cual también era evidencia observacional en contra de la cosmología de Aristóteles por cuanto que sostenía que el Sol era una esfera perfecta. Es a partir de la publicación de *El mensajero de los cielos*, que Galileo se empieza a interesar en los aspectos teóricos tanto del movimiento como de la estructura del universo, ya que para él era claro que se requería una completa renovación en la teoría del movimiento de Aristóteles ya que se había acumulado evidencia observacional en su contra.

Como parte de esa evidencia empírica a favor de Copérnico era el movimiento de las mareas. En 1616, Galileo le dirige una carta al Cardenal Orsini, en respuesta a las afirmaciones

recientemente hechas por el Cardenal Bellarmine quien en 1615 había afirmado que el sistema de Copérnico no puede ser defendido como *verdadero físicamente* ya que para él no había una *prueba* de ello. Galileo pensaba que el movimiento de las mareas era tal prueba. En la carta que Galileo le dirige a Orsini analiza diferentes formas en que el agua, contenida en un vaso, se puede mover. Afirma que una posibilidad es la inclinación del vaso. Ello equivaldría a cuando el agua corre en terreno inclinado, como en el caso de los ríos. Otra posibilidad que explora es alguna una causa externa, como el viento que produce olas en las superficie del agua. Y una tercera causa es el movimiento del mismo vaso, en donde si éste presenta movimiento errático, como aceleración o desaceleración, entonces el agua experimenta movimiento. Galileo argumenta, analógicamente, que el movimiento compuesto que experimenta la Tierra en el marco copernicano, movimiento rotacional y de traslación alrededor del Sol, causan el movimiento de las mareas. Este argumento lo utilizará en su obra de 1632, como veremos adelante.

Otro texto importante de Galileo en astronomía observacional fue el *Il Saggiatore (El ensayador)* que lo publicó en 1623 (*Assayer*, 1960). Este texto trata sobre la naturaleza de los cometas y es dirigido en contra del tratado sobre los cometas de Orazio Grassi (1583-1654) de 1618, quien era un jesuita del Colegio Romano. Galileo sostiene que los cometas son fenómenos ópticos y que por lo tanto no tienen paralaje, que es la medida angular de la posición aparente de un objeto, visto desde un punto de medición fijo. Galileo estaba equivocado en su tesis fundamental en este trabajo, sin embargo, lo importante de este libro radica en el estilo de razonamiento en que presenta los argumentos. Galileo sustituye el lenguaje aristotélico de la física, que se centraba como se dijo arriba en la descripción de cualidades enunciadas a través del lenguaje cotidiano, en un lenguaje más riguroso y analítico, e insiste en que el lenguaje en que se ha de describir la naturaleza es el matemático. Es en este libro donde enuncia una de sus más famosas frases:

La filosofía [natural] está escrita en este gran libro, que es el Universo, que está continuamente abierto a nuestra mirada, pero que no puede ser entendido a menos que uno primero aprenda a comprender el lenguaje e interprete los caracteres en que está escrito. Ésta escrito en el lenguaje de las matemáticas, y sus caracteres son los triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales sería humanamente imposible entender una sola palabra de él; sin ellas, uno permanece preguntando en un laberinto de oscuridad (en Finocchiaro, 2008: 183).

En 1632 publicó *Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo, el Ptolemaico y el Copernicano (Diálogo)*, 1997), en donde ataca el sistema del mundo Aristotélico y el sistema astronómico de Ptolemaico. Galileo había reunido evidencia observacional, especialmente las fases de Venus, las manchas del Sol, los satélites de Júpiter, un gran número de estrellas nunca antes observadas a simple vista, en contra de esos sistemas antiguos. En tales sistemas, se mantenía que la Tierra estaba fija en el centro del Universo y que alrededor de ella giraban todos los demás orbes. A pesar de no poder establecer las distancias aparentes de manera confiable a simple vista, se sostenía que el orden era el siguiente: la Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter, Saturno y la bóveda de estrellas fijas. Si ello fuera así, Venus no presentaría fases ya que ellas son el resultado de la iluminación del Sol al planeta y el hecho de que un planeta presente fases quiere decir que, desde la Tierra, se ve una parte del planeta con sombra, producto de la iluminación solar.

El libro se escribió en forma de diálogo, lo que le ayudó a Galileo a introducir un nuevo lenguaje en la física y una manera de aclararlo a través del diálogo. Éste se da entre tres personajes, Salviati, Sagredo y Simplicio. Salviati normalmente representa las opiniones de

Galileo, y típicamente está a favor de Copérnico; Sagredo representa a un hombre inteligente y razonable que pondera usualmente las opiniones discutidas e intenta encontrar las fallas como los aciertos de los argumentos. Simplicio sigue abiertamente las posiciones de Ptolomeo y Aristóteles, y en ocasiones llega a tener posiciones dogmáticas. Como el título lo indica, el libro es una discusión sobre dos sistemas del mundo, sin embargo, en la época había un tercer sistema que era el de Tycho Brahe (1546-1601), quien sostenía que la Tierra estaba inmóvil, la Luna y el Sol giraban alrededor de la Tierra y los demás planetas giraban alrededor del Sol. En realidad, este sistema fue aceptado con relativa rapidez en el mundo académico Jesuita de Roma y aparentemente es un misterio el que Galileo no lo discuta con detalle. Una razón que aparentemente tuvo Galileo fue que él pensaba que el movimiento de las mareas, el cual ya lo había estudiado y aparece en el *Diálogo*, era una prueba del movimiento rotacional de la Tierra. Si la Tierra estuviera inmóvil tal como lo afirmaban Aristóteles, Ptolomeo y Tycho, entonces no se podría explicar el movimiento de las mareas y en realidad no habría necesidad de reformular los conceptos de movimiento, porque la teoría del movimiento de Aristóteles es compatible con la teoría de Tycho (en la medida que ambos aceptan que la Tierra no se mueve). Sin embargo, sostener que la Tierra se mueve requiere urgentemente una nueva teoría del movimiento.

Los argumentos de Galileo en el libro son de tres clases. Los primeros proveen evidencia tanto observacional, astronómica y experimental contra la física y cosmología aristotélicas. Dicha evidencia es en gran medida la que había recogido desde su temprana formación. El segundo tipo de argumentos son objeciones que desde el sentido común se pueden formular a la tradición aristotélica, típicamente señalando contradicciones internas de las principales tesis de Aristóteles. Y el tercer tipo de argumentos, mucho más importantes desde nuestro punto de vista, son aquellos que muestran cómo la nueva teoría unifica explicativamente diferentes fenómenos tenidos antes como separados. Este último tipo de argumentos son importantes en la medida en que las explicaciones que unifican diferentes fenómenos son un rasgo epistemológico inherente en la ciencia moderna.

El último libro que Galileo publicó fue el *Discursos y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* de 1638 (*Two New Sciences*, 1974). Este libro enfrentó problemas para publicarse porque a partir de 1633, con el proceso que la Inquisición fincó contra Galileo, éste no podía publicar nada más. Finalmente, el libro fue publicado en Holanda, en donde la Inquisición no tenía una influencia importante. Si bien igualmente está escrito en forma de diálogo y aparecen los mismos personajes, cambia un poco las ideas y orientaciones que defienden. Simplicio representa a un Aristotélico aún más dogmático que en el *Diálogo*; Sagredo representa las ideas que anteriormente tenía el propio Galileo respecto a la física, las cuales fue cambiando a través de su madurez intelectual, y Salviati representa las ideas de Galileo a esa fecha.

El tema del libro se podría resumir como una ciencia de los materiales y una teoría movimiento. Aquí Galileo estudia la estructura y las propiedades de los materiales, y la relación que tienen esos materiales con su propia estructura. Por ejemplo, inicia el libro con una discusión sobre una demostración de las razones de que una estructura grande hecha a escala de una mucho más pequeña sea necesariamente más débil. Analiza igualmente el movimiento en caída libre y otros movimientos mediante artefactos construidos por él.

Galileo murió el 8 de enero de 1642, la navidad de ese mismo año nacería Isaac Newton.

II. Contexto histórico-filosófico de la ciencia de Galileo

Hacia principios del siglo XVII, en algunas partes de Europa, se amplió e incrementó el valor asociado a los descubrimientos en la Filosofía Natural en detrimento del ideal de conocimiento aristotélico. Uno de los rasgos epistemológicos del ideal de ciencia aristotélica era que la experiencia común fuera la base del conocimiento demostrativo, ya que éste requiere de premisas que sean verdaderas y la forma que adoptó Aristóteles de asegurar la verdad de tales premisas fue recurrir al stock de experiencias que son comunes a los seres humanos en situaciones normales de percepción. En las primeras décadas del siglo XVII algunos autores conservaron el ideal demostrativo pero montado ya no en el silogismo, sino en el experimento o en la matemática. Aquí, como vimos, es donde Galileo ocupó un lugar sobresaliente.

Muchos de los elementos del ideal aristotélico de conocimiento, como sus aspectos metafísicos, el tipo de explicaciones, la experiencia común como fuente confiable de evidencia, entre otros, serán fuertemente cuestionados por una buena mayoría de filósofos naturales, matemáticos y artesanos hacia fines del siglo XVI y durante las primeras décadas del siglo XVII con diferentes tipos de argumentos; aunque tal ideal fue también fuertemente defendido con argumentos ingeniosos, particularmente por los Jesuitas como Niccolo Cabeo (1586-1650). Una de las dificultades epistemológicas más serias que presentaba la teoría de la ciencia de Aristóteles, como bien lo señaló Galileo, era el recurrir a una noción de experiencia común y una observación crédula o ingenua. Particularmente, fueron dos tipos de críticas dirigidas contra la idea de que la experiencia común fuera la fuente adecuada de conocimiento empírico para la filosofía natural. El primero de ellos tiene que ver con el reconocimiento de que muchos fenómenos estaban fuera del rango de la observación común, no sólo en un sentido del alcance de los sentidos de la percepción aumentados y mejorados por el telescopio, microscopio e instrumentos de experimentación, sino también en un sentido conceptual, *i. e.*, conceptualmente la explicación de muchos fenómenos demandaba el abandono de un marco del sentido común. La nueva física galileana exigía un abandono de las intuiciones básicas de la experiencia común, sobre las cuales estaba montado el edificio aristotélico de ciencia. El segundo tipo de crítica se dirigía contra la manera en que el ideal aristotélico de conocimiento formula la relación entre observación y teoría. Como lo veremos adelante, en el marco aristotélico de ciencia las observaciones, o bien cumplen solamente una función ilustrativa del ideal de conocimiento silogísticamente demostrativo, o sólo constituyen apoyo probable y plausible en la explicación de fenómenos concretos.

Para Aristóteles había una garantía de la posibilidad de adquirir conocimiento que fuera incorregible y cierto, misma que se fundaba en la noción de que había ciertas «tendencias naturales» de la mente humana que apuntaban *por naturaleza* a la adquisición de tal conocimiento. Galileo modificó esa concepción del conocimiento de la naturaleza, basado en formas y naturalezas, y adoptó las regularidades generales. Galileo rechazó la idea de que el objetivo central de la filosofía natural fuera explicar las *formas* (en sentido aristotélico) que caracterizan el movimiento natural y el violento. Más bien consideró, como lo veremos adelante, que el movimiento violento era producto de una fuerza externa misma que intentó encontrar. Ello representa un *abandono ideas preconcebidas de cómo es el mundo, o sobre qué tipo de principios metafísicos explicativos deben incorporarse o ajustarse a los datos de la observación, y se sustituye por una búsqueda de posibles fenómenos, o posibles factores explicativos que deben establecerse como realmente existentes.* El ideal aristotélico de ciencia,

que se constituía mediante la estructura deductiva del silogismo, no tenía como fin cognitivo el *descubrimiento* sino la *enseñanza*. En el libro 1 capítulo 1 de los *Analíticos segundos*, Aristóteles sostiene que toda enseñanza y todo aprendizaje del pensamiento se producen a partir de un conocimiento preexistente y que tanto en matemáticas como en los argumentos silogísticos llevan a cabo la enseñanza a través de conocimientos previos. Tal como lo explica en detalle en el capítulo referido, Aristóteles correctamente se da cuenta del hecho de que las estructuras deductivas de pensamiento no son cognitivamente ampliativas, *i. e.*, no son una herramienta de descubrimiento.

Hacia principios del siglo XVII se generó gradualmente una situación ligeramente diferente: una gran variedad de posibles fenómenos inéditos en la tradición occidental de ciencia (como el que la Tierra sea un gran imán, que la Tierra se mueva o que el aire tenga peso, que los cometas sean fenómenos supralunares, entre otros muchos) no eran planteados (muchos de ellos ni siquiera concebidos) en teorías antiguas, con lo cual el primer paso era ofrecer *evidencia empírica* a su favor y en segundo lugar elaborar una *teoría* que los explicara. En otras palabras, se trataba de establecerlos como fenómenos legítimos en el marco de nuevas teorías, para lo cual era necesario redefinir o crear nuevas fuentes de información empírica, y someter a diferentes pruebas al nuevo fenómeno para asegurar su genuina existencia. Uno de los medios más eficientes para proveer información del mundo eran nuevas herramientas materiales: nuevos instrumentos de observación y toda una variedad de artefactos experimentales, y nuevas herramientas teóricas: nuevas (y más poderosas) matemáticas. Galileo conservó el ideal demostrativo de ciencia pero montado en las matemáticas, con lo cual debía de interpretar los datos de la experiencia de manera diferente a lo realizado en la antigüedad donde eran interpretados mediante cualidades aristotélicas, tal como explícitamente lo formula en *El ensayador* (*Assayer*, 1960).

III. Galileo y el ideal aristotélico de ciencia demostrativo en la aplicación de la investigación del mundo natural

La ciencia de Aristóteles está dirigida a estudiar las cosas *tal y como nos aparecen*. Para Aristóteles la naturaleza de una cosa tiene que explicarse a través del comportamiento de dicha cosa en su estado natural, sin modificaciones o alteraciones que podamos infligir en la cosa natural estudiada, ya que tales imposiciones artificiales serán más bien una interferencia en nuestro conocimiento. Por ejemplo si, a pesar de nuestra interferencia sobre el objeto, éste se comporta de la misma forma que lo hacía antes, entonces nos hemos molestado en vano, si se comporta de manera diferente, entonces ya no será el mismo objeto, y habremos alterado su naturaleza, que era justamente lo que originalmente interesaba estudiar y comprender. Esa es una de las principales razones de la ausencia de una noción de experimentación sistemática en el estudio de la naturaleza por parte de Aristóteles. Ahora bien, más que elaborar explicaciones demostrativas en el descubrimiento de nuevos fenómenos, Aristóteles utiliza analogías tomadas de las experiencias cotidianas para hacer más inteligible un fenómeno remoto. Las experiencias que invoca no tienen valor probatorio, aunque para Aristóteles no era necesario que lo tuvieran. El empirismo de Aristóteles, si bien teóricamente concebido es pulcro, en la práctica no sólo no se ajusta con el ideal demostrativo de ciencia sino que es defectuoso en la investigación empírica concreta.

Tenemos, por lo tanto, en Aristóteles una tensión entre el ideal de conocimiento demostrativo y la investigación concreta de fenómenos particulares. El ideal de conocimiento se

funda en la idea de que el conocimiento genuino es la *episteme* cuyo arreglo y organización exhibe una cadena deductiva, donde las premisas deben ser «verdaderas, primeras, inmediatas, más conocidas, anteriores y causales respecto a la conclusión.» (*Analíticos segundos* I, 2, 71a21. En Barnes, 1975). De acuerdo con este ideal, obtenemos conocimiento científico cuando elaboramos explicaciones causales. Aristóteles enfatiza que el rasgo epistemológico crucial de una explicación es su grado de generalidad. Aristóteles no apunta a explicar causas particulares de eventos individuales, sino que está interesado en explicar los patrones generales que son invariables y que forman parte de la estructura del mundo. Con lo cual tenemos una tensión en el corpus aristotélico entre su ideal de conocimiento (que demanda conocimiento empírico cierto) y sus investigaciones empíricas concretas (muchas de las cuales alcanzan sólo conocimiento probable). A dicha tensión la podríamos llamar *satisfacibilidad metodológica*, que se podría formular de la siguiente manera: cómo llevar a cabo investigaciones empíricas que satisfagan el ideal silogístico-demostrativo de ciencia, ese será el que Galileo enfrentará.

Ptolomeo abandonó el ideal de conocimiento *silogístico*-demostrativo y más bien llevó a cabo el ideal *matemático*-demostrativo⁴. A mediados del siglo XVI, tal tensión aristotélica se hizo patente de una forma interesante. Hubo diferentes debates hacia finales del siglo XVI respecto a si la certeza debía ser atribuible al razonamiento matemático o al silogístico (Machamer, 1998: 55), lo cual es un indicio de algunas dificultades que presentaba la idea de *demonstración* en un contexto en el que se descubrían nuevos fenómenos. Hacia mediados del siglo XVI, por ejemplo, Petrus Ramus (1515-1572) sostenía la necesidad de sustituir la vieja lógica aristotélica, que toma su orientación y herramientas de la gramática, por una nueva teoría del pensamiento inspirada en la geometría. Ramus demandaba tal cambio puesto que creía en una cierta evolución «natural» del espíritu humano en la cual el lenguaje ocupaba un lugar preponderante. En ese sentido, el lenguaje de la matemática no sólo sirve para clasificar y dominar la gran cantidad de objetos a nuestro alrededor, sino que es un instrumento para aguzar el espíritu y acercarlo al conocimiento genuino. Se trataba en algunos autores, de colocar a las matemáticas como un sustituto de la filosofía aristotélica-escolástica centrada en el silogismo. El mismo Galileo muestra en varios lugares de los *Diálogos sobre los principales sistemas del mundo* este rechazo aristotélico por la demostración matemática, al hacer decir a Simplicio, el defensor de tesis aristotélicas que: «afirmaré con Aristóteles que en las cosas naturales no siempre se debe buscar una necesidad de demostración matemática» (*Diálogo*, 1997: 13). El silogismo, por el contrario, requiere en primer lugar, una noción «ingenua» de experiencia cotidiana, mediante la cual se justifique la idea de que en la medida en que se apele a experiencias compartidas por la mayoría de los seres humanos en (situaciones normales), obtendremos verdades observacionales primeras, inmediatas y más conocidas. Tales verdaderas le dan contenido empírico a las premisas del silogismo. La concepción de experiencia que el silogismo requiere es «ingenua» por diferentes razones. En primer lugar, porque no siempre tales experiencias proveen conocimiento observacional completamente verdadero, sino sólo probable, tal como Aristóteles lo reconoce al afirmar que su explicación del calor asociado al Sol se basa en la *plausibilidad* de indicios. En segundo lugar, como sabemos, muchos de los médicos antiguos de la Escuela empírica rechazaron tajantemente esa noción de experiencia y mostraron que incluso la más elemental de las observaciones puede ser juzgada de manera diferente por diferentes observadores. Dadas esas dificultades

4 En el caso de Ptolomeo es preciso enfatizar el hecho que él no tiene un objetivo epistémico moderno, respecto a la astronomía posicional, de *descubrir* nuevos fenómenos celestes.

con la idea de experiencia común como base «segura» para el conocimiento demostrativo, el ideal mismo de conocimiento demostrativo de fenómenos naturales estaba a un paso de ser socavado desde sus propios fundamentos.

IV. Galileo: observación, experimentación y abstracción

William Gilbert (1544-1603) intentó proveer una nueva fuente de conocimiento sistemático mediante el uso de experimentos con el fin de proveer conocimientos demostrativos de fenómenos magnéticos, lo cual era completamente antiaristotélico desde un punto de vista epistemológico. Sin embargo, con ese cambio Gilbert estaba planteando tácitamente una pregunta metodológica general, a saber, ¿cómo desarrollar una filosofía natural con pretensiones cognitivas demostrativas partiendo de experimentos como fuente de evidencia observacional y evidencia probatoria, no ya de datos de la experiencia común? El trabajo y enfoque de Gilbert fue importante para Galileo. Una de las salidas al problema de las diferentes interpretaciones que padecían tanto la experiencia común como los experimentos fue la *abstracción*, ampliamente desarrollada por Galileo Galilei.

Particularmente claro es el caso de Galileo para quien el análisis de los fenómenos naturales, específicamente aquellos asociados con el movimiento, se reduce a las condiciones más simples y se realiza mediante un proceso de abstracción de todos los elementos del mundo real que asociamos a la observación directa de las cosas *tal y como estas se nos presentan*. En Galileo, como en otros muchos autores del siglo XVII, fenómenos tales como la resistencia del aire, la fricción, los diferentes comportamientos de cada cuerpo, los aspectos cualitativos del mundo real (elementos todos ellos fundamentales en la idea aristotélica de observación) son interpretados como fenómenos irrelevantes o como circunstancias incómodas, que no se deberían tomar en cuenta en la explicación del mundo ni en su concepción física. A diferencia de la idea de observación y de experiencia aristotélicas, para Galileo los fenómenos en su particularidad y en su concreción inmediata, el mundo de las cosas cotidianas tal como las percibimos y las observamos, no ejerce ya ningún rol explicativo. De hecho, el reconocimiento de Gilbert de que son los experimentos los que nos proporcionan fuentes genuinas de información sobre el mundo empírico, y que incluso su advertencia de que muchos resultados experimentales nos parecerán poco creíbles, son indicios de una cierta idea generalizada a inicios del XVII respecto a que la experiencia común es insuficiente tanto para entender y concebir los fenómenos bajo investigación como para explicarlos⁵. *Una de las ideas que florecieron en este siglo fue que los fenómenos que observamos, y que eventualmente requerirán explicación, deben ser reinterpretados en términos abstractos, eliminando todos aquellos rasgos del mismo fenómeno que son observados*. En estricto sentido ello no es una inferencia de los efectos a las causas, es simplemente reinterpretar los fenómenos en términos no observacionales.

El problema del movimiento fue una de las principales preocupaciones de Galileo. El problema era, en síntesis, que si Copérnico tenía razón y la Tierra se mueve, entonces es necesaria una nueva teoría del movimiento porque la física aristotélica supone que la Tierra

5 Aquí es necesario ser muy precisos. Una buena mayoría de los estudiosos del desarrollo de la filosofía natural del siglo XVII, sostiene que una de las innovaciones durante este periodo fue la demanda de que la ciencia explicara lo observado a partir de lo inobservado. Sin bien, ésta efectivamente fue una insistencia de muchos autores del siglo XVII, no fue una idea novedosa puesto que proviene de un gran número de médicos antiguos.

es fija. Si la Tierra se mueve, la teoría del movimiento de Aristóteles es falsa, pero al mismo tiempo no había evidencia directa del movimiento de la Tierra. Galileo desarrolló una nueva teoría del movimiento de una Tierra en movimiento como si fuera inmóvil. Galileo sostenía que el tipo de movimiento que más plausiblemente era «afectado» por una fuerza externa era el movimiento acelerado. En *Dos nuevas ciencias*, Galileo analiza este tipo de movimiento hacia el final de la tercera jornada. Este es un buen lugar de la obra de Galileo para examinar su concepción respecto a la manera de considerar en qué sentido (nuevo) concebía a la experiencia como fuente de conocimiento. Tratando sobre el tema de la aceleración que experimenta un grave en caída libre, Galileo, en voz de Salviati, afirma que la experiencia debe ser analizada con detalle debido a que una misma experiencia puede ser confusa respecto a la conclusión que hemos de obtener de su análisis. «Parece», dice Salviati a Sagredo, «que la experiencia muestra que apenas un grave ha salido de su posición de reposo, adquiere una velocidad muy apreciable. Pues bien, yo os aseguro que es esta misma experiencia la que os hace patente que los primeros movimientos del cuerpo que cae, por muy pesado que sea, son enormemente lentos.» (*Two New Sciences*, 1974, sec. 199). Galileo analiza dicha experiencia mediante un experimento que utiliza una superficie blanda como lugar de choque del cuerpo en caída, de tal forma que pueda ser observada la fuerza del impacto en dicha superficie. Y advierte que contrariamente a lo que se piensa en un primer momento, efectivamente la velocidad de inicio de un cuerpo en caída libre es muy lenta. Con ello advierte: «es la misma experiencia que suscita la dificultad, la que se encarga de resolverla, ya que la misma experiencia, que en un principio parecía mostrarnos una cosa, una vez que la observamos más de cerca, nos asegura lo contrario.» (en Finocchiaro, 2008: 183). Galileo recurre al análisis detenido de la experiencia ordinaria porque parte de la convicción de que en muchas ocasiones las conclusiones derivadas de ella son erróneas. No se trata de que los sentidos nos engañen, sino que más bien en que busca formas de asegurar que las conclusiones que derivamos a partir de la experiencia sean correctas, por ejemplo, por medio de experimentos que permiten, entre otras cosas, realizar detallados análisis de los fenómenos de la experiencia.

En varios lugares Galileo pone en tela de juicio el valor de la experiencia en el sentido de una información inmediata de los sentidos, que es una de las características centrales que requiere el ideal aristotélico demostrativo de conocimiento. Insiste Galileo en la complejidad de la relación entre experiencia y teoría, entre los datos que recogemos y la forma en que se interpretan, así como en la ingenuidad de ese empirismo aristotélico.

De acuerdo con Galileo, la ausencia de criterios de evaluación de las conclusiones observacionalmente obtenidas genera relatos ficticios acerca del mundo. Un poco más adelante de su discusión sobre el movimiento acelerado afirma lo siguiente:

No me parece éste el momento más oportuno para investigar la causa de la aceleración de movimiento natural y en torno a la cual algunos filósofos han proferido distintas opiniones. Algunos la han explicado por la proximidad al centro; otros, por la disminución de la parte del medio que queda por atravesar; otros, finalmente, por cierta impulsión del medio ambiente, el cual, al volver a cerrarse por detrás del móvil, lo va presionando y proyectando continuamente. *Tales fantasías, aparte de otras muchas, habría que irlas examinando y resolviendo con bien poco provecho.*» (*Two New Sciences*, 1974: 284, énfasis mío).

Las explicaciones que menciona Galileo, ofrecidas desde tiempos antiguos, se apoyan en presupuestos metafísicos que Galileo, entre otros muchos, consideran como meras fantasías. Esta referencia, común en varios autores de inicios del siglo XVII, respecto a que muchas

de las explicaciones en la filosofía natural son meras fantasías revela una demanda tácita a favor de tener una base empírica y métodos de prueba de las explicaciones que se ofrezcan de fenómenos naturales. Este tipo de explicaciones son para Galileo creaciones libres del pensamiento sin base empírica para que las respalde y sin criterios empíricos de elección. Lo que Galileo consideraba *fantasías* eran explicaciones centradas más bien en principios metafísicos aceptados (dogmáticamente), más que conclusiones obtenidas del análisis cuidadoso de los datos observacionales y experimentales. Tales explicaciones debían de concordar más con principios metafísicos que con la información empírica experimentalmente obtenida y con diferentes métodos de prueba.

Galileo no se conforma con establecer nuevos fenómenos o formular antiguos problemas de manera diferente, por ejemplo el de la aceleración, sino también está interesado en *probar* empírica y matemáticamente sus conclusiones. En ese sentido, la intención de Galileo en cuanto al análisis del movimiento acelerado es

investigar y demostrar algunas propiedades del movimiento acelerado (sea cual sea la causa de tal aceleración) [...] Y si nos encontramos con que las propiedades que serán demostradas más adelante se dan en el movimiento de los graves que caen naturalmente acelerados, podremos concluir que la definición que hemos supuesto incluye tal movimiento de los graves y que es cierto que la velocidad de dichos graves va aumentando en proporción al incremento del tiempo y de la duración del movimiento (*Two New Sciences*, 1974: 285).

En lugar de investigar los factores externos ejercidos en cuerpos en caída libre, mismos que son responsables de la aceleración, sobre la base de la naturaleza metafísica de las cosas, *i.e.* de sus cualidades, Galileo propone descubrir y demostrar las regularidades del movimiento. El problema con las diferentes explicaciones metafísicas que se han ofrecido sobre este fenómeno es que no admiten solución empírica.

Galileo, contrariamente a las tradicionales explicaciones más bien de corte metafísico del mundo físico, establece relaciones matemáticas de las regularidades que descubrió respecto al movimiento de los cuerpos. Regularidades que son expresadas mediante formulaciones precisas tanto de diferentes objetos particulares concretos como de regularidades que describen movimientos de clases de objetos, como los proyectiles. A pesar de que Galileo ha sido asociado con ideas neo-pitagóricas y neo-platónicas, lo cual al margen de ser verdad, lo que interesa resaltar es el hecho de que la manera en que empleó las matemáticas mediante supuestos metafísicos diferentes a tales corrientes filosóficas. Para Galileo, las matemáticas no describen la esencia metafísica profunda y subyacente del mundo, tal como sí lo pretende hacer, por ejemplo, el silogismo aristotélico, el cual pretendidamente describía una estructura ontológica de las esencias de las cosas. Las matemáticas para Galileo, son solamente una herramienta que describe los movimientos observables de las cosas, una herramienta que registra las regularidades en un lenguaje conveniente. La física de Galileo no es, estrictamente hablando, una física construida con base en datos directamente observados. Galileo deja de lado elementos que tradicionalmente se consideraron *físicos* y que eran directamente observados como parte de la experiencia común. Por ejemplo, la afirmación de Galileo de que la caída libre *en el vacío* de dos objetos de pesos diferentes será con la misma velocidad, es un fenómeno no directamente observado en el tiempo de Galileo⁶, por lo que tuvo que inferir este fenómeno a partir de la interpretación cuantitativa de los datos de la experiencia.

6 Alrededor de treinta años después de la muerte de Galileo, Robert Boyle llevó a cabo el experimento de dejar caer simultáneamente a dos objetos de pesos diferentes en el vacío, creado por la bomba de vacío

Para Galileo, Aristóteles se equivocaba en afirmar que la velocidad de caída de los cuerpos es directamente proporcional a su peso e inversamente proporcional a la resistencia del medio. Galileo considera, en *Dos nuevas ciencias*, que una bola de 50 kilos llegará al suelo dos dedos antes que otra bola de medio kilo. Según Aristóteles, cuando la bola grande alcanzara el suelo la pequeña sólo habría recorrido 60 centímetros. Galileo llega a la conclusión de que en un medio que no ofrezca resistencia, todos los cuerpos caerán con la misma velocidad, sin embargo, afirma que la resistencia del medio terminará imponiendo una velocidad final a un cuerpo si cae desde una altura suficientemente grande. Galileo admite que si bien no es posible hacer experimentos con cuerpos que caigan en el vacío, es un asunto que se puede explorar extrapolándolo a un medio muy sutil como el aire. Muchos de los nuevos fenómenos que Galileo intenta establecer no cuentan con evidencia observacional directa. El objetivo de Galileo era que intentaba establecer diferentes fenómenos, considerados por la tradición como inexistentes o absurdos, y al mismo tiempo construir una teoría con supuestos diferentes a los dominantes en la tradición aristotélica. Al introducir la idea de vacío, por ejemplo, Galileo se distancia del objetivo central de la física aristotélica que apelaba a explicar la naturaleza tal y como se nos presenta. Para Aristóteles introducir el vacío como principio explicativo era una fantasía, algo irreal, sin embargo, Galileo sostiene que a partir del cuidadoso análisis de los datos de la observación él puede concluir cómo sería el comportamiento de los cuerpos en el vacío. En el fondo, tales diferencias entre las dos teorías físicas son una discrepancia respecto a qué supuestos no empíricos aceptar al analizar los datos observacionales, cómo interpretarlos y qué cuenta como evidencia observacional a favor de un determinado fenómeno, en este caso la caída de los graves en el vacío. Según Galileo, la extrapolación que hace se ajusta a lo que realmente sucede, porque podemos *calcular* lo que supondría la resistencia del aire sobre la caída libre de cuerpos que tuvieran distintas gravedades específicas. Galileo, en voz de Salviati, sostiene que a primera vista parece improbable que el peso no tenga nada que ver con la velocidad de caída, por lo que muchas de las proposiciones que presenta, como lo reconoce Sagredo (que representaba el punto de vista prudente e equilibrado), se encuentran muy alejadas de las opiniones y enseñanzas comunes. Piensa Sagredo que la publicación de esas ideas podría provocar la oposición de muchos adversarios, ya que así es la actitud común de muchas personas que juzgan a quienes descubren nuevas verdades y que exhiben muchas de las falsedades que se habían pasado por alto. Galileo explica las dificultades que encierra medir con precisión la caída de los cuerpos. Si la duración de la caída es grande, el aire afecta demasiado a los cuerpos ligeros, si es corta, resulta difícil determinar si los cuerpos pesados y ligeros llegan simultáneamente al suelo o casi al mismo tiempo. Por ello utiliza planos inclinados, para que los movimientos sean más lentos y poder realizar repetidas observaciones.

recientemente inventada, y comprobó experimentalmente las conclusiones de Galileo. Sin embargo, muchos de los contemporáneos de Boyle criticaron sus experimentos.

V. Evidencia observacional y probabilidad en el establecimiento de nuevos fenómenos celestes

Galileo no fue astrónomo en el sentido usual del término, tal como Ptolomeo, Copérnico, Kepler⁷ o quienes hacían observaciones astronómicas, modelos matemáticos del cielo, derivaban parámetros de tablas celestes y calculaban posiciones del Sol, la Luna y los planetas. Sin embargo, llevó a cabo el descubrimiento de fenómenos celestes jamás concebidos por cualquiera de los astrónomos de la antigüedad. Eran fenómenos completamente insólitos no sólo para la antigua tradición astronómica de la cual el mismo Galileo era heredero, sino que, a diferencia de sus estudios sobre el movimiento, sólo contaba con evidencia observacional para establecerlos como fenómenos genuinos. Tal como lo vimos, en *El mensajero de los cielos* recogía sus observaciones realizadas a diferentes cuerpos celestes con ayuda de su recién mejorado telescopio. Con este pequeño trabajo Galileo se declaraba abiertamente defensor de la teoría copernicana de los cielos. Como arriba vimos, los fenómenos celestes que Galileo reporta como observados en *El mensajero de los cielos* son: las montañas y valles de la Luna, gran número de estrellas nuevas, los satélites de Júpiter (Galilei, 1610). Posteriormente en una obra titulada *Sobre los cuerpos en agua* de 1612, Galileo reporta sus observaciones de la forma oblonga de Saturno, ya que Galileo nunca supo de los famosos anillos de este planeta. También de las manchas solares y las fases de Venus, ambos fenómenos reportados en el mismo libro así como en algunas de las cartas dirigidas a Mark Welsler, un rico comerciante austriaco y entusiasta científico amateur, publicadas bajo el título de *Cartas sobre las manchas solares* en 1613. Esos tres años, que van de 1610 a 1613, fueron determinantes en toda la historia de la astronomía observacional y en la concepción del universo hasta ese momento, ya que desde la antigüedad los escasos fenómenos celestes nuevos que se habían reportado habían sido ignorados, entre otras razones, por la falta de instrumentos de observación adecuados. Durante esos tres años Galileo aportó las principales pruebas empíricas (observacionales) en contra de la cosmología aristotélica, y de hecho las presentó como inconsistentes con la teoría de Ptolomeo. Para Galileo, era posible creer con seguridad en la existencia de los nuevos fenómenos celestes, aunque tuvo que armar la evidencia observacional de manera diferente para cada caso, puesto el sólo ver a través del telescopio no era suficiente para entender lo que estaba viendo. Galileo no pudo establecer correctamente todos los fenómenos que observó, por ejemplo, nunca supo por qué la forma de Saturno se veía oblonga en ocasiones y en otras como con dos grandes estrellas a cada lado del planeta. Fue hasta 1659, diecisiete años después de la muerte de Galileo, que Huygens estableció que se trataba de un fino anillo, que no tocaba al planeta y con cierta inclinación respecto al plano de la eclíptica. Una sola observación a través del telescopio no era suficiente para establecer qué era el fenómeno observado.

De entre los diferentes fenómenos que Galileo observó, distinguió aquellos fenómenos que eran categóricamente verdaderos, como el hecho de que Venus orbita alrededor del Sol; de otros que sólo eran probables, como la naturaleza de Saturno. Para Galileo, muchas de las antiguas creencias sobre los cielos debían ser abandonadas porque simplemente eran falsas a la luz de la nueva evidencia observacional mediante el telescopio. En este sentido, afirma que «... nosotros podemos teorizar mucho mejor que Aristóteles sobre las cosas del cielo, porque al confesar éste que tal conocimiento le es difícil por su lejanía de los sentidos,

7 Véase en este mismo volumen el artículo de Inmaculada Perdomo Reyes, «J. Kepler (1571-1630): la creatividad y el rigor en la búsqueda de la armonía del mundo» (*comps.*).

está aceptando que aquel a quien los sentidos pudiesen representarse mejor el cielo, podría filosofar sobre éste con mayor seguridad. Ahora bien, nosotros, gracias al telescopio nos lo hemos acercado treinta o cuarenta veces más de lo que estaba para Aristóteles, de modo que podemos captar en el cielo cien cosas que él no pudo ver. Entre otras, estas manchas en el Sol, que le fueron absolutamente invisibles. Por tanto, sobre el cielo y el Sol, nosotros podemos hablar con mayor seguridad que Aristóteles.» (*Diálogo*, 1997, sec. 80). Sin embargo, es importante enfatizar el hecho de que para Galileo, no todos los fenómenos que observó tenían el mismo grado de certeza⁸.

Consideremos el caso de Venus. Si la Tierra estuviera fija, como en el sistema de Ptolomeo, y si el orden planetario fuera primero Venus y después el Sol, al ser observado Venus desde la Tierra, aquél aparecería como un semicírculo de mayor o menor tamaño y anchura. Si el orden fuera primero el Sol y después Venus, entonces éste siempre aparecería como un disco. Pero si se moviera alrededor del Sol, como en los sistemas de Copérnico y de Tycho, variaría de un pequeño disco cerca de la conjunción superior a un semicírculo grande cerca de la conjunción inferior. Durante 1610, Galileo estableció observacionalmente a través del telescopio que Venus presentaba fases lo cual significaba que se movía alrededor del Sol. Galileo sabía que establecer observacionalmente que Venus gira alrededor del Sol, era evidencia contra la teoría de Ptolomeo y a favor de la Copérnico y de la de Tycho. La evidencia provista por Venus era una confirmación empírica de la teoría de Tycho y una confirmación empírica parcial de la teoría de Copérnico, pero no una «prueba» empírica directa de que la Tierra se moviera alrededor del Sol. Las observaciones que Galileo llevó a cabo de Júpiter fueron igualmente evidencia observacional indirecta tanto a favor de Copérnico como de Tycho. El 7 de enero de 1610, Galileo observó a Júpiter y encontró dos pequeñas estrellas brillantes en el lado este del planeta y una al oeste. Al siguiente día observó que todas estaban del lado oeste. Consideró que posiblemente Júpiter se había movido al este, aunque las tablas celestes indicaban que más bien en esa época del año Júpiter tenía un movimiento retrogrado hacia el oeste. La siguiente observación la realizó dos días después debido a la presencia de nubes la noche anterior y observó sólo dos estrellas en el este, la que faltaba podía estar detrás del planeta. Para el 11 de enero había llegado a una conclusión, las tres estrellas pequeñas de movían alrededor de Júpiter, tal como lo hacían Venus y Mercurio alrededor del Sol. El 13 del mismo mes descubrió una cuarta estrella y continuó sus observaciones hasta el 2 de marzo, estableciendo los periodos orbitales de cada una de ellas alrededor de Júpiter. Ninguna de las observaciones celestes era evidencia probatoria de que la teoría de Copérnico fuera correcta. Galileo sabía esto y buscó probar empíricamente mediante el estudio de las mareas que la Tierra tiene movimiento.

Galileo utilizó argumentos probables en cuanto al apoyo que los nuevos fenómenos celestes observados por él le conferirían a la teoría de Copérnico. Es muchas veces difícil determinar si varios de los argumentos de probabilidad que Galileo elaboró son debido a razones epistemológicas o más bien son producto de la prudencia ante los constantes acosos de la Inquisición. Sin embargo, en algunos casos podemos argüir con cierta plausibilidad sus razones epistemológicas. El sentido de «probabilidad» que Galileo utiliza está más bien asociado al sentido antiguo derivado de los argumentos *dialécticos*, los cuales tienen que ver con argumentos que alcanzan conclusiones verosímiles, plausibles o susceptibles de aprobación. Un lugar interesante en donde Galileo utiliza razonamientos probables es en el *Discurso*

8 El artículo de Hald (1986), analiza cuidadosamente las consideraciones epistemológicas que hizo Galileo respecto a la inevitable introducción de errores en las observaciones astronómica, y la manera de evaluarlas con base en consideraciones probabilísticas.

cuando discute si es posible que la bóveda de las estrellas fijas dé una vuelta cada veinticuatro horas, siendo que parece que las esferas celeste se moverían más lentamente entre más alejadas estén de la Tierra fija. Afirma lo siguiente: «... no presento esta introducción [de los varios movimientos que requiere la Tierra] como imposible, ni pretendo deducir a partir de ahí una demostración necesaria [del movimiento único], sino sólo una mayor probabilidad.» (*Two New Sciences*, 1974: 143). Al igual que Ptolomeo, quien reconocía por ejemplo que el orden de los planetas era un asunto sólo probable, Galileo reconoce que muchos fenómenos sólo es posible establecerlos con cierta probabilidad, sin embargo, es interesante reparar en el hecho que es precisamente uno de los fenómenos que Ptolomeo consideraba *demostrado* empíricamente (la inmovilidad de la Tierra) el que Galileo considera como *probable*.

Galileo distingue entre probabilidad real de la mera fuerza retórica de los argumentos. Afirma que «... no se puede negar que vuestra argumentación sea ingeniosa y resulte bastante probable. Con todo, quiero decir probable en apariencia, pero no auténtica y realmente...» (*Diálogo*, 1997: 468). Sin embargo, es consciente de que no hay pruebas que puedan demostrar la movilidad de la Tierra ya que Galileo piensa que siendo el movimiento relativo, no puede haber una diferencia observacional entre la teoría de Ptolomeo y la de Copérnico respecto al movimiento de la Tierra. Galileo sostiene que no puede haber una demostración de ninguna de las dos teorías, puesto que ambas teorías pueden explicar los mismos efectos. Recordemos que Ptolomeo planteaba un argumento similar en cuanto a que con base en la evidencia observacional astronómica, no es posible determinar si es la Tierra o la bóveda de las estrellas fijas, las que se mueven, y que Ptolomeo rechaza la teoría de la movilidad de la Tierra debido a supuestas consecuencias físicas observacionales que deberían presentarse en la superficie de la Tierra si ésta rotara. Por lo tanto, Ptolomeo y Galileo coinciden en sus juicios (incluso en la estructura de sus argumentos) sobre lo que la evidencia observacional puede, o no puede, establecer en cuanto a la movilidad de la Tierra; sin embargo, no coinciden en los supuestos físicos básicos. Galileo, no obstante, admite que sus argumentos de la movilidad de la Tierra son sólo probables. Lo afirma de la siguiente forma:

Si la totalidad de los efectos que en la naturaleza pueden depender de tales movimientos se siguiesen exactamente las mismas consecuencias tanto de una tesis como de la otra, por lo que a primera vista y de modo general se me ocurre, yo estimo, que el que creyese que es más razonable hacer mover todo el universo, para mantener quieta la Tierra, sería menos razonable que el que, habiendo subido a lo alto de vuestra Cúpula sólo para dar un vistazo a la ciudad y a sus alrededores, pidiese que se hiciera girar en torno suyo todo el paisaje para no tener que fatigarse girando la cabeza. Y tendrían que ser muchas y muy grandes las ventajas que se sacaran de la primera tesis [la de Aristóteles] y no de la última [la de Copérnico], que en mi mente compensaran este absurdo e incluso lo superaran, para que la primera me pareciese más creíble que la última (*Diálogo*, 1997: 141).

Ya antes en el *Diálogo* había analizado la probabilidad del movimiento de la Tierra. En la segunda jornada, Galileo sostiene que a la luz de ciertos argumentos físicos que analizó: parece que no resulta del todo improbable que el giro diurno sea más bien de la Tierra que de todo el resto del universo. Yo no os las propongo como leyes inquebrantables, sino como razones que tienen alguna verosimilitud. Y puesto que comprendo perfectamente que una única experiencia o demostración concluyente que se tuviese en contra, bastaría para echar por tierra estos y otros cien mil argumentos probables, por ello no hay que detenerse aquí, sino avanzar y oír lo que responde el Sr. Simplicio [quien representa a un aristotélico dogmático], y qué posibilidades mejores o qué argumentos más firmes aducen en contra (*Diálogo*, 1997: 148).

Galileo reconoce el valor categórico de una experiencia demostrativa, en la cual no cabe lugar a dudas para creer lo contrario, sobre los argumentos probables; no obstante, no hay tales experiencias categóricas respecto a la movilidad de la Tierra. Los fenómenos que ha encontrado que apoyan la idea copernicana de movilidad de la Tierra no son *pruebas empíricas directas* a favor de la teoría, sino sólo *apoyo indirecto diferenciado*. «Diferenciado» en el sentido de que los nuevos fenómenos celestes apoyaban con diferente grado de certeza a la teoría Copernicana.

VI. La rotación magnética de la Tierra y la interpretación de Galileo de la evidencia experimental de William Gilbert

Proveer evidencia firme a favor del movimiento de la Tierra era una de las prioridades de Galileo, de hecho en la cuarta jornada del *Diálogo* (*Diálogo*, 1997), Galileo explora la tesis de que la rotación de la Tierra puede detectarse mediante el estudio de las mareas. William Gilbert había ofrecido, a principios del siglo XVII, evidencia a favor del movimiento de la Tierra través del estudio experimental de fenómenos magnéticos. Sabemos, por correspondencia que mantuvo con Sarpi y Sagredo, amigos y discípulos de Galileo, que desde 1602 Galileo estuvo haciendo experimentos con imanes y que había leído el *De Magnete* (Gilbert, 1958). Al final de la tercera jornada de su *Diálogo*, Galileo dedica un análisis con cierto detalle a los trabajos de Gilbert, el cual revela interesantes diferencias respecto a qué afirmaciones apoya la evidencia experimental de Gilbert y en qué grado. Si bien Galileo compartía hasta cierto punto las conclusiones de Gilbert, abrigaba ciertas dudas, especialmente en cuanto a la interpretación de la evidencia experimental. Galileo dice de Gilbert lo siguiente:

Yo alabo, admiro y envidio al máximo a este autor por el hecho de que se le ocurriera una idea tan excelente acerca de una cosa manejada por innumerables ingenios sublimes, ninguno de los cuales la advirtió. Además me parece digno de grandísima alabanza por las numerosas observaciones nuevas y verdaderas que hizo, para vergüenza de tanto autores mendaces y vanos que escriben no sólo lo que saben, sino todo lo que oyen decir al estúpido vulgo sin tratar de comprobarlo con la experiencia, acaso para no menguar sus libros (*Diálogo*, 1997: 432).

No sería exagerado decir que este elogio de Galileo se sintetiza en gran medida el nuevo espíritu de investigación que caracterizará al siglo XVII. Se trata de descubrir y someter a prueba nuevos fenómenos a través de observaciones y experimentos, y dejar de lado a la autoridad antigua como fuente de evidencia para explicar la naturaleza de los fenómenos del mundo. Sin embargo, para Galileo hizo falta un componente epistemológico fundamental para interpretar correctamente la evidencia experimental:

Lo que habría deseado de Gilbert es que hubiese sido algo más matemático y, en particular, buen conocedor de la geometría, cuya práctica lo habría hecho menos resuelto a la hora de aceptar como demostraciones concluyentes las razones que él presenta como causas verdaderas de las conclusiones que observó. Estas razones (hablando sinceramente) no atan y constriñen con la fuerza con que indudablemente deben hacerlo las que pueden aducirse de las conclusiones naturales, necesarias y eternas (*Diálogo*, 1997: 432).

Esta objeción es parte del problema sobre cual tipo de conocimiento es susceptible de demostración matemática cuando lo que se intenta es entender y explicar fenómenos naturales. Pero en realidad esta no es la única objeción que Galileo le dirige a Gilbert. Hacia el final de la cuarta jornada, afirma Galileo que hubiera preferido que Gilbert no hubiera dado crédito al hecho de que admita que una pequeña esfera de imán pueda girar sobre sí misma, siempre que

fuera posible equilibrarla de manera exacta. Según Galileo, no habría ninguna razón para que esto ocurriese ya que al asignarle una rotación en torno al propio centro sería como atribuirle un segundo movimiento muy distinto al primero, con lo cual serían dos movimientos, *i. e.*, uno cada veinticuatro horas y el otro girando en torno al suyo. Si Gilbert está hablando teóricamente de un movimiento que es justamente el tipo de movimiento que Galileo está intentando establecer, no dejan de ser extrañas las críticas de Galileo.

Una posible explicación de este curioso caso es el hecho de que en lo que no concordaban era en los supuestos no empíricos mediante los cuales interpretaban el mundo físico. Como vimos arriba, Galileo interpretaba el problema físico que analizaba en términos abstractos y reducía la concepción del fenómeno a sus relaciones mínimas. A pesar del énfasis en la experimentación, Gilbert mantiene muchas creencias provenientes del pensamiento mágico renacentista, en el cual hay toda una trama de fuerzas ocultas, analogías, influencias, etcétera. Si bien Gilbert explícitamente quería dejar atrás muchas de las típicas explicaciones mágicas del magnetismo, seguía concibiendo a la fuerza magnética como animada o como una imitación de la vida. Es muy plausible que Galileo haya considerado la falta de un planteamiento matemático por parte de Gilbert y su énfasis en interpelar el magnetismo en términos asociados al pensamiento renacentista, por lo cual Galileo haya criticado unos resultados experimentales que aparentemente le eran tan útiles para la empresa en la que él mismo estaba embarcado. Al margen de que esa haya sido la razón que tuvo Galileo para criticar los resultados experimentales de Gilbert, el hecho es que ambos autores abrigaban diferencias respecto a los supuestos no empíricos mediante los cuales interpretaban el mundo físico y al mismo tiempo reconocían en la experimentación y en el análisis cuidadoso de los datos de la experiencia la fuente del conocimiento genuino del mundo físico.

Sin embargo, es claro que la crítica de Galileo parte de su convicción de que la demostración matemática es epistemológicamente superior a la demostración silogística e intenta ofrecer un método mejor que el de Gilbert para detectar las *causas verdaderas* al «investigar las razones desconocidas de las conclusiones hay que tener la suerte de dirigir, desde el principio, el razonamiento hacia el camino de la verdad.» (*Diálogo*, 1997: 434). Este método es para Galileo «más matemático que el de Gilbert» y «poco menor que una demostración matemática». Tal método es muy cercano a lo que en la época se entendía como método resolutivo, que básicamente procedía de los efectos para establecer las causas mediante el testimonio de los sentidos; mientras que los efectos, a su vez, servían para demostrar esos mismos principios mediante el método contrario: el de composición.

Al igual que Gilbert, Galileo rechazó algunas de las ideas epistemológicas y metodológicas aristotélicas pero conservó muchas otras. Una de las ideas más claramente aristotélicas que conserva fue una versión del ideal demostrativo de ciencia. Gracias a sus observaciones astronómicas entre 1610 y 1613, Galileo es uno de los primeros autores en proveer evidencia observacional para decidir entre teorías rivales, a pesar de que haya excluido casi inexplicablemente la de Tycho. En la historia de la astronomía, hasta ese momento, no había sido posible usar la evidencia observacional para decidir entre teorías o modelos rivales. En otras palabras, fue entre los años mencionados que los modelos astronómicos dejaron de estar subdeterminados por la evidencia observacional y fue posible empezar a establecer, desde un punto de vista epistemológico, la plausibilidad de una teoría (la copernicana) y la falsedad de la otra (la ptolemaica). «Plausibilidad» y «falsedad» sólo en términos relativos porque si bien algunas tesis del sistema copernicano parecían apoyadas directa e indirectamente por las observaciones astronómicas de Galileo, otras permanecían sin poder establecerse,

ni siquiera detectarse, como el problema de la paralaje⁹. Mientras que si bien muchas de las tesis del sistema Ptolemaico, montado en cosmología aristotélica, se habían derrumbado, todavía no había pruebas empíricas de que la Tierra se moviera. Esa fue una de las funciones centrales de la *evidencia observacional* que llamamos *evidencia moderna*, la de poder discernir entre teorías en competencia y que se fue conformando a lo largo del siglo XVII. Galileo no utiliza la evidencia observacional y experimental para someter a prueba predicciones derivadas de ellas, ese será otro rasgo esencial del sentido moderno de evidencia alcanzado por Isaac Newton.

VII. Bibliografía

- Andersen, G. (2007), *The Telescope. Its History, Technology, and Future*, Princeton, Princeton University Press.
- Aquinas, Th. (1967), *Commentary on Aristotle's Physics*, New Haven, Yale University Press.
- Barnes, J. (1975), *Aristotle's Posterior Analytics*, Oxford, Clarendon Press.
- _____ (1995) *A Cambridge Companion to Aristotle*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Bennett, J. A., «Magnetical philosophy and astronomy from Wilkins to Hooke». En Taton y Wilson (1989).
- Brunetti, F. (ed.) (1980), *Opera di Galileo Galilei*, Torino, Unione Tipografico-Editrice Torinese (UTET).
- Cabeo, N. (1629), *Philosophia Magnetica*, Roma, Franciscum Succium.
- Cohen, I. B. (1985), *Revolution in Science*, Cambridge, Harvard University Press.
- Dear, P. (1995), *Disciplines and Experience: The Mathematical Way in the Scientific Revolution*, Chicago, University of Chicago Press.
- Drake, S. (1978), *Galileo at work*, Chicago, University of Chicago Press.
- Evans, J. (1998), *The History and Practice of Ancient Astronomy*, Oxford, Oxford University Press.
- Finocchiaro, M. A. (2008), *The Essential Galileo*, Indianapolis/Cambridge, Hackett Publishing.
- Galilei, G. (1997 [1632]), *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, Madrid, Alianza.
- _____ (1960 [1623]), *The Assayer*. En *The Controversy on the Comets of 1618*, Philadelphia, University of Pennsylvania Press. Trad. S. Drake and C. D. O'Malley.
- _____ (1610), *Sidereus Nuncius*, Venecia, Thomam Baglionum.
- _____ (1974 [1638]), *Two New Sciences*, Madison, University of Wisconsin Press. Trad. S. Drake.
- Gilbert, W. (1958 [1600]), *De Magnete*, New York, Dover.
- Gingerich, O., «Galileo's Astronomy», en Wallace (1986).
- Grant, E. (1970), «Peter Peregrinus», en *Dictionary of Scientific Biography* New York, Charles Scribner's Sons.
- _____ (1996), *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Guillaumin, G. (2005), *El surgimiento de la noción de evidencia*, México, UNAM.

9 Si la Tierra se mueve alrededor del Sol, como lo sostenía la teoría de Copérnico, tendría como consecuencia la producción de una gran paralaje, *i. e.*, las estrellas parecerían cambiar unas con respecto a las otras a lo largo del movimiento orbital de la Tierra. El ángulo de la paralaje anual es muy pequeño, apenas de menos de un segundo de arco, incluso para las estrellas visibles más cercanas. Durante el siglo XVII no fue posible detectarlo, con lo cual ello era la principal evidencia en contra de la teoría copernicana. Fue posible detectarlo sólo hasta que los instrumentos de observación fueron más precisos hacia mediados del siglo XIX.

- Hald, A. (1986), «Galileo's Statistical Analysis of Astronomical Observations», en *International Statistical Review*, 54, pp. 211-220.
- Hankinson, R. J., «Philosophy of Science», en Barnes (1995a).
- _____, «Science», en Barnes (1995b).
- Hesse, M. (1960), «Gilbert and the Historian», en *Brit. Jou. Phil. Sci.*, 11, pp. 1-10 y 130-142.
- Henry, J. (2001), «Animism and Empiricism: Copernican Physics and the Origins of Willaim Gilbert's Experimental Method». Forthcoming.
- Kahy, Ch. D. (1981), *William Gilbert's Renaissance Philosophy of the Magnet*, PhD Dissertation, Pittsburgh, University of Pittsburgh.
- Lindberg, D. (2002), *Los inicios de la ciencia occidental*, Barcelona, Paidós.
- Machamer, P.; Pera, M. y Baltas, A. (1998), *Scientific Controversies*, Oxford, Oxford University Press.
- Newton, R. (1977), *The Crime of Claudius Ptolemy*, Baltimore, John Hopkins University Press.
- Okruhlik, K. (1978), «The Interplay between Theory and Observation in the Solar Model of Hipparchus and Ptolemy», en *PSA*, v. I, pp. 73-82.
- Pérez Sedeño, E. (1986), *El rumor de las estrellas. Teoría y experiencia en la astronomía griega*, Madrid, Siglo XXI.
- Pumfrey, S. (1987), *William Gilbert Philosophy, 1580-1684. The Creation and Dissolution of a Discipline*, PhD Dissertation, London, University of London.
- _____. «Magnetical philosophy and astronomy, 1600-1650», en Taton y Wilson (1989).
- Ross, W. D. (1949), *Aristotle's Prior and Posterior Analytics*, Oxford, Clarendon Press.
- Smith, A. M. (1999), *Ptolemy and the Foundations of Ancient Mathematical Optics*, Philadelphia, American Philosophical Society.
- Sorabji, R. (1987), *Philoponus and the Rejection of Aristotelian Science*, New York, Cornell University Press.
- Taton, R. y Wilson, C. (1989), *Planetary astronomy from Renaissance to the rise of astrophysics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Toomer, G. J. (1974), «The Chord Table of Hipparchus and the Early History of Greek Trigonometry», en *Centaurus*, 18, pp. 6-28.
- _____. (1998) *Ptolemy's Almagest*, New Jersey, Princeton University Press.
- Wallace, W. (ed.) (1986), *Reinterpreting Galileo, Studies in philosophy and the history of philosophy*, v. 15, Washington, The Catholic University of America Press.
- _____. (1995), «Circularity and the Demonstrative *regressus*: From Pietro d'Abano to Galileo Galilei», en *Vivarium*, 33, pp. 76-97.

10. J. Kepler (1571-1630)

La creatividad y el rigor en la búsqueda de la armonía del mundo

I. Introducción

Y no espere nadie, en lo que respecta a las hipótesis, algo cierto de la astronomía, pues no puede proporcionarlo; para que no salga de esta disciplina más estúpido de lo que entró, si toma como verdad lo imaginado para otro uso. Adiós.

Así finaliza la nota dirigida a los lectores que el editor Osiander incluyó en la obra de Copérnico, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, publicada en 1543 y que pretendía situar a Copérnico en la más ortodoxa tradición de la astronomía: la de ofrecer hipótesis matemáticas que permitieran salvar las apariencias de irregularidad observadas en los cielos mediante el recurso a modelos y estrategias matemáticas (Copérnico, 1983: 3)¹⁰. De esta forma, la astronomía, una disciplina matemática, ofrecía los cálculos adecuados para realizar calendarios, predecir eclipses, calcular las efemérides, etcétera. La Verdad acerca del mundo la ofrecía la filosofía natural, la cosmología y la física aristotélica y las Sagradas Escrituras¹¹.

La hipótesis de los movimientos de la Tierra, su desplazamiento del lugar privilegiado que ocupaba hasta ahora, el centro del Universo, en el que se sitúa al Sol, intercambiándose las funciones de ambos, y todas las novedades contenidas en el libro de Copérnico no debían ser interpretadas de forma realista, como no lo eran los ecuantos, epiciclos y deferentes y las excéntricas de la astronomía ptolemaica. Estrictamente, debían ser interpretados y usados como estrategias, como hipótesis que permitían un cálculo más preciso y económico de las posiciones y movimientos de los astros. La Verdad era otra. Como había sido establecido desde la Antigüedad, el mundo de las dos esferas era la estructura innegable del mundo. Una esfera externa que delimitaba el mundo en la que estaban engastadas las estrellas fijas y que rotaba una vez al día y una esfera interna, firmemente anclada en el centro, el lugar de los seres humanos: la Tierra, conformando el mundo sublunar en el que se produce el cambio, el movimiento natural y violento, el nacimiento y la muerte, la vida y la corrupción y todos los

10 Véase en este mismo volumen el artículo de Marina Camejo «Nicolás Copérnico» (*comps.*).

11 Véanse en este mismo volumen los artículos «Ciencia y método en Aristóteles» de Elena Díez de la Cortina y «La teoría planetaria de Ptolomeo» de Cristian C. Carman (*comps.*).

tipos de cambio, de sustancia, de cualidad, de cantidad y de lugar, descritos por Aristóteles. El espacio entre una y otra esfera: el mundo supralunar, estaba regido por la perfección y regularidad de los movimientos, por la circularidad del movimiento eterno de los astros. Todo ello perfectamente descrito en las obras de Aristóteles. A la física y cosmología les correspondía por tanto, ofrecer explicaciones y descripciones del orden del mundo en términos cualitativos, físicos, realistas. El papel de la Astronomía, en la tradición establecida fundamentalmente a partir de Ptolomeo en el contexto de la ciencia alejandrina, era otro.

Y si bien la Astronomía no debía entrar en conflicto con las verdades establecidas desde antaño, tenía libertad para imaginar mecanismos e hipótesis matemáticas, guiadas por el objetivo de la precisión en el cálculo. Interpretar esas hipótesis en términos realistas, como advertía Osiander, no era más que un indicio de ignorancia u osadía si con ello se pretendía modificar el carácter de las disciplinas perfectamente establecidas desde hacía tiempo.

El éxito del *De Revolutionibus*, como valora T.S. Kuhn en su obra sobre la revolución copernicana, no implicó el éxito de su tesis central ya que la fe inquebrantable de la mayoría de los astrónomos en la inmovilidad de la Tierra era un serio obstáculo al avance de las tesis copernicanas (Kuhn, 1985: 246). Por ello, para muchos, la llamada *interpretación de Wittenberg*, era la actitud correcta hacia las novedades contenidas en el texto copernicano: hacer uso de sus diagramas, citar sus métodos de determinación de distancias, pero ignorar por completo el movimiento de la Tierra o rechazarlo como absurdo. El calificativo se debe a R. Westman (Westman, 1975: 166) quien definía esta actitud como un estilo o enfoque metodológico común, un consenso acerca de cómo leer la obra de Copérnico, compartido por los astrónomos de la Universidad de Wittenberg, bajo la tutela del reformador protestante P. Melanchthon, y que consistía en reconocer las importantes contribuciones de Copérnico desde el punto de vista matemático y valorar sus ventajas prácticas, pero sin asumir las consecuencias cosmológicas. Se trataba, en rigor, de mantener el adecuado hiato entre Astronomía y Cosmología que convenía a las autoridades religiosas. Como subraya el historiador Alberto Elena, es fácil advertir que la teología especificaba las condiciones-límite de cualquier investigación física, y que esto jugó un papel decisivo en la recepción de la obra copernicana y que si bien algunos textos de Lutero y Melanchthon son invocados para ilustrar la actitud de rechazo de los luteranos hacia las nuevas ideas copernicanas, lo cierto es que también puede ilustrarse cómo la obra de Copérnico fue ampliamente difundida, discutida y apreciada en los círculos de astrónomos luteranos. Su posición puede ser definida como «... una afortunada simbiosis de escepticismo y pragmatismo que continuaba haciendo hincapié en el éxito predictivo y dejaba para los no-profesionales la consideración de cualquier tipo de problema físico-cosmológico.» (Elena, 1985: 145). En definitiva, católicos y protestantes, en plena batalla acerca de la interpretación de los textos sagrados, incluyeron la cuestión del copernicanismo en sus disputas dialécticas, pero todos coincidían en que las ventajas del nuevo sistema eran innegables, y coincidían también en que era mejor evitar entrar en debates acerca de las consecuencias cosmológicas y físicas del libro de Copérnico.

II. Desvelar el orden del mundo

II.a. Formación y matemático territorial en Graz

Johannes Kepler nació en 1571, en la ciudad de Weil, en el seno de una familia defensora del nuevo credo luterano. Siendo aún un niño, su familia se trasladó a la ciudad de

Leonberg, perteneciente al ducado de Württemberg, lo cual fue muy beneficioso para su educación. Tras la implantación de la Reforma, los duques fomentaron la implantación de centros educativos donde los jóvenes alemanes pudieran aprender materias básicas así como formar a muchos de ellos para el servicio a la nueva religión. Kepler fue uno de ellos, había mostrado una fuerte inclinación hacia el sentimiento religioso y tenía una gran inteligencia, aunque sufría constantemente por temor a no merecer la gracia de Dios. Durante su formación en Maulbronn, reflexionaba sobre los porqués de la desunión de los cristianos, y sobre las interpretaciones diferentes de la Biblia de calvinistas, luteranos y católicos. Su particular forma de vivir e interpretar la religión, siendo fiel en todo momento a su credo luterano, pero convencido de la unidad de la religión cristiana, le enfrentará a no pocos problemas a lo largo de su vida y le obligará a despedirse en más de una ocasión de su lugar de residencia.

Tras completar su formación inicial y prepararse para los exámenes que le permitirían tener acceso a la formación universitaria, en 1591 comienza sus estudios en la Universidad de Tubinga, uno de los principales centros de la vida y la doctrina reformadora. De entre todos sus profesores, fue su profesor de matemáticas y astronomía, Michael Mästlin, el que le ofreció un nuevo mundo. A través de él conoció la obra de Copérnico, a quien el profesor exponía sólo con discreción y cautela ya que como profesor debía enseñar el sistema de Ptolomeo. Años más tarde, en el Prefacio al lector de su primera obra, *Mysterium Cosmographicum*, Kepler afirma:

A partir de ahí quedé tan cautivado por Copérnico, a quien mi maestro aludía en sus enseñanzas, que no sólo defendí repetidas veces sus opiniones en las discusiones con otros aspirantes, sino que además elaboré una concienzuda disputa dialéctica sobre la tesis de que el primer movimiento (el giro del cielo de las estrellas fijas) resulta de la rotación de la Tierra. Ya entonces me propuse atribuir también a la Tierra los movimientos del Sol basándome en argumentos físicos, o si se prefiere, metafísicos, tal como hizo Copérnico a partir de argumentos matemáticos (Caspar, 2003: 61).

Kepler acudió a Tubinga a formarse en estudios teológicos y convertirse en ministro de la Iglesia, pero sus estudios clásicos y sobre filosofía le llevan a leer a Aristóteles, y siente predilección por las ideas pitagóricas, platónicas y neoplatónicas. Leyó a Nicolás de Cusa y le atrajo su mística geométrica, estudió los *Elementos* de Euclides como base de su gran formación en matemáticas y, por supuesto, la astronomía de Ptolomeo y las nuevas ideas copernicanas. Pero la reorientación de lo que él había imaginado como su futuro se produce poco antes de terminar sus estudios universitarios: el claustro de la Universidad le propone como profesor para sustituir al fallecido profesor de matemáticas de la escuela evangélica de Graz en Austria.

Lo que Kepler consideró en un primer momento como un serio obstáculo para la finalización de sus estudios y el ejercicio inmediato de su labor como clérigo sería catalogado mucho tiempo después como una señal del mismo Dios para encaminarle hacia la labor astronómica, hacia el objetivo que ya dirigiría el resto de su vida: desvelar el verdadero orden del mundo. Kepler llegó a Austria en 1594 para dar clases de matemáticas y astronomía, y entre sus tareas se encontraba también la de ejercer de matemático territorial y calendarista. En aquella época estaba muy arraigada la creencia de que el influjo de los astros sobre los acontecimientos terrestres era un hecho innegable, así que los calendarios debían ser realizados por aquellos que disponían de conocimientos acerca de los cielos y en ellos se incluían pronósticos meteorológicos, información sobre posibles peligros y sucesos de orden político y religioso. La posición de Kepler sobre la astrología fue muy particular: si bien creía en la influencia de la configuración astral determinada en el momento del nacimiento, lo que otorgaba unos determinados rasgos de personalidad y carácter, no creía en los vaticinios

astroológicos de todo tipo de acontecimientos y menos aún en el uso interesado de la astrología por parte de los dignatarios o de los «charlatanes» a su servicio para provocar el miedo entre las gentes. Realizó calendarios e hizo pronósticos pero al tiempo aconsejaba no tomar decisiones de forma irracional basándose en lo que no podían ser más que orientaciones muy generales con alto grado de falibilidad. Aún sí, Kepler recibía muchas peticiones de consultas astrológicas sobre todo tras el éxito en algunas de sus predicciones que, de hecho, se cumplieron. Esta era una forma de obtener algo de dinero extra, pero los intereses de Kepler eran otros. Y consideró que era el momento de comenzar a redactar una obra en la que quedaran reflejadas sus ideas acerca de la superioridad del sistema copernicano sobre el ptolemaico.

II.b. El *Mysterium Cosmographycum*

¿Qué es el mundo? ¿Por qué hay precisamente seis planetas? ¿Por qué sus distancias al Sol son las que son y no otras? ¿Por qué se desplazan con mayor lentitud cuanto más lejos se encuentran del Sol? Con estas preguntas atrevidas sobre las causas del número, el tamaño y el movimiento de las órbitas celestes, el joven buscador de la verdad se aproximó a la concepción copernicana del universo (Caspar, 2003: 80).

Este era el tipo de preguntas que se planteaba Kepler ya desde su etapa universitaria, aunque éstas no eran, en rigor, el tipo de cuestiones a las que la Astronomía, en principio, pudiera dar respuesta. Pero Kepler estaba convencido de que el gran artífice del mundo, Dios, había construido el mundo siguiendo un patrón geométrico, racional, creía que todo estaba ordenado de acuerdo con relaciones numéricas que había que desvelar. Una de las ventajas fundamentales que observaba en el sistema de Copérnico es que situado el Sol en el centro del Universo y los seis planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno) girando a su alrededor, con unos periodos ya establecidos también por Copérnico, era posible calcular las distancias relativas de cada uno de ellos al Sol, partiendo de los datos de observación. Kepler se preguntaba si no existiría una relación numérica, un porqué matemático a este orden, o ¿era esta disposición planetaria sólo fruto de la más estricta casualidad?

Kepler desechaba esta última posibilidad y sus biógrafos relatan cómo un día dando clases de matemáticas a los cada vez más escasos alumnos con los que contaba, estableció una relación muy particular entre los datos de las conjunciones de planetas en su progreso a lo largo del Zodiaco y dos circunferencias concéntricas cuya relación de radios era uno el doble que el otro. Había encontrado, a primera vista, una relación matemática, una proporción que era la misma que existía entre los orbes de Júpiter y Saturno. Relacionó a continuación los datos referidos al resto de los planetas con el resto de figuras geométricas: triángulos, cuadrados, etcétera. Pero esto resultó ser un fracaso. Recordó entonces a Euclides. Este había establecido que sólo podían darse, siguiendo las leyes de la geometría, cinco únicas figuras cuyos lados estén compuestos de polígonos regulares, los cinco sólidos perfectos de la geometría: tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro. Así que probó ahora a hacer los cálculos ya no con las figuras planas sino con los sólidos regulares.

Los cálculos concordaron bastante bien y creyó que el plan de Dios se había desvelado ante él: la razón de que existiera seis planetas era que sólo existían cinco sólidos regulares y éstos inscritos entre cada uno de los planetas proporcionaban la relación matemática que justificaba las distancias relativas de cada uno de ellos al Sol. A partir de este momento trabajó sin descanso hasta ver finalizada su obra, publicada en 1597 y titulada: *Preludio de las disertaciones cosmográficas que contiene el Misterio Cosmográfico acerca de la admirable proporción de los orbes celestes y de las razones genuinas y propias del número, la magnitud, y el movimiento periódico*

del cielo, demostrado por cinco cuerpos geométricos regulares. Abreviado como *Mysterium Cosmographicum* y *El secreto del Universo*, en castellano (Kepler, 1992).

El contenido del libro es sorprendente. Kepler tiene 24 años y no ha hecho más que comenzar su actividad como astrónomo, pero fue crucial. Como él mismo diría más adelante: *el sentido de toda mi vida, de mis estudios y de mi obra, encuentran su origen en este librito* (Caspar, 2003: 92). El primer capítulo lleva por título: «Razones por las que las hipótesis de Copérnico resultan apropiadas y exposición de las hipótesis de Copérnico», y constituye una magnífica presentación de las ventajas de este sistema tanto desde el punto de vista matemático como físico y metafísico. En los siguientes capítulos expone de forma pormenorizada su modelo de Universo basado en la hipótesis poliédrica, y es destacable la relación que establece en el capítulo XII entre su modelo y las armonías musicales, tema que será siempre recurrente en su obra. A partir del capítulo XV, las novedades en el seno del copernicanismo son muy relevantes. Kepler da un paso en dirección al *heliocentrismo radical* (García Hourcade, 2000: 148). Copérnico había situado al Sol no exactamente en el centro del Universo sino en un punto un tanto alejado de él para dar consistencia a las observaciones y había introducido la noción de *sol medio*. Pero Kepler cree realmente que el Sol debe ocupar el centro geométrico y físico del Universo y ofreció los cálculos adecuadamente corregidos, si bien comienza a ser muy consciente de la necesidad de contar con datos de observación mucho más precisos para corregir el grado de desacuerdo. Es en el capítulo XX donde Kepler aborda la cuestión de la dinámica de los cielos. Él mismo recuerda que ya Aristóteles había establecido en el Libro 2 del *De Caelo* que *los movimientos de cada planeta son proporcionales a su distancia*, aunque la razón de ello era interpretada como resistencia a la influencia del primer móvil (Kepler, 1992: 191) y ahora él presenta una razón diferente. Será preciso establecer, dice Kepler, una de dos:

o que las almas motrices son más débiles cuanto más lejos están del Sol, o bien que sólo hay un alma motriz en el centro de todos los orbes, esto es, en el Sol, que empuja más fuertemente a un cuerpo cuanto más próximo se halla, mientras que para los lejanos, debido a la distancia y al debilitamiento de su fuerza, como si languidciera. Pues tal y como ocurre con la fuente de luz en el Sol, el origen del círculo está en el lugar del Sol, esto es, en el centro, así aquí la vida, el movimiento y el alma del mundo residen en el mismo Sol (Kepler, 1992: 193).

Un *ánima motriz*, procedente del cuerpo del Sol, situado en el centro físico y geométrico del mundo y que se debilita con la distancia, el motor de todo el Universo, impulsa a los planetas más cercanos a moverse con mayor rapidez y a los más lejanos a moverse de manera más lenta. Y esta es la razón del orden o armonía del mundo. Kepler aún no establece la relación exacta entre distancia y tiempo, ni lo hará hasta más de veinte años después, pero las ideas básicas están ya anunciadas en el *Mysterium*.

II.c. Concepto de la Astronomía: platonismo y armonía

Algunas tesis sobre las causas de la Revolución Científica inciden en la importante influencia que ejerce el platonismo en los intelectuales de los siglos XV-XVII. Platón era desde todo punto de vista novedoso y atractivo. Sus obras podían ser ahora leídas directamente. Gracias a la llegada de los sabios de Oriente tras la caída de Constantinopla que traen muchas de las obras de los clásicos que apenas habían sido estudiadas en Occidente y gracias a la imprenta, Platón y Arquímedes se convierten en novedades en una sociedad que valora los cánones arquitectónicos y pictóricos del mundo clásico. El Renacimiento cultural,

intelectual y estético convierte a Platón en uno de los autores más relevantes¹². Es cierto que el neoplatonismo renacentista tiene más claves y es mucho más complejo de abordar: los escritos herméticos traducidos por Ficino, la incorporación de la cábala judía, la interpretación alquímica del mundo, la astrología, la creencia en la interconexión entre todos los fenómenos naturales, y las relaciones entre el macromundo y el micromundo, componen un todo al que se hace referencia como hermetismo y neoplatonismo y que jugaron un papel relevante en la configuración de la mentalidad de la época.

Pero el neoplatonismo advertido en Copérnico y en Kepler es mucho más nítido y preciso: se trata de la recuperación de los viejos ideales platónico-pitagóricos que conformaron la concepción del mundo y del conocimiento. El mundo tiene una estructura matemática real y la matemática es la ciencia que nos permite hablar de lo eterno, lo permanente, lo oculto tras la aparente variedad de lo fenoménico, lo real. Existe un reflejo perfecto entre el mundo y la geometría y, por ello, las leyes de la geometría son las leyes que permiten entender la estructura real del mundo, y sus características son las de perfección, regularidad, simetría, belleza y orden. A ello accedemos mediante la razón, sólo ésta adecuadamente guiada en su camino hacia el conocimiento de las Ideas, puede elevarse por encima de los datos erróneos que nos proporcionan los sentidos, y nos permite hallar la Verdad. De esta forma, la vieja identificación pitagórica entre música, armonía, matemáticas y astronomía es reivindicada por Copérnico y es lo que Kepler advierte también en su obra y conforma como su propio proyecto.

Las matemáticas son las que mejor contribuyen a la observación de la naturaleza, por cuanto revelan la estructura bien ordenada de pensamientos a partir de la cual se creó todo [...] y presentan los elementos primordiales simples en toda su estructura armónica y proporcionada con la que también fue creado el cielo en su totalidad tomando en sus partes individuales las mismas formas que aparecen en dicha estructura (Caspar, 2003: 122).

Desde este punto de vista las preguntas acerca de en qué consiste la armonía del mundo, cuáles son sus fundamentos, y cuál es el plan trazado por Dios al construir el mundo son centrales. Simetría, armonía, geometría, razón...son los pilares sobre los que Kepler construye. Pero hay más, contra las tendencias escépticas de la época, Kepler cree que la mente de los seres humanos está plenamente capacitada para reconocer ese plan de Dios. En otras palabras, el conocimiento verdadero acerca del mundo es posible,

porque el ser humano es el reflejo de Dios, y es muy posible que en determinadas cuestiones relacionadas con el ornamento del mundo opine lo mismo que Dios. Porque el mundo participa de las cantidades y, precisamente, nada hay que el espíritu del hombre comprenda mejor que las cantidades, y es evidente que fue creado para reconocerlas (Caspar, 2003: 126).

Creyó que él había desvelado esa estructura y las leyes geométricas que regían en el Universo, pero lo cierto es que los datos no encajaban con la precisión exigida. Quizá había cantado victoria demasiado pronto.

III. El tribunal de la experiencia

La recepción de su obra fue desigual, unos la alabaron y otros como Galileo la ignoraron a pesar de que Kepler le solicitó su opinión. Pero las objeciones que el gran observador Tycho Brahe había hecho a ciertos datos usados por Kepler le hicieron pensar que, con toda

12 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno «Astronomía y Física en Platón» (*comps.*).

probabilidad sus datos imprecisos eran la causa de que su modelo no fuera todo lo perfecto que él exigía. Y sabía que sólo el observador danés poseía los datos de observaciones que se requerían para seguir adelante.

III.a. Salida de Graz. Kepler y Tycho Brahe

En 1600, como consecuencia del recrudecimiento del proceso de Contrarreforma, se promulga un decreto en la ciudad de Graz por el cual todo aquel que no fuera católico o no se mostrara favorable a convertirse al catolicismo, debía abandonar la región. Kepler se ve obligado a abandonar la ciudad. Atrás deja una etapa muy importante de su vida y una hija enterrada; con sus enseres situados en un carro y acompañado por su mujer y su hija adoptiva se dirige hacia el encuentro con Tycho Brahe, Matemático Imperial en Praga.

Tycho Brahe, astrónomo danés, revolucionó la práctica cotidiana de la observación astronómica y destacó como diseñador y constructor de instrumentos que calibraba y ponía a prueba su precisión periódicamente. Los astrónomos anteriores observaban las posiciones de los planetas cuando éstos estaban en ciertos puntos de sus órbitas, mientras que Tycho Brahe y los jóvenes astrónomos a los que inicia en el arte de la observación los observan a lo largo de todo el recorrido orbital. Como consecuencia, un gran número de datos y ‘anomalías’ orbitales fueron anotados por primera vez. Esta labor práctica queda reflejada en sus obras: *Astronomiae Instauratae Mechanica*, en la que define la importancia de los instrumentos de observación para una astronomía reformada y en *Astronomiae Instauratae Progymnasmata*, literalmente un texto de ejercicios introductorios para el desarrollo de la labor de observación astronómica (Brahe, 1972).

Para un observador diligente como T. Brahe, la realidad es tozuda, tanto que la aparición en los cielos de la nueva estrella en 1572 y la aparición del cometa en el año 1577 iban a constituir un serio e insalvable problema a la teoría aristotélica de la incorruptibilidad de los cielos y la realidad de las esferas cristalinas. Tras tratar de calcular y no poder hallar la distancia a que se encontraba la nueva estrella mediante la técnica de la paralaje, no podía seguir afirmándose que el nuevo fenómeno se había producido en la esfera sublunar y que era de tipo meteorológico, tal como se interpretaba desde la física aristotélica. Era un suceso nuevo en la región del Universo que desde la Antigüedad se definió como eterna e inmutable. La observación del cometa tendrá otra radical consecuencia: tras trazar detenidamente su trayectoria debía afirmarse que habría roto las todavía presentes esferas materiales cristalinas en que se situaban los planetas. T. Brahe comienza a hablar de órbitas. Estas observaciones y sus radicales consecuencias fueron publicadas por Brahe en *De Nova et Nullius Aevi Memoria Prius Visa Stella* (1573) y *De Mundi Aetherei Recentioribus Phaenomenis* (1588) (Brahe, 1972).

A pesar de estos serios problemas para la física aristotélica, el edificio cosmológico se mantiene en pie. Según T. Brahe era también evidente que la Tierra estaba firmemente anclada en el centro del Universo, y ello le alejó de las tesis copernicanas. Su propuesta de un sistema ‘híbrido’ basado en dos centros de rotación, uno para la Luna y el Sol que giran en torno a una Tierra central y otro para los planetas que giran en torno a un Sol en movimiento no fue aceptado por los astrónomos. Trataba de combinar lo mejor del sistema copernicano y la física aristotélica que exigía que los cuerpos de naturaleza pesada se dirigiesen hacia su lugar natural, la Tierra, que ocupa el centro del Universo, al tiempo que era también perfectamente consistente con las Sagradas Escrituras. Pero el sistema jamás funcionó demasiado bien.

Tycho Brahe había tenido que dejar su observatorio de Uraniborg en la isla de Hven en la costa danesa y había sido nombrado Matemático Imperial en la corte de Rodolfo II. Tycho Brahe se instaló en Praga en 1599 y Kepler es expulsado de Graz en 1600, ante su negativa de convertirse a la religión católica y cumplir así con el decreto promulgado por las autoridades por el cual todos los habitantes debían profesar esa fe o abandonar la región. Kepler se dirigió a Praga para colaborar con el eminente observador a quien ya había visitado con anterioridad y con quien su relación siempre sufriría de altibajos.

Kepler recibe el encargo del soberano de colaborar con Tycho Brahe en la elaboración de unas nuevas tablas astronómicas basadas en los datos de observación de Brahe, éste proyectaba llamarlas *Tablas rudolfinas*. Pero Brahe muere repentinamente en 1601 y Kepler se convierte en su sucesor, es el nuevo Matemático Imperial. Y dada la situación:

Kepler se apoderó de las observaciones que contenían el trabajo de toda la vida de Brahe, y tenía buenas razones para hacerlo. El gran observador había cumplido su tarea, pero ya estaba muerto; ahora entraba en escena el gran teórico, destinado a desvelar los secretos que encerraban todas aquellas observaciones (Caspar, 2003: 158).

III.b. El «problema de Marte»

Tycho Brahe ya había asignado a Kepler en su primera visita la resolución de la órbita de Marte. Esta, además de presentar los inconvenientes del movimiento de retrogradación, ese bucle que realizan los planetas en su trayectoria, observados desde la Tierra, y que Copérnico había interpretado adecuadamente como un signo inequívoco de la no centralidad de los movimientos planetarios en torno a la Tierra y como consecuencia del propio movimiento de ésta, mostraba además una mayor excentricidad en su órbita y era, en definitiva, la que mayores problemas planteaba. La tarea a desarrollar era clara: no se trataba de elaborar hipótesis teóricas o imponer a la experiencia especulaciones a priori, era el momento de plegarse a la evidencia de lo empírico. Para solucionar el problema de la descripción exacta de la órbita de Marte por medio de los datos de observación de Brahe, Kepler utilizó varias estrategias en la forma de abordar el cálculo, incluso la reintroducción del ecuante de la astronomía ptolemaica. Pero una y otra vez los resultados para la mayoría de las observaciones coincidían con un grado de error no superior a 2' de arco, lo cual era aceptable, pero en algunos momentos las desviaciones de la supuesta órbita alcanzaban los 8' de arco.

La Divina Providencia nos ha provisto de un observador tan diligente con Tycho, que sus observaciones evidenciaban en estos cálculos al estilo ptolemaico un error de 8'; es seguro que deberíamos aceptar este regalo de Dios con una mente agradecida, pues 8' no podían ser ignorados y eso condujo a la reforma total de la Astronomía (García Hourcade, 2000: 175).

La complejidad de la tarea que se propuso fue inmensa, pero fue clave. En primer lugar, había estado realizando los cálculos suponiendo la quietud de la Tierra, quizá ese había sido el error, así que la primera tarea era la de calcular de forma precisa la órbita de la Tierra y a partir de ella calcular la de Marte. La órbita de la Tierra mostraba también excentricidad, lo que le parecía adecuado ya que la acercaba completamente al comportamiento del resto de los planetas, y por ello también la aparente variación de la velocidad de los mismos empezó a parecer a Kepler un fenómeno real y no una mera apariencia a salvar. La intuición dinámica era la que ya había aparecido en su *Mysterium*: una fuerza solar que decrece de manera inversamente proporcional a la distancia es lo que explica las diferencias observadas. Así pues, son dos los problemas relacionados:

1. Si la velocidad de un planeta a lo largo de su órbita es variable ¿cómo calcular el lugar que ocupan en su órbita en un momento concreto?
2. Ya que es imposible que la órbita sea circular a tenor de los datos de observación ¿cuál es la forma real de la órbita?

La inventiva y genialidad matemática de Kepler le llevaron a la solución del problema aunque, en el camino, los dogmas principales de la astronomía establecidos desde la Antigüedad, la regularidad y circularidad de los movimientos de los astros, debieron ser rechazados.

Si las observaciones de Brahe habían sido recogidas desde una Tierra en movimiento, había que abordar el problema conociendo exactamente la órbita de ésta. Para ello, calculó los valores relativos de la distancia Tierra-Sol tomando como punto de referencia los datos de Marte, como si estuviese observando el movimiento de la Tierra desde el planeta de la guerra. Gracias a ello pudo deducir que la Tierra no se desplaza de manera uniforme en su órbita y ahora puede establecerlo ya no sólo como intuición dinámica sino además con certeza matemática: la velocidad con que la Tierra se mueve sobre su órbita como consecuencia de la fuerza que emana del Sol es inversamente proporcional a su distancia al Sol. La estrategia matemática para demostrarlo fue la de suponer que todos y cada uno de los puntos sucesivos que ocupa la Tierra (en rigor infinitos) en su órbita y que podían ser calculados sumando los valores por divisiones graduales, estarían todos contenidos en el área de la órbita. Así, Kepler:

Reemplazó las sumas de las distancias por las áreas correspondientes y así consiguió además, medir el tiempo que necesita un planeta para recorrer un tramo concreto de su órbita, a partir del área que cubren los radios que van desde el Sol hasta los puntos que delimitan dicho tramo (Caspar, 2003: 171).

Este procedimiento permite establecer lo que hoy denominamos como *Segunda Ley de Kepler*:

El radio vector que une un planeta y el Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales.

El segundo problema a solucionar es el relativo a la forma de la órbita. Los datos de las distancias Sol-Marte en diferentes momentos de su trayectoria hacían ya impensable la órbita circular. Probó con figuras ovales que parecían aproximarse más y calculó detenidamente las «lúnulas» que surgen al superponer una órbita oval a una circular, realizó multitud de cálculos que repetía agotando todas las posibilidades, e incluso cometió errores de cálculo que le retrasaron en la solución, hasta que finalmente advirtió y comprobó que los datos de Marte encajaban perfectamente con la figura de la elipse. Consideró, al igual que con la ley de áreas, que lo que era válido para Marte debía serlo también para el resto de los planetas. Y así se formula la *Primera Ley de Kepler*:

Los planetas se mueven a lo largo de elipses, en uno de cuyos focos se encuentra el Sol.

Ambas leyes se encuentran en la obra que inaugura la astronomía como Física celeste: *Astronomía Nova*, publicada en 1609, después de un lento proceso de edición, y años después de que Kepler diera solución en sus dos leyes a los principales problemas planteados por la astronomía, lo que sucede entre 1602 y 1605.

III.c. Astronomía Nova

Kepler relata detalladamente en su nueva obra titulada: *Astronomía nueva causal o física celeste, deducida de los registros del movimiento de la estrella Marte*, el proceso creativo que le lleva al establecimiento de sus dos primeras leyes. Existe una continua relación dialéctica

entre sus ideas de carácter físico y su trabajo matemático de cálculo pormenorizado tomando como base las observaciones de Tycho Brahe. La conexión profunda entre física y astronomía es defendida por Kepler y cree que realmente ninguna puede alcanzar la perfección sin la otra. A pesar de las recomendaciones de amigos como su profesor Mästlin de que procurara dejar fuera del ámbito de la astronomía las hipótesis de carácter físico o sus ideas acerca de la causa del movimiento planetario, y trabajara sólo con los «métodos astronómicos», Kepler hace caso omiso. Está profundamente convencido de que la astronomía es *Física Celeste*, perfecta combinación de observaciones empíricas, hipótesis físicas, causales e investigación matemática precisa.

El gran mérito de Kepler consiste en haber sustituido el esquema formal de los astrónomos precedentes por un sistema dinámico, las reglas matemáticas por la ley natural, la descripción geométrica del movimiento por una explicación causal. Con ello se convirtió en el verdadero fundador de la mecánica celeste (Caspar, 2003: 175).

Kepler expone claramente su principal objetivo: la explicación unificada de las causas del movimiento planetario y no meramente dar cuenta de los fenómenos observados y predecirlos con exactitud. Es este un replanteamiento de los criterios metodológicos para valorar las hipótesis en ciencia, enfatiza la adecuación empírica de las hipótesis y demanda que un modelo matemático nos proporcione una descripción de la realidad. Es por ello que Kepler diferencia claramente entre *Hipótesis geométricas* e *Hipótesis genuinamente astronómicas*, cuestión que había señalado claramente en la *Apología de Tycho* (Kepler, 1937: XX.1), opúsculo incompleto redactado para resarcir un error de atribución de las ideas de Tycho Brahe a otro astrónomo y que constituye, como señala A. Elena, citando a destacados historiadores: *la primera monografía sobre el concepto y significado de las hipótesis científicas* (Elena, 1985: 170).

Kepler se opone a la teoría de la equipolencia entre las diferentes hipótesis astronómicas, defendida por Reymers y Osiander, entre otros, y para quienes éstas son meras ficciones coherentes con los movimientos observados que permiten imaginar y representar el sistema del mundo. Para el astrónomo alemán, sin embargo, siempre hay elementos que permiten discernir entre unas y otras hipótesis, tales elementos o juicios son de carácter físico. Las auténticas hipótesis astronómicas son hipótesis físicas que explican los movimientos planetarios como consecuencias necesarias. Este es el sentido que Kepler da a la *Física Celeste*. Así lo señala también A. C. Crombie al afirmar que la originalidad fundamental de Kepler descansa en su insistencia en que las hipótesis astronómicas debían ser concebidas no como meros mecanismos de cálculo de los fenómenos astronómicos de forma aislada y puestas a prueba sólo por esos fenómenos, sino como proposiciones acerca de la estructura física real y la dinámica del Universo, relacionando la disposición y los movimientos de los cuerpos celestes con otros fenómenos físicos afines y sus causas comunes. Kepler expone en sus obras y su correspondencia una auténtica filosofía de la astronomía. La *Apología* constituye, de hecho, una defensa de la concepción de Kepler acerca del estatus de las hipótesis astronómicas contra la visión de Osiander o Ursus en un estilo retórico destacable (siguiendo las reglas de la *propositio, narratio, confirmatio y refutatio*) y en ella encontramos la definición exacta del método en astronomía:

Primero representamos la naturaleza de las cosas en hipótesis, entonces construimos a partir de ellas un método de cálculo, esto es, demostramos sus movimientos. Finalmente, volviendo sobre nuestros pasos explicamos al aprendiz las verdaderas reglas del método de calculación (Crombie, 1994: 541).

En la obra de Kepler asistimos a la definición de la nueva tarea de la astronomía, o su redefinición teórica: el examen de la auténtica constitución del edificio del Universo. La

inteligibilidad matemática y la adecuación empírica son los pilares de esta nueva astronomía. Es un nuevo programa científico para la astronomía que mostró a sus contemporáneos desarrollando un nuevo sistema astronómico y unos nuevos criterios para decidir entre hipótesis astronómicas verdaderas o falsas. El criterio básico fue el de la adecuación empírica entre los datos procedentes de la observación y los modelos matemáticos y físicos.

De esta manera, se produce la síntesis de la cosmología y la astronomía, durante tantos siglos siguiendo direcciones diferentes. Sin embargo, la física no podía ser aún otra que la dinámica aristotélica, por ello, siendo fiel a ésta, necesitaba explicar de dónde surgía el movimiento de los planetas. La inercia, para Kepler, es tendencia de los cuerpos hacia el reposo. Por ello, las ideas de W. Gilbert expuestas en su obra de 1600, *De Magnete*, proporcionan una atractiva teoría de la influencia magnética a distancia entre los cuerpos (Gilbert, 1958). Suponiendo que cada planeta tiene un eje magnético que siempre tiene la misma dirección y se mantiene paralelo a sí mismo a lo largo de toda la órbita, uno de los polos es atraído y otro repelido por el Sol, lo que explica la excentricidad de las órbitas y la variación de la velocidad. En su clásico estudio, Dreyer afirma que «ya alrededor de 1596 Kepler reconoció que el movimiento de los planetas debía estar controlado o causado por una fuerza emanando del sol y [...] que el efecto de esta fuerza es inversamente proporcional a la distancia desde el sol.» (Dreyer, 1953: 379).

En efecto, la existencia de un *anima motrix* en el Sol ya afirmada en su primera obra es posteriormente desarrollada en relación con sus estudios sobre la órbita de Marte. Esta fuerza procedente del Sol, a diferencia de la luz, no se expande en todas direcciones, sino sólo en el plano de la eclíptica, en el que están situados prácticamente todos los planetas, y la intensidad varía sólo de forma inversamente proporcional a la distancia, lo que le lleva, como hemos visto, a establecer su segunda ley.

A comienzos de 1610, Kepler recibe las noticias del *Sidereus Nuncius* de Galileo y las espectaculares novedades contenidas en él gracias al telescopio. Kepler recibió un ejemplar del texto de Galileo quien, además, solicitaba su opinión al respecto. Kepler redacta inmediatamente un texto en el que acepta sin dudarle la verdad de lo establecido por Galileo¹. La objetividad del texto, la descripción exacta y las ilustraciones de lo observado en los cielos gracias al telescopio le parecen un indicio claro de su adecuación. Kepler afirma en su *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* (Conversación con el mensajero sideral): «Aquí se exhiben objetos muy sobresalientes y admirabilísimos para filósofos y astrónomos. Aquí se convoca a todos los amigos de una filosofía verdadera para comunicar observaciones sublimes.» (Caspar, 2003: 245).

De entre todas las novedades contenidas en *Sidereus Nuncius*: los valles y montañas de la luna, las manchas solares o las características de la Vía Láctea, sin duda, la afirmación de que cuatro planetas pequeños giraban alrededor del planeta Júpiter, desató el entusiasmo de Kepler. Allí estaba la prueba de que la tesis geocéntrica del mundo era falsa; la existencia de tan sólo un astro que no girara alrededor de la Tierra invalidaba esta teoría, y allí estaban no sólo uno, sino cuatro pequeños planetas, que Kepler llama *satélites*, girando alrededor de un planeta diferente a la Tierra. Pero si algo entusiasmaba a Kepler especialmente era el propio telescopio y advirtió inmediatamente la importancia de este instrumento para el futuro de la Astronomía.

Las cuestiones ópticas están implicadas de una manera muy directa y profunda en la observación astronómica. El problema de la refracción atmosférica debía ser tenido en cuenta

¹ Véase en este mismo volumen el artículo de Godfrey Guillaumin «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*).

para «corregir» los datos de observación, o para interpretar adecuadamente los mismos. De ello había sido consciente T. Brahe, el último observador a simple vista, el cual se había esforzado en clarificar el fenómeno, aunque sin mucho éxito, a pesar de que era tenido en cuenta en sus observaciones.

Kepler, revisa en 1603 la obra de Vitellio, óptico del siglo XIII, y prepara una obra que publica unos años más tarde, *Ad Vitellionem Paralipomena, quibus Astronomiae pars Optica Traditur*, Paralipómenos a Vitellio, donde se trata la parte óptica de la Astronomía (Kepler, 1937: II). En ella trata de cuestiones de óptica pura y de óptica astronómica. Fue Kepler el primero en comprender adecuadamente el proceso de visión y la conformación de la imagen invertida en la retina y acomete la cuestión de la refracción de una manera muy aproximada a lo que será luego establecido por Descartes como ley de refracción de la luz. Ahora, la experiencia del telescopio le brinda la oportunidad para profundizar en las cuestiones ópticas en las que, sin temor a equivocarnos, podemos decir que era la máxima autoridad de la época. A finales de 1610 finaliza *Dioptrice*, término ideado por él, en la que aborda, entre otras cuestiones básicas de óptica, tales como el comportamiento de la luz a su paso por diferentes tipos de lentes, los fundamentos teóricos del funcionamiento del telescopio de refracción y explica cómo mediante dos lentes convexas se puede obtener una imagen más nítida y grande, aunque invertida, de los objetos. Según los historiadores, no es desacertado calificar a Kepler como el padre de la óptica moderna. La impresión de la obra se retrasa un año lo que le permitió incluir también un comentario sobre los nuevos descubrimientos de Galileo: la extraña configuración de Saturno y las fases de Venus, una nueva confirmación de que el planeta giraba alrededor del Sol. Galileo responde a Kepler una vez más con el silencio.

IV. A la búsqueda de la armonía

IV.a. Kepler en Linz

En 1611, se desata la guerra en Praga y se produce la abdicación de Rodolfo II, su situación vuelve a ser problemática, la pobreza y la enfermedad asaltan de nuevo a su familia y pierde a su esposa y uno de sus hijos. Kepler se ve obligado a buscar un nuevo lugar de residencia. Sus ideas religiosas (algunos teólogos le catalogaron como calvinista solapado) impidió su vuelta a Württemberg, pero en Linz, en la Alta Austria, sería bien recibido como matemático territorial. Allí vuelve a casarse y tiene seis hijos aunque los tres primeros mueren muy pronto, durante seis años luchó por defender a su madre en el proceso por brujería que se abrió en su contra, y tuvo que volver a preocuparse por su situación económica y su posición al desatarse la Guerra de los Treinta Años. Pero en este contexto de guerra, sufrimientos y necesidades, Kepler dirigió sus ojos hacia la armonía del mundo. Los proyectos de la publicación de las *Tablas Rudolfinas*, la elaboración de una obra general de astronomía, a la altura del *Revolutionibus*, el *Epítome*, y su *Harmonice Mundi*, en la que está incluida la Tercera Ley de Kepler, van haciéndose realidad en estos años.

IV.b. Harmonice Mundi Libri V. (Cinco libros de la armonía del mundo)

Me entrego así, al paroxismo sagrado, y desafío burlón a todos los mortales con esta declaración abierta: he arrebatado a los egipcios las vasijas de oro a fin de erigir con ellas un refugio sagrado para mi Dios muy lejos de las fronteras de Egipto. Si me perdonaís me alegro. Si os enojáis conmigo, lo soportaré. Tiento, pues, a la suerte y escribo

un libro para el presente o para la posteridad. Me da igual. Sabrá esperar cien años a sus lectores, igual que Dios aguardó seis mil años a un espectador (Caspar, 2003: 342).

Kepler siente que ha desvelado por fin el plan de Dios para crear el mundo, la geometría había proporcionado al mismo Dios el modelo, los arquetipos para configurar un mundo armónico y Kepler ha logrado desentrañarlo. Y su propósito en esta obra publicada en 1619 es mostrar con detalle a los lectores el plan y los detalles arquitectónicos de la obra de Dios.

Lo que Kepler ha desvelado y por lo que siente que ha alcanzado la meta es la proporción que se da entre los periodos de revolución de cada planeta y sus distancias al Sol. En el lenguaje científico actual, la Tercera Ley de Kepler establece que:

El cuadrado de los periodos de revolución es proporcional al cubo de sus distancias medias: $P_2/D_3=K$

Ahora el conjunto de los planetas girando alrededor del Sol en órbitas elípticas y a velocidad variable en función de su distancia al Sol, se configura gracias a la Tercera Ley como un sistema ordenado, donde cada órbita, cada periodo de revolución de cada planeta en particular, es visto ahora como una pieza en un todo armónico que funciona cumpliendo las tres leyes de Kepler. Su satisfacción, así lo subrayan sus biógrafos, debió ser inmensa.

IV.c. Música, matemáticas y astronomía

En *Harmonice Mundi* asistimos a la más completa reflexión desde la filosofía neoplatónica acerca de la armonía y sobre las interrelaciones entre los diferentes dominios en que las relaciones armónicas se presentan: la música, las matemáticas, la astronomía y la astrología según la interpretación de Kepler. Estos temas que habían orientado sus reflexiones desde su juventud vuelven ahora con más fuerza. De nuevo la armonía del mundo es su *leit motiv*, su objetivo, su visión del orden cósmico.

El concepto de armonía en Kepler es claramente platónico: desvelar una proporción armónica significa descubrir, comprender, advertir la semejanza que guarda la proporción y el orden en los objetos físicos con un arquetipo determinado de la armonía. Esto significa que en rigor, la armonía no es algo que defina por sí mismo un orden determinado de los objetos, sino que es necesario que se dé el encuentro entre una mente capaz de reconocer las proporciones y el orden mismo del mundo. En otras palabras, es un concepto relacional. *Es el alma la que dota de existencia a la armonía* (Caspar, 2003: 344). Estas reflexiones de Kepler sobre la armonía, ponen el acento en el sujeto que discierne, que pone en práctica sus facultades intelectuales, su capacidad de abstracción, su capacidad matemática y racional. Como resultado de esta aplicación de las facultades superiores de los seres humanos estos pueden llegar a tener experiencia de la contemplación del espectáculo de las armonías, una experiencia que, siendo rigurosos, se produce no desde la pasividad del mero espectador del mundo, sino como recompensa a los esfuerzos activos de una mente implicada en la búsqueda detectivesca del orden del mundo. Tal como Kepler hizo. No es menos cierto, sin embargo, puntualiza Kepler, que esta no es la única vía para advertir las armonías, puesto que los seres humanos tienen experiencia de la misma, aún siendo niños, a través de la música. La armonía de los tonos puede ser captada por un niño aunque no sepa nada de las razones armónicas que están a la base de las composiciones musicales.

El concepto de armonía es, en esencia, un concepto matemático más que musical, aunque para Kepler existe una unidad básica, esencial, entre ambas y por ello el Libro III de *Harmonice Mundi* está dedicado a la música, asociando las relaciones y razones numéricas con las razones armónicas, tonos y escalas musicales y en el Libro V encontramos la «música de los

planetas». Cada planeta, podríamos decir, según las relaciones numéricas correspondientes a sus distancias y velocidades orbitales establecidas por Kepler, se mueve en su órbita entonando una melodía particular. Kepler escribe:

Según esto, los movimientos de los cielos no son sino cierta polifonía sempiterna (inteligible, no audible) [...] Así que, por ejemplo, en menos de una hora, el hombre puede recrear la perpetuidad de todo el tiempo creado mediante una conjunción armónica de muchas voces, y, por lo mismo, gustar, en cierta medida, de la satisfacción de Dios, el Supremo artesano, con sus propias obras, por el dulce deleite que provoca esta música que imita a Dios (García Hourcade, 2000: 209).

La música que Kepler compuso para cada planeta era interpretada en las reuniones de la corte para deleite de todos aquellos que, aún no versados en matemáticas o astronomía, podían reconocer la armonía en las pequeñas piezas musicales que representaban la danza de los planetas.

V. Método, estilo y controversias

Según algunos observadores de su obra, la orientación epistemológica de Kepler, su estilo discursivo, su gusto por las relaciones numéricas, sus accesos místicos, su conexión estrecha con la astrología, entre otros elementos, pueden ser interpretados como signos inequívocos de la defensa de una posición cercana a las corrientes herméticas, esotéricas y alquímicas que se desarrollan desde el Renacimiento hasta entrado el S.XIX. Pero la diferencia entre el Kepler afín al platonismo y las corrientes «neoplatónicas» (Perdomo, 1999: 173-196) que tienen su origen en la interpretación del *Corpus Hermeticum*, el conjunto de tratados gnósticos traducidos por M. Ficino, que incorporan elementos procedentes de la magia, la alquimia, la cábala, la numerología, etcétera, puede establecerse con nitidez si atendemos a los términos en que se produce la polémica con uno de los máximos representantes de esta tradición: R. Fludd.

V.a. La polémica con R. Fludd: rechazo de las pseudociencias

R. Fludd, médico y filósofo inglés autor de obras en la tradición hermética o alquímica, fue criticado por sus contemporáneos, entre ellos, Kepler, quien estaba horrorizado por la descripción de Fludd de la relación armónica de los cielos. Sabemos que la propia descripción de Kepler bebe de las fuentes neoplatónicas, pero Kepler enfatiza la distinción que debe hacerse entre el verdadero matemático y los alquímicos (Perdomo, 2004: 329-350). Fludd buscaba misterios en los símbolos de acuerdo con la creencia en un plan cósmico preconcebido y sus proposiciones y armonías eran forzadas a encajar esos símbolos. Kepler, quizá tan obsesionado como él con su representación simbólica del mundo insistió, sin embargo, en que las hipótesis debían estar fundadas en premisas cuantitativas y demostrables matemáticamente, de tal manera que si una hipótesis no se acomodaba a sus observaciones, estaba dispuesto a modificarla. Fludd responde a Kepler caracterizándolo como un matemático del peor tipo, uno del vulgar montón que *se preocupan de las sombras cuantitativas* mientras que *los alquímicos y los filósofos herméticos entienden el verdadero núcleo de los cuerpos naturales*. En otras palabras, «... en vez de las matemáticas vulgares (usadas por los mercaderes y artesanos), Fludd propone el uso de las matemáticas formales por medio de la cual se puede penetrar en la esencia de las cosas y no ocuparse sólo de sus propiedades externas y contingentes.» (Fehèr, 1995: 16).

Los autores del S. XVII usaron la expresión «hermético» para significar también «alquímico» y así, por extensión para referirse a las prácticas, el lenguaje y las creencias ocultistas

que estaban asociadas con el mundo de la alquimia. Kepler usó la expresión «modo hermético» para señalar su objeción al estilo de pensamiento de R. Fludd. En el Apéndice del Libro V de su obra *Harmonices Mundi*, muestra su desacuerdo con las nociones de armonía cósmica elaboradas por R. Fludd en las primeras secciones de su obra *Utriusque Cosmi Historia*, que apareció en 1617 y 1618. Las notas de Kepler fueron el primer episodio en la larga serie de polémicas que colocan a R. Fludd en oposición a Mersenne, Gassendi y los constructores de la nueva ciencia y contribuyen a desarrollar el significado peyorativo que va adquiriendo el término «hermético». Fludd habla de la música cósmica justo en el momento en que Kepler también elabora su armonía del mundo, pero éste quiere distinguir tajantemente su estilo del estilo del pensador alquímico y se expresa en estos términos:

En el trabajo de Fludd hay muchas imágenes, en el mío diagramas matemáticos y letras. Se puede notar también que él se complace en los oscuros misterios de las cosas mientras que yo me esfuerzo por llevar esas mismas cosas, envueltas en la oscuridad, a la luz del entendimiento. El hábito de uno pertenece a los Químicos, Herméticos, Paracelsianos, el otro a la especialidad de los Matemáticos [...] Lo que él toma de los antiguos, yo lo extraigo de la naturaleza y lo construyo a partir de sus elementos, él hace un uso confuso e incorrecto de lo que toma a causa de la variación de opinión de la tradición, pero yo procedo con el orden natural, así que todo es correcto de acuerdo con las leyes de la naturaleza, y esto evita la confusión. De hecho, yo nunca atiendo a las opiniones establecidas por los antiguos excepto cuando no se sigue una confusión. Cuando él introduce la música en el cosmos, hay una gran diferencia entre nosotros: las armonías que él trata de enseñar son meros símbolos [...] poéticas y retóricas más que filosóficas y matemáticas. Este es el espíritu del texto, como el título *Macrocosmos* y *Microcosmos* hace explícito, siguiendo el celebrado axioma de Hermes, él hace que las cosas de arriba sean similares o análogas a las cosas de abajo (Copenhaver, 1990: 283).

Siguiendo el análisis de Copenhaver, en el texto seleccionado, Kepler dibuja claramente una tabla de oposiciones que establece un sentido peyorativo de «hermético» como opuesto a «filosófico» y «matemático», los términos que Kepler elige para describir el carácter de la nueva ciencia y el estilo característico de ésta que él mismo ayuda a instaurar. Contrasta los cuadros de R. Fludd con sus diagramas, los símbolos poéticos con su notación matemática, los misterios con la claridad, los argumentos basados en la autoridad y enredados en la tradición con sus explicaciones dictadas y ordenadas por las leyes de la naturaleza, la aplicación prolífica de la analogía a su más estricta visión de los usos de la analogía en matemáticas. Copenhaver acude a las tesis de R. Westman (Westman 1990: 145-204) y establece que las diferencias entre ambos pueden centrarse en el estatus que asignan a los signos pictóricos o escritos en su relación con las cosas. Así, Kepler usa los dibujos como apoyo a argumentos expresados en palabras y números, como tokens convenientes al aparato sensitivo humano y simbólico de realidades inteligibles y Fludd hace que sus dibujos sean esenciales, no auxiliares, y espera explicar el cosmos a través de sus láminas recreándolo poéticamente. Kepler explica y teoriza a través del análisis lingüístico, Fludd a través de la mimesis pictórica. Fludd desea imitar al Creador construyendo su propio libro del mundo elevando sus imágenes más allá de la mera representación o descripción, sus láminas presentan una realidad autónoma, independiente de la referencia a los objetos físicos (Copenhaver, 1990: 283-284).

Fludd pertenece a la tradición hermética, pero su epistemología poético-intuitiva y su psicología le sitúa en la línea de los espiritualistas alemanes tales como Jacob Boehme, Weigel y Paracelso, quienes creían que el conocimiento de la naturaleza se adquiría a través de la experiencia identificadora con el objeto, una búsqueda terapéutica de la verdad a través de la observación directa, la manipulación simbólica y la imaginación pictórica. La

terminología alquímica y astrológica proyecta también en esta tradición el drama del desarrollo espiritual humano. Este espiritualismo germano o teosofía, las nociones alquímicas paracelsianas, así como la cosmología y la teoría de la materia, además de los compromisos esenciales de Fludd con el hermetismo y el «pictorismo» es el cuadro de ideas que Kepler tiene en mente cuando critica a Fludd en los siguientes términos:

Tú dices que cierta comprensión del mundo de forma secular no es posible, sino a través de la sabiduría teosófica [...] Ciertamente eres un teosofista, otros son cosmofofistas. Tú eres sabio en cantidades invisibles, números incontables, en un sol espiritual en el movimiento espontáneo de los planetas discernible sólo por la mente (Copenhaver, 1990: 284).

Lo cierto es que aunque Kepler quiera diferenciarse de esta orientación, su propio trabajo para un observador contemporáneo como Galileo no está exento de esta búsqueda de un orden cósmico ordenado y puesto en movimiento por el *Primer Geómetra* gracias a las emanaciones solares; en concreto, le desagradaba la idea de unas supuestas fuerzas misteriosas actuando a distancia. Así, no sólo rechazó la sugerencia de Kepler de que el Sol pudiera ser la explicación del movimiento de los planetas, sino que ello le lleva también a rechazar la idea, como buen mecanicista, de que una influencia lunar fuese la causa de las mareas. Galileo se expresa en los siguientes términos:

Però entre todos los grandes hombres que han filosofado sobre este asombroso efecto de la naturaleza, Kepler me asombra más que ningún otro. De mente libre y aguda, me asombra que él, que estaba familiarizado con los movimientos atribuidos a la Tierra, después haya dado crédito y aprobación a los predomios de la Luna sobre el agua y a propiedades ocultas y puerilidades semejantes (Galileo, 1994: 400).

Por otro lado, la tercera ley de Kepler que establece una proporcionalidad matemática entre los cuadrados de los tiempos de revolución de cada planeta y los cubos de sus distancias medias al sol, ¿es una verdadera ley de la naturaleza o sólo numerología? se pregunta Galileo, concedor de la gran inventiva geométrica de Kepler, quien se había comprometido públicamente con la opinión de que el telescopio revelaría también la existencia de dos satélites de Marte y ocho de Saturno, de tal manera que así el número de satélites de cada planeta se incrementaría de acuerdo con una secuencia geométrica regular: uno de la Tierra, dos de Marte, cuatro de Júpiter y ocho de Saturno: el perfecto y regular orden cósmico geométrico (Cohen, 1989: 150).

Es cierto que el viejo fantasma de la estructura geométrica del mundo está siempre presente, pero no es menos cierto que Kepler supo siempre controlar su creatividad e imaginación plegándose al tribunal de la experiencia, aún cuando, es cierto, cometió algunos errores. La adecuación empírica de las hipótesis es la base de la ciencia moderna, en la que la creatividad e imaginación son una pieza indispensable, como indispensable es también someterlas al control de la experiencia. Este fue el gran legado, desde el punto de vista metodológico, de Kepler.

VI. Preparación de su legado

VI.a. Epitome Astronomiae Copernicanae (1618 y 1621) y Tabulae Rudolphinae (1627)

El *Compendio de Astronomía Copernicana* es la obra que Kepler concibió como su obra magna, su legado para la posteridad, a la altura del *Almagesto* de Ptolomeo o el *De Revolutionibus* copernicano. Por ello, y debido también a las circunstancias de la vida de Kepler en estos años, la redacción e impresión de la obra se realiza a lo largo de muchos años, tarea que comenzó

incluso antes de la publicación de *Harmonice Mundi*. Así los primeros libros se imprimen en 1618 y los siguientes en 1621. El objetivo del texto es mostrar de forma completa y didáctica todos sus bellos resultados en astronomía, las leyes planetarias y la interpretación física y matemática de todos los movimientos planetarios, la descripción completa de nuestro sistema solar desde un punto de vista dinámico y no meramente cinemática, esto es, atendiendo a las causas físicas del movimiento. Puede ser considerado, por tanto, el primer tratado moderno sobre mecánica celeste. Y sin embargo, la escasa relevancia otorgada a esta obra por la mayor parte de los contemporáneos de Kepler, así como en los manuales al uso de historia de la ciencia, ha de encontrar una explicación. Según su biógrafo Caspar, en cuyo estudio basamos principalmente nuestra aportación, Kepler se habría equivocado al elegir el título de la obra, dando a entender que consiste en una exposición más o menos completa o renovada de la obra de Copérnico, edificio que completa con la introducción de las leyes y la explicación física de los movimientos celestes.

Pero, de hecho, una mirada atenta a su contenido nos permite advertir, tal como subraya García Hourcade, que el conjunto de la obra no tiene de copernicanismo más que la consideración de los planetas girando alrededor del Sol. En la obra ya no hay círculos deferentes, epiciclos o excéntricos, lo que advertimos es la explicación completa del movimiento de los planetas girando en órbitas elípticas gracias a la influencia magnética que reciben del cuerpo del Sol y cumpliendo con las tres leyes que rigen su comportamiento, como un perfecto reloj sincronizado. No son pocos los historiadores que reclaman una mayor atención al trabajo kepleriano, no como un mero antecedente de Newton, sino como aquel que comprendió por primera vez de forma bastante aproximada los mecanismos que hacen funcionar el mundo. Newton no menciona en su obra a Kepler y llega a atribuirse la paternidad de la Tercera Ley de Kepler, (García Hourcade, 2000: 214) aunque contemporáneos como Hooke y Halley habían planteado la cuestión astronómica a Newton como la necesidad de ofrecer un fundamento dinámico más complejo a las leyes de Kepler. Es cierto que Kepler no es Newton, pero no es menos cierto que la solución newtoniana parte de forma ineludible de las leyes keplerianas de una manera mucho más importante que lo que muestran los manuales al uso o las exposiciones más ortodoxas acerca de la labor de Newton. Newton desarrolló su teoría tratando de hallar en primer lugar la magnitud de la fuerza centrípeta (una vez descrita esta) y para ello combina el resultado de la validez de la segunda ley de Kepler con la primera. Esto le lleva a establecer que si la órbita es una elipse y la fuerza centrípeta se dirige hacia uno de sus focos, lugar en el que está situado el Sol, entonces esa fuerza variará de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (ya que la fuerza se dirige en todas las direcciones y no sólo en el plano de la eclíptica como había supuesto Kepler). Halley había preguntado a Newton en su visita en 1684: ¿qué órbita describiría un planeta sobre el que actuara una fuerza inversa al cuadrado de la distancia?, Newton lo que hace es deducir la ley de fuerza requerida para que un cuerpo recorra una órbita elíptica (Rioja y Ordóñez, 1999: 210).

Volviendo al *Epítome*, en 1619, los primeros libros publicados fueron incluidos en el *Índice de libros prohibidos* de la Iglesia católica y Kepler temió que toda su obra fuera a tener ese destino. Tres años antes, en 1616, la propia obra de Copérnico había sufrido ese mismo destino gracias, dice Kepler «Al rudo comportamiento de unos pocos que presentaron las enseñanzas astronómicas en un lugar inoportuno y siguiendo unos métodos inadecuados.» (Caspar, 2003: 382).

La referencia a Galileo es clara. A estas alturas Kepler, que buscó la opinión y aprobación del gran Galileo que había logrado construir un telescopio y observado las novedades en los cielos como pruebas de la verdad copernicana y que él mismo se había apresurado a defender como ciertas en su *Conversación con el mensajero sideral*, no parece otorgar ya tanto respeto al italiano.

Kepler tiene la habilidad de defender sus obras como no contrarias a las Sagradas Escrituras, pero es obvio que Kepler está alejado del asfixiante control de la Inquisición católica, por ello puede seguir publicando sus obras, el resto de los Libros del *Epítome* y las *Tablas*. En efecto, Kepler debía finalizar aún otro viejo proyecto: el de la publicación de las *Tablas Rudolfinas*, pero antes debía sufrir un nuevo traslado obligado por la guerra desatada por la intensificación del proceso de Contrarreforma. Linz, la ciudad en la que más años había logrado residir de forma permanente: catorce años, queda atrás en 1626 y sus últimos años los vive en las ciudades de Ulm y Sagan, donde prepara y supera las tremendas dificultades que encuentra para la impresión de la obra, e idea nuevos proyectos.

Las *Tablas* sirvieron de base para los cálculos astronómicos a los astrónomos y a los navegantes para configurar sus cartas náuticas y determinar su localización geográfica durante más de cien años. De hecho, parecería que Kepler interpretó la elaboración de las tablas como la culminación de su proyecto astronómico: legar a la humanidad, basándose en todos sus descubrimientos, un instrumento que le permitiera trazar con total precisión cualquier cálculo en que fuera imprescindible tomar en cuenta los sucesos del sistema solar, ya sea para calcular efemérides, realizar calendarios, predecir eclipses, localizar geográficamente cualquier región, etcétera. Al mismo tiempo, la eficacia y exactitud de los cálculos basados en ellas eran una prueba de la verdad de sus descubrimientos astronómicos. La primera parte de la obra ofrece las instrucciones para calcular las posiciones planetarias vistas desde la Tierra, y en la segunda parte se ofrecen las tablas de posiciones, además de un catálogo de mil estrellas, catálogo que en su mayor parte había sido realizado por Tycho Brahe, y finalmente, un catálogo de ciudades de todo el mundo con datos de su posición. La obra apareció publicada con un bello frontispicio en el que bajo el techo abovedado de un templo de diez columnas aparecen un antiguo caldeo, Hiparco, Ptolomeo, Copérnico y Tycho Brahe, los astrónomos más destacados de la historia, entre los que él se incluye, pero sólo en un segundo nivel, en una de las caras del zócalo del templo. Se dibujó a sí mismo en su mesa de trabajo a la luz de una vela, como quizá pasó la mayor parte de las horas de su vida.

VI.b. Creatividad y comunicación. El Somniun

El *Sueño* (Kepler, 2001) fue un proyecto que Kepler había iniciado veinticinco años atrás, en sus años en la Universidad de Tubinga. El ya estaba convencido de la verdad copernicana, pero entendía que era sumamente difícil defender el movimiento de la Tierra por encima de la experiencia del sentido común de su inmovilidad. De tal manera que ideó una estrategia diferente para subrayar la ambigüedad que subyace a toda experiencia del observador que no se encuentra en un lugar privilegiado para discernir esta cuestión del movimiento de la Tierra. Imagina pues cómo serían esas apariencias celestes para supuestos seres que habitan la luna. Lo que era en principio un ensayo, se convirtió en una obra de ciencia ficción. El narrador es el propio Kepler, quien tras observar las estrellas y la luna cae en un profundo sueño. Y sueña que está leyendo un libro que comienza de esta forma: *Mi nombre es Duracotus, nací en Islandia, a la que los antiguos llamaban Thule. Mi madre era Fiolxhilde...* La madre de este segundo

narrador, Fiolxhilde, es una mujer sabia, que recoge hierbas, realiza misteriosos ritos, y vende a los marinos islandeses mágicos vientos.

Después de que Duracotus estropeará uno de sus encantamientos al curiosear en él, ella le entrega a un capitán marino que le lleva a la isla de Tycho Brahe, Hven, donde aprende astronomía. Después de cinco años, vuelve a casa. Su madre, arrepentida, se alegra por su vuelta y por sus nuevos conocimientos de astronomía. Lo que él ha aprendido de los libros, le dice, ella lo aprendió de un espíritu manso e inocuo y gracias al cual viaja a diferentes lugares y conoce extraños mundos y habitantes. E idea convocarle para que le hable a Duracotus sobre Levanía, nombre con el que es conocida la luna entre sus habitantes. Así lo hace y el espíritu, ahora el tercer narrador, explica cómo son los cielos vistos de la luna. Habla también de los habitantes de la luna, y de cómo observan a la Tierra llamada por ellos Volva.

Las cuestiones astronómicas se van desplegando en el texto mostrando a una Tierra que gira sobre sí misma cada 24 h. e incluso describe el punto entre la Tierra y la Luna donde las atracciones gravitacionales de cada cuerpo cesan (Voelkel, 1999: 128). También expresa Kepler su idea de que en un futuro no muy lejano los seres humanos construirían barcos espaciales con velas especialmente adaptadas a la brisa celeste que les permitirá explorar los otros mundos del Universo. Este es, en rigor, el primer libro de ciencia ficción escrito con anterioridad a los textos de Julio Verne. La intención comunicadora de su visión astronómica y el estilo claramente literario de *Somnium seu astronomia lunaris* (Sueño o astronomía lunar) refleja su objetivo: proporcionar a la gente *pasatiempos que la seduzcan con suavidad*: los movimientos planetarios, el Sol central, las órbitas elípticas y los movimientos de la Tierra, son así asimilados con mayor naturalidad.

Kepler ideó el *Somnium* situándose como un espectador lunar del Universo, y solucionó el problema de la órbita terrestre situándose como un espectador desde Marte. Kepler supo ver lo que otros no veían, desarrollar una perspectiva diferente desde la que abordar la imagen del Universo, supo advertir con nitidez el problema fundamental de la astronomía observacional: definir bien las coordenadas del observador, al fin y al cabo no hay lugares privilegiados desde el que observar. Pero sí mentes privilegiadas como la suya guiadas por la creatividad y el rigor, el entusiasmo y el esfuerzo.

Kepler murió el 15 de noviembre de 1630 en la ciudad de Ratisbona pocos días después de llegar a ella para tratar de realizar algunos cobros de dinero de los siempre prometidos honorarios que siempre hubo de solicitar una y otra vez. Fue enterrado en el cementerio de la ciudad, un cementerio y una tumba que desaparecieron por la guerra. Ninguna lápida señala el lugar de su descanso, mientras que Galileo está en la Santa Croce y Newton en un lugar destacado de la Abadía de Westminster. Aún así la genialidad de este gran astrónomo es universalmente reconocida, y 2009, el año de la Astronomía, recordó los 400 años pasados desde que Galileo enfocó su telescopio hacia los cielos, los mismos transcurridos desde se publicó la obra que inaugura la astronomía moderna: *Astronomia Nova* de Johannes Kepler.

VII. Bibliografía

- Brahe, T. (1972 [1598]), *Tychonis Brahe Dani Opera Omnia*, Amsterdam, Swets & Zeitlinger.
- Caspar, M. (2003 [1959]), *Johannes Kepler*, Madrid, Acento.
- Cohen, I. B. (1989 [1960 y 1985]), *El nacimiento de una nueva física*, Madrid, Alianza.
- Copenhaver, B. P. (1990), «Natural Magic, Hermetism, and Occultism», en Lindberg, D. y Westman, R. (eds.), *Reappraisals of the Scientific Revolution*, Cambridge University Press.
- Copérnico, N. (1983), *Sobre las Revoluciones*, Madrid, Tecnos.
- Crombie, A. C. (1994), *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition*. London, Duckworth, 3v.
- Descartes, R. (1981 [1637]), *Discurso del Método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*. Madrid, Quintas Alonso / Alfaguara.
- Dreyer, J. L. E. (1953 [1906]), *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, Nueva York, Dover Publications Inc.
- Elena, A. (1985), *Las quimeras de los cielos. Aspectos epistemológicos de la revolución copernicana*, Madrid, S. XXI Editores.
- _____ (1989) *A hombros de gigantes. Estudios sobre la primera revolución científica*, Madrid, Alianza Universidad.
- Fehér, M. (1995), *Changing Tools. Case studies in the history of scientific methodology*, Budapest, Akadémiai Kiadó.
- Galilei, G. (1994 [1632]), *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, Madrid, Alianza.
- García Hourcade, J. L. (2000), *La rebelión de los astrónomos. Copérnico y Kepler*, Madrid, Nivola.
- Gilbert, W. (1958 [1600]), *De Magnete*, New York, Courier Dover Publications.
- Kepler, J. (1992 [1596]), *El secreto del Universo*, Madrid, Alianza.
- _____ (1992 [1609]), *New Astronomy*, Cambridge, Cambridge University Press.
- _____ (1984 [1611]), *Dissertatio cum Nuncio Sidereo*. En *El mensaje y el mensajero sideral*, Madrid, Alianza.
- _____ (1997 [1619]), *The Harmony of the World*, Philadelphia, American Philosophical Society.
- _____ (1995 [1621]), *Epitome of Copernican Astronomy* (Libros IV y V), New York, Prometheus Books.
- _____ (2001 [1634]), *El sueño o la astronomía de la luna*, Huelva, Servicio de publicaciones de la Universidad de Huelva.
- _____ (1938-1998), *Johannes Kepler Gesammelte Werke*, Munich, Kepler-Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Eds. M. Caspar / F. Hammer / V. Bialas.
- Kuhn, T. S. (1985 [1957]), *La revolución copernicana*, Barcelona, Ariel.
- Perdomo, I. (1999), «Las imágenes de la Naturaleza: la retórica de la ciencia en los siglos XVII y XVIII», en *Laguna. Revista de Filosofía*, Servicio de publicaciones de la Universidad de La Laguna, N° 6, pp. 173-196.
- _____ (2004), «La retórica de la ciencia. El caso de la Alquimia en R. Fludd», en *Los Orígenes de la Ciencia Moderna*, Islas Canarias, Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia / Consejería de Educación del Gobierno de Canarias, pp. 329-350.
- Rioja, A. y Ordóñez, J. (1999), *Teorías del Universo. Vol II. De Galileo a Newton*, Madrid, Síntesis.
- Voelkel, J. R. (1999), *Johannes Kepler and the New Astronomy*, Oxford University Press.
- Westman, R. S. (1975), «The Melanchthon Circle, Rethicus, and the Wittenberg interpretation of the Copernican theory», en *Isis*, v. LXVI, N° 232, pp. 165-193.
- _____ (1990 [1984]), «Naturaleza, arte y psique: Jung, Pauli, y la polémica Kepler-Fludd», en Vickers, B. (comp), *Mentalidades ocultas y científicas en el Renacimiento*, Madrid, Alianza Universidad.

11. Antonie-Laurent Lavoisier (1743?-1794) y la química del siglo XVIII

I. Presentación

Hablar de Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) era, hasta hace poco tiempo, hablar del «padre de la química moderna», del «primer» formulador de la ley de la conservación de la materia, del «inventor» de la balanza, del «vencedor» de la teoría del flogisto, y del aguerrido combatiente que consiguió, luchando «en solitario» hasta el agotamiento contra viento y marea, cambiar la «oscura» tradición alquímica que mantenía en las más profundas tinieblas al resto del universo. Además, su trágica muerte lo convirtió en un mito, agrandado por la labor, casi hagiográfica, que muchos de sus sucesores realizaron de él. Pero la realidad no fue exactamente así. Es bien cierto que el trabajo de Lavoisier consistió, según sus propias palabras, en el inicio de «una revolución en física y en química» (frase anotada por Lavoisier en su cuaderno de laboratorio el 21 de febrero de 1773; Bensaude-Vincent, 1993: 127), pero su vida y su obra han sido revisadas últimamente desde un nuevo punto de vista, que ha mostrado su auténtica dimensión. En este trabajo se muestra la figura real de Lavoisier, explicando por qué mantuvo en secreto un descubrimiento importantísimo durante muchos meses en 1772, qué quiso decir en 1773 cuando habló de dicha revolución, cuál fue su papel en ella, y con qué poderosas ayudas contaba para convertirse en el científico brillante que realmente fue. Asimismo, se muestra su honda preocupación por mejorar los aspectos docentes de la química de su época, que, si bien era una ciencia reconocida y útil, mostraba algunas carencias que Lavoisier intentó —y consiguió— solucionar. Para elaborar este capítulo, se han consultado algunas de las obras originales de Lavoisier, así como los estudios que varios historiadores de la química han realizado sobre él a lo largo del tiempo. Parte de este trabajo está basado en otras publicaciones de la autora (Pellón, 2002a y 2002b), pero ahora, como novedad, se ha profundizado en algunos aspectos de la revolución pedagógica que Lavoisier buscaba, a la vez que reformaba la doctrina química establecida, y participaba en la revolución

política que acabó con su vida. Esperemos que a nosotros, docentes del siglo XXI, la vida y la obra de este genial químico ilustrado nos pueda servir de ayuda en nuestro quehacer diario.

II. Un triángulo singular: Lavoisier, ciencia y sociedad

Cuando nació Lavoisier, la estructura social francesa era una pirámide, en cuyo vértice se encontraba la familia real, sostenida por tres órdenes feudales: el Primer Estado (clero), el Segundo Estado (nobleza), y el Tercer Estado, formado por los comerciantes, banqueros, médicos, abogados, artesanos y campesinos, es decir, por el resto de la sociedad. Según este modelo, el clero instruiría a las personas en los aspectos espirituales y culturales, la nobleza defendería al país ante sus enemigos externos e internos, y el Tercer Estado, que tenía derecho a ser instruido por la Iglesia y a ser defendido por la nobleza, debía sostener a ambos grupos y a la realeza con su trabajo y con los impuestos.

El rey Luis XVI (1754-1793) heredó de su abuelo Luis XV (1710-1774) un país en el que imperaban el mal gobierno y las intrigas, y cuando en 1778 Francia entró en la guerra de la independencia americana al lado de los colonos sublevados, el coste económico del conflicto desgastó completamente al país. A finales del siglo, los dos primeros grupos sociales continuaban manteniendo sus privilegios, y el pueblo llano pagaba cada vez más impuestos, por lo que su situación económica empeoraba trágica y progresivamente. Esta desigualdad, unida a otros muchos factores, produjo de forma irreversible el conflicto denominado *Revolución Francesa*, que tuvo lugar paralelamente a la revolución química que protagonizaron los químicos galos.

Lavoisier nació el 26 de agosto de 1743 en París. Su padre, abogado, trabajaba como procurador en el Parlamento parisino, y su madre, Émilie Punctis, que pertenecía a una familia de juristas de posición acomodada, falleció cuando él tenía cinco años. El niño estudió como alumno externo en el prestigioso *Collège des Quatre Nations*, más conocido por el nombre de su protector, el cardenal Jules Mazarin (1602-1661), y durante los nueve años que permaneció en él, cursó, entre otras asignaturas, lengua, literatura, filosofía, matemáticas y física. Al finalizar el colegio en 1761 inició los estudios de derecho, en los que se licenció en 1764, y continuó con una formación multidisciplinar que incluía clases de física con el abate Nollet (1700-1770), de botánica con Bernard de Jussieu (1699-1777) en el *Jardin du Roy* (actual *Jardin des Plantes*), y de química con Guillaume François Rouelle (1703-1770). Además, aprendió mineralogía con Jean-Étienne Guettard (1715-1786), amigo de su padre, conservador del gabinete de Historia Natural del duque de Orleans, y miembro de la prestigiosa Real Academia de Ciencias de París.

En esta época, dicha Academia de Ciencias era el principal foco de luz que iluminaba al mundo, que ahora se analizaba a través de «las luces» que proporcionaba el razonamiento. Este fenómeno, denominado «Ilustración», tuvo su origen en el perfeccionamiento de las ciencias experimentales que generó la revolución científica producida en el siglo XVII, y suponía que el conocimiento profundo de los fenómenos sería el que eliminaría las supersticiones y la ignorancia, y ayudaría al progreso de la sociedad. Con este objetivo se investigaron las numerosas aplicaciones de la ciencia a la técnica y a los distintos modos de fabricación, entre otras razones, para obtener beneficios económicos. Todas las ramas de la ciencia crecieron; a la luz de las ideas de Isaac Newton (1642-1727) y de otros científicos, se pudo estudiar la naturaleza según un modelo mecánico muy sencillo, y sobre todo, fundamentado en la razón. La mejora de las ciencias físicas y matemáticas ayudó al auge del

cálculo astronómico, así como al perfeccionamiento de la óptica, la dinámica, la hidrodinámica, la electricidad y el magnetismo. Linneo transformó los estudios de botánica, y cada vez eran más numerosos los minerales que se descubrían y analizaban. Para potenciar todo esto, los distintos gobiernos, entre otras medidas, fundaron academias e instituciones docentes e investigadoras, en las que se impulsó el estudio de la ciencia. Los científicos adquirieron un gran prestigio, y «hacer ciencia» se puso de moda. También se generó la necesidad de intercomunicación entre ellos, así que, además de florecer como nunca la publicación de libros, nació el periodismo científico, vehículo perfecto con el que se favoreció la transmisión de las ideas y las teorías (Puerto, 2001).

Lavoisier no fue ajeno a este movimiento, y sobre todo admiraba el orden y el método de las matemáticas. Pero en 1767 realizó, junto con Guettard, un viaje científico de cuatro meses a la cordillera de los Vosgos, sistema montañoso situado en el nordeste de Francia. Sus objetivos eran medir alturas de montañas, espesores y direcciones de estratos, y trazar diferentes planos de la zona. Además, efectuaron numerosos análisis de aguas minerales, ayudados por un laboratorio químico portátil; para Guettard, la química sólo era una ciencia auxiliar al servicio de la mineralogía, pero consiguió deslumbrar al joven Lavoisier, quien pronto la convertiría en el centro de su universo científico. Los resultados de su trabajo fueron presentados ante la Academia de Ciencias en febrero de 1765, cuando Lavoisier tenía 21 años, y entre ellos se encontraban las dos primeras memorias de carácter químico que escribiría, que trataban sobre la composición y la solubilidad del yeso. La primera de ellas fue también su primera publicación impresa (Lavoisier, 1768).

Pero este no era el primer contacto de Lavoisier con la Academia, de la que deseaba formar parte desde su juventud. En 1764 ya había presentado un proyecto para alumbrar las calles de la capital francesa de forma eficaz y económica, al participar en un concurso auspiciado por ella. A pesar de no obtener el premio, el rey Luis XVI le concedió, en sesión pública de la Academia celebrada el 9 de abril de 1766, una distinción especial por ser la monografía que presentaba el mejor tratamiento teórico del tema. En 1768 fue admitido como «adjunto químico supernumerario», y en 1772, obtuvo la categoría de «asociado». A partir de este momento, utilizaría los numerosos y poderosos recursos que le proporcionaba su pertenencia a la Academia, para desarrollar una brillante carrera científica.

De acuerdo con la educación que recibió en su familia, Lavoisier fue un fiel servidor de la monarquía. En 1768, con una herencia familiar que había recibido dos años antes, compró una acción de la *Ferme Générale*, empresa privada contratada por el Estado francés para recaudar los impuestos indirectos (la sal, el tabaco, las bebidas...), y para combatir el contrabando. Su sistema de cobro de impuestos posibilitaba los abusos, por lo que los que trabajaban para ella, denominados «fermiers», no eran muy queridos. Sin embargo, gracias a ella, Lavoisier pudo realizar una fructífera actividad en la administración pública, porque poseía una inmensa capacidad de trabajo. Su jornada laboral comenzaba a las seis de la mañana en el laboratorio, en el que permanecía hasta las ocho; realizaba trabajo administrativo el resto del día, y volvía al laboratorio de 19 a 22 horas. También dedicaba el fin de semana completo a la investigación química, y con los ingresos que le producía la *Ferme*, Lavoisier pudo adquirir carísimos instrumentos para dotar sus magníficos laboratorios, así como adquirir costosos libros. En 1771 se casó con Marie-Anne Pierrette Paulze (1758-1836), única hija de uno de los directores generales de la *Ferme*, cuando él tenía 28 años, y ella casi catorce. Marie-Anne pronto se convirtió en su cómplice, secretaria y colaboradora, y gracias a su ayuda tuvo conocimiento de los escritos de Priestley, Cavendish y Kirwan, porque era ella

quien traducía al francés las obras científicas inglesas, lengua que Lavoisier no hablaba. Por ejemplo, Marie-Anne tradujo un texto de Richard Kirwan dedicado al estudio del flogisto y a la constitución de los ácidos, que fue publicado en francés en 1788, con anotaciones de Lavoisier y sus colaboradores (Kirwan, 1784). Marie-Anne participaba habitualmente en las reuniones semanales de su esposo con otros científicos, recibió clases del pintor Jacques-Louis David (1748-1825), y fue la autora de los dibujos que ilustran los grabados del famoso *Tratado elemental de Química*, (Lavoisier, 1789), así como los de los experimentos sobre la respiración que realizó su marido junto con Armand Séguin.

Pero la situación en la que se encontraba la ciencia química en la segunda mitad del siglo XVIII era un poco menos afortunada que la del resto de disciplinas científicas, a pesar de que en esta época se habían perfeccionado los procedimientos de síntesis de numerosos compuestos de uso comercial, había aumentado el número de sustancias con las que se trabajaba en el laboratorio, y se había conseguido identificar una gran cantidad de gases, así como simplificar su manipulación en el laboratorio. Era una ciencia fructífera, que se encontraba al servicio de otras disciplinas como la medicina, la farmacia o la geología, pero que, a pesar de todo, presentaba algunas deficiencias. Por ejemplo, no existía un modelo teórico que explicara de forma completa los hechos experimentales, ni un lenguaje sistemático y concreto que sirviera como herramienta de comunicación entre los químicos.

Esta situación quedó claramente expuesta en la *Encyclopédie* (Diderot; d'Alembert, 1751-1768), obra monumental de la Ilustración. Estaba estructurada de forma alfabética por temas, y se convirtió en el modo de expresión de las ideas ilustradas, reflejando la situación de la ciencia y la técnica de la época. Como interpretaba el mundo desde un punto de vista racional, su publicación produjo el rechazo del clero y de los gobiernos tradicionales, así como bastantes discusiones entre sus partidarios y sus detractores (Branchi, 1999). Para Gago (1982), la imagen de la química que mostraba la *Encyclopédie* era bastante inferior a la que mostraban el resto de las disciplinas, y según Gabriel-François Venel, artífice de la mayoría de los términos químicos en 1753, se hacía necesaria la llegada de un químico «hábil, entusiasta y atrevido», que elevara su nivel hasta el que tenían las demás materias. Es decir, desde 1753 se esperaba una revolución en el sistema teórico que estaba vigente en la química, así que la que se produjo fue, por lo tanto, una «revolución anunciada».

Desde hacía tiempo se intentaba encontrar una explicación al mecanismo de la acción del fuego sobre las sustancias, fenómeno por el que los materiales combustibles como el carbón o el azufre ardían desprendiendo llamas y calor, y los metales se transformaban en sustancias completamente diferentes, llamadas «cales» (nuestros actuales óxidos metálicos). Para ello, Johann Joachim Becher (1635-1682) imaginó en 1669 la existencia en el interior de las materias de una tierra inflamable (*terra pinguis*), que explicaba la combustibilidad. Esta idea se transformó en la *teoría del flogisto* gracias al médico Georg Ernst Stahl (1660-1734), quien supuso que todos los metales y los cuerpos combustibles contenían un principio común, el *flogisto* (del griego, «llama»), idéntico en todos, que se eliminaba durante la combustión o calcinación, y podía transmitirse de un cuerpo a otro, porque unas sustancias eran ricas en él, y otras, escasas. Así las «cales», pobres en flogisto, se transformaban en metales si captaban el flogisto proveniente de sustancias ricas en ese principio, como el carbón de leña, el aceite, etcétera, calentadas junto a ellas. De acuerdo con esta teoría, la reacción que se producía era:



El flogisto también explicaba la reacción inversa; los metales, ricos en flogisto, expulsaban este principio al aire cuando se calcinaban. El flogisto era invisible, se encontraba oculto, se podía transmitir de un cuerpo a otro, y no podía obtenerse en estado puro, porque siempre formaba combinaciones. Explicaba bien casi todas estas reacciones, aunque algunos detalles experimentales se ajustaban a esta concepción de una forma artificial. Por ejemplo, el hecho de que los metales aumentaran de peso durante la calcinación, a pesar de que durante ese proceso se perdía flogisto, se justificaba admitiendo para dicha sustancia un peso negativo. A pesar de que estaba claro de que algo fallaba en esta teoría, la mayoría de los químicos franceses la adoptaron aproximadamente a partir de 1750, y quedó reflejada en los textos de la época, como en las lecciones de Guillaume François Rouelle, profesor de química de los estudiantes de medicina y farmacia en el *Jardín du Roi* en París (Brock, 1998), o en el libro de texto del médico Pierre Joseph Macquer (1718-1784) (Macquer, 1749), del que se publicaron varias ediciones en 1751, 1753 y 1756, y se tradujo al inglés en 1756 y 1758. Hasta este momento, nadie imaginaba el papel fundamental que ejercía el oxígeno en las combustiones, porque no se tenía en consideración al estado gaseoso. Pero a lo largo del siglo XVIII se mejoraron las técnicas para estudiar las propiedades de estos compuestos, y comenzó su estudio en profundidad. Gracias al aparato inventado por Stephen Hales (1677-1761), denominado «cajón neumático» o cuba hidroneumática, se pudo recuperar el gas producido en una reacción química, e incluso realizar medidas cuantitativas de estos productos. En su obra *Vegetable Staticks* (Hales, 1727), Hales concluía que el «aire» (gas) podía existir «fijo» en algunas sustancias, y ser desprendido al reaccionar éstas entre sí. El funcionamiento de su invento era muy sencillo. Al calentar o quemar distintas sustancias, los gases desprendidos pasaban por un tubo acodado hasta un recipiente lleno de agua. Las burbujas de gas eran recuperadas en un balón de vidrio, que se encontraba medio sumergido de forma invertida en el recipiente con agua (Ihde, 1984). Así, en las décadas de 1760 y 1770 se desarrolló en toda Europa la denominada «química neumática», cuyo principal objetivo era recoger e identificar los gases producidos en las reacciones, tarea en la que destacaron los químicos ingleses, sobre todo el teólogo y químico Joseph Priestley (1733-1804). Ellos realizaron un excelente trabajo de química experimental y cuantitativa, y utilizaron diferentes aparatos de laboratorio de forma sistemática y exacta, como los eudiómetros. En este momento se pudo efectuar el análisis volumétrico de determinadas mezclas gaseosas, o la síntesis de ciertos compuestos gaseosos, a partir de mezclas de otros gases en cuyo seno se hacía saltar una chispa eléctrica. A pesar de la importancia de sus hallazgos, los ingleses mostraron su trabajo de una forma modesta, sin la intención de encabezar ninguna «revolución química» ni de formar una nueva teoría, ya que la teoría del flogisto, de momento, lo explicaba todo de forma más o menos satisfactoria.

En un principio, los químicos franceses no vieron la importancia del papel de los gases en las reacciones, porque todavía consideraban que el aire atmosférico era una materia inerte, «un simple receptáculo de las exhalaciones» (Poirier, 2006). Sin embargo, a principios de 1770, Jean Charles Philibert Trudaine de Montigny (1733-1777), director del *Bureau du Commerce* de París y miembro de la Academia, encargó a Joao Hyacintho de Magalhaens (o Magellan) (1722-1790), portugués afincado en Inglaterra y amigo de varios científicos como Franklin o Watt, que le comunicase cuáles eran las últimas novedades inglesas. Magalhaens informó a Macquer de los trabajos de Priestley en marzo de 1772, Macquer los expuso ante la Academia el 1 de abril de dicho año, y el 14 de julio, Trudaine encargó a Lavoisier que repitiera las experiencias de Priestley. Así se inició su interés por los gases, a la vez que abría

otras líneas de investigación, como los fenómenos de la combustión. El 20 de octubre de 1772 entregó al secretario de la Academia sus resultados sobre varios experimentos que había realizado al quemar fósforo, en los que mostraba que el producto de la reacción (anhídrido fosfórico) pesaba más que el fósforo inicial, conclusión que contradecía a la teoría del flogisto. El 1 de noviembre de 1772, Lavoisier confió al Secretario de la Academia un sobre lacrado, con la instrucción expresa de que no fuera abierto hasta que él se lo indicara. Este hecho ocurrió el 5 de mayo de 1773. Cuando el secretario abrió dicho sobre, se encontró en su interior una nota en la que el autor indicaba, por triplicado, que había realizado un importante descubrimiento, exponía una interpretación teórica del fenómeno que describía, lo confirmaba, e incluso generalizaba su teoría a todos los fenómenos similares, que eran las combustiones. Lavoisier resumía, en unas breves líneas, lo que se puede considerar el paradigma del método experimental (observación de unos hechos, enunciación de una hipótesis, verificación de la misma, elaboración de unas conclusiones...). Este pliego lacrado es un ejemplo perfecto del concepto de revolución científica, porque un único investigador, en una sola página, convulsionó las ideas formalmente establecidas a lo largo de toda una época (Brock, 1998; Gago, 1982). En el pliego ponía (Bensaude-Vincent, 1993: 117-8):

Hace ocho días que he descubierto que el azufre al arder, lejos de perder su peso, le ocurre lo contrario; es decir, que de una libra de azufre se puede obtener mucho más que una libra de ácido vitriólico [sulfúrico], abstracción hecha de la humedad del aire; al igual que con el fósforo: este aumento de peso proviene de una cantidad prodigiosa de aire que se fija durante la combustión y que se combina con los vapores.

Este descubrimiento, que he constatado con experimentos que me parecen decisivos, me hace pensar que lo que se observa en la combustión del azufre y del fósforo podía muy bien tener lugar en todos los cuerpos que adquieren peso por la combustión y la calcinación; y estoy persuadido de que el aumento de peso de las cales metálicas [óxidos metálicos] tiene la misma causa. La experiencia ha confirmado totalmente mis conjeturas; he hecho la reducción del litargirio [óxido de plomo (II)] en recipientes cerrados, con el aparato de Hales, y he observado que se desprendía, en el momento en que pasaba la cal a metal, una cantidad considerable de aire que formaba un volumen mil veces mayor que el de la cantidad de litargirio empleada. Este descubrimiento me ha parecido uno de los más importantes de los que se han hecho desde Stahl, [por lo que] he creído que debía asegurarme su propiedad, haciendo el presente depósito en la Academia, para que permanezca secreto hasta el momento en que publique mis experimentos.

En París, el 1^o de noviembre [de] 1772.

[Firmado:] Lavoisier

Lavoisier no fue quien descubrió que se producía un aumento de peso al calcinar un metal, porque este hecho se conocía desde el siglo XVII; su genialidad consistió en transformar un aspecto del fenómeno al que no se le había dado la menor importancia hasta entonces, en el centro del problema. Lavoisier supo ver que dicho aumento de peso no era una pérdida de flogisto, sino la ganancia de algo, que todavía se tenía que descubrir en qué consistía, pero que estaba relacionado de alguna manera con el aire atmosférico. En un principio, Lavoisier no pretendía desbancar la teoría del flogisto, sino completarla, y en la memoria depositada en la Academia el 20 de octubre de 1772, se puede apreciar que no estaba en realidad preocupado por la combustión en sí, sino por la formación del producto de la reacción. Pero a partir del 1 de noviembre cambió su perspectiva, y por eso quiso mantener en secreto sus investigaciones, porque se daba cuenta de la trascendencia de sus resultados.

En abril de 1773, Lavoisier propuso una nueva teoría de la calcinación, y su cambio de mentalidad puede apreciarse en el nuevo cuaderno de laboratorio que inició en febrero de dicho año (1773), donde expuso la serie de experimentos que se proponía realizar, y

afirmaba que éstos provocarían «una revolución en física y en química» (Bensaude-Vincent, 1993). A partir de este momento, el aumento de peso dejó de ser «un hecho maravilloso de la química», para convertirse en «un efecto singular que los físicos no han explicado todavía». Según el propio Lavoisier, «es probable que el estudio más profundo de los fenómenos del aire fijo [CO₂] conducirán a esta ciencia [la química] a la época de una revolución casi completa.» (Bensaude-Vincent, 1993: 136).

En febrero de 1773, Lavoisier diseñó un plan de trabajo para investigar la actuación de los gases en las reacciones químicas, y el fruto de su labor cristalizó en el libro *Opúsculos físicos y químicos* (Lavoisier, 1774). Su organización es muy parecida a la que presentan las publicaciones científicas actuales. En su introducción revisa el tema a tratar, planteando el estado de la cuestión y los objetivos que desea conseguir; continúa con la descripción de la metodología empleada y el material utilizado, y finaliza con la exposición de los resultados y su posterior discusión. También incluye una serie de láminas que reflejan los aparatos de laboratorio que había utilizado para realizar sus investigaciones, en las que se pueden apreciar las novedades que él mismo había ideado, para trabajar con un material tan escurridizo como los gases. La reseña de esta obra fue encargada por orden de la Academia a Trudaine, Macquer, Le Roy y Cadet, y en ella indicaban que «él ha sometido todos sus resultados a la medición, al cálculo y a la balanza: método riguroso que, felizmente para la química, comienza a ser indispensable en la práctica de esta ciencia.» (Gago, 1982).

A lo largo de 1774, la mayor parte de sus trabajos se enfocaron hacia el estudio de la calcinación de los metales, y a la reducción de sus óxidos con carbón. Repitió los experimentos que habían realizado Boyle y Priestley, quienes habían calcinado estaño en un recipiente hermético, y al abrirlo pesaba más que al inicio. Hasta entonces se suponía que el aumento de peso detectado se debía a las «partículas de fuego» que atravesaban la retorta y llegaban hasta el metal, pero Lavoisier, desechando esta hipótesis, pesó el conjunto antes y después de abrir la vasija, y descubrió que el aumento de peso era proporcional al volumen del recipiente. Estaba claro que la cal metálica formada dependía de algo que contenía el aire atmosférico, pero, ¿qué era esa sustancia? En octubre de 1774, Priestley viajó a París, y le comunicó que había realizado varios trabajos con óxido de mercurio, y había obtenido una «nueva clase de aire», que tenía la propiedad de facilitar la combustión mucho más que el aire atmosférico, y al que denominó «aire desflogisticado». Priestley no publicó sus resultados hasta 1777, y Scheele, quien también lo había descubierto, hasta 1778. Lavoisier inició sus experimentos con el óxido de mercurio en noviembre de 1774, y los expuso el 2 de abril de 1775 en el trabajo titulado «Memoria sobre la naturaleza del principio que se combina con los metales durante la calcinación y los aumenta de peso». En ella denominó al gas que favorecía tanto la combustión «aire atmosférico muy puro», y más adelante, «la parte más salubre y más pura del aire», y «aire eminentemente respirable», y que era lo que más tarde llamaría oxígeno. Estas nuevas denominaciones estaban basadas en los descubrimientos que había realizado Priestley sobre dicho gas, pero fue Lavoisier quien supo interpretar correctamente su papel en la combustión y en la calcinación. Por ello se suele decir que Lavoisier lo «redescubrió», y que fue él quien se dio cuenta de que el aire no era una materia simple, sino que estaba formada de, al menos, dos partes, una respirable (el oxígeno), y otra que no lo era, a la que denominó «mofeta» (el nitrógeno), de la que dijo que, probablemente, tampoco era una sustancia simple, sino compuesta (Gago, 1982).

En esta época, y encargado por la *Ferme*, Lavoisier elaboró un informe sobre la situación de las salitrerías y de las fábricas de pólvora del país. En él mostraba las numerosas deficiencias

técnicas y la mala gestión que éstas presentaban, por lo que, en marzo de 1775, Lavoisier y otros tres directores fueron encargados de dirigir la *Régie des Poudres et Salpêtres* (*Compañía estatal de pólvoras y salitres*). Lavoisier ejerció una doble función administrativa a partir de este momento, y se trasladó a vivir al arsenal parisino, donde instaló un espléndido laboratorio. En su hogar se mezclaron vida privada, vida social y actividad científica, y con él trabajaron como auxiliares jóvenes promesas como Fourcroy y Hassenfratz, a los que ayudó en el desarrollo de sus carreras, que llegaron a ser muy brillantes (Bensaude-Vincent, 1993).

En el arsenal investigó sobre el salitre (nitrato de potasio) y la nitrificación artificial, sin olvidar su reciente descubrimiento del «aire atmosférico muy puro», que le llevaron a leer, el 20 de abril de 1776 en la Academia, la memoria titulada «Sobre la existencia del aire en el ácido nitroso [ácido nítrico] y sobre los medios de componer y recomponer este ácido». En los experimentos que realizó para elaborarla, pudo observar cómo el oxígeno formaba parte del ácido nítrico, y encadenó este hecho con las experiencias que había realizado con el fósforo y con el azufre, que le habían mostrado que el aire atmosférico era absorbido en la combustión de ambos elementos para formar sus respectivos ácidos. Con ellas pudo deducir que del aire era, sobre todo, «la parte más pura, [la que] entra en la composición de todos los ácidos sin excepción» (Lavoisier, 1774: 129-130). Lavoisier ya había hecho pública su teoría de la acidez a lo largo de los años 1776-1777, y su versión definitiva fue presentada el 23 de noviembre de 1779, en su memoria «Consideraciones generales sobre los ácidos y sobre los principios de que están compuestos», publicada en 1781. En ella demostraba cómo el oxígeno formaba parte de todos los ácidos conocidos hasta entonces, e incluso que podía crear ácidos por sí mismo. Debido a este carácter generador de ácidos, Lavoisier denominó a este gas «aire atmosférico muy puro» combinado, «principio acidificante», o «principio oxígeno» (engendrador de ácido) (Gago, 1982). Pero su teoría también tenía fallos, siendo el principal de ellos el que no se conocían ácidos de los metales, excepción hecha del arsénico. El mismo Lavoisier se dio cuenta de ello, pero confiaba que en algún momento se podría conseguir la generalización de su teoría a los metales, cuando se encontrara el mecanismo de reacción adecuado. Además, todavía no se había evidenciado la existencia de ningún ácido que no contuviera oxígeno, hecho que logró Davy en 1810, cuando descubrió que el ácido clorhídrico sólo se componía de cloro e hidrógeno. A pesar de ello, esta terminología equivocada no impidió que el término oxígeno (generador de ácidos), se extendiera entre toda la comunidad y la literatura científica, y que incluso haya perdurado hasta nuestros días.

Para terminar de ajustar todos los flecos de su teoría, Lavoisier también tenía que explicar qué papel jugaban en las reacciones químicas el calor y la luz desprendidos en ellas. Además de la memoria leída ante la Academia en 1777 titulada «De la combinación de la materia de fuego con los fluidos evaporables, y de la formación de los fluidos elásticos aeriformes», realizó varios experimentos con el matemático Laplace, en los que midieron la volatilidad del etanol y del éter. Para cuantificar el calor producido en las reacciones, Laplace ideó el calorímetro de hielo, con el que efectuaron varios experimentos durante los años 1781-1783. Plasmaron sus ideas y sus experiencias en la publicación *Memoria sobre el calor* (Lavoisier; Laplace, 1780), en la que mostraron que, al revés que el flogisto, que no era cuantificable, la intensidad del calor intercambiado se podía medir fácilmente con un simple termómetro. En la última parte de la *Memoria sobre el calor* había dedicado un capítulo a la respiración, fenómeno que ya había comenzado a estudiar en 1777. En 1783, Lavoisier y Laplace realizaron medidas cuantitativas sobre este proceso con un animalito llamado conejillo de Indias, experimento del que surgió la frase «hacer de conejillo de Indias». Con

sus ideas sobre el calor, Lavoisier presentó una explicación más clara de los fenómenos de la combustión que la que proporcionaba la teoría de Stahl, y comenzó a atacar a la teoría del flogisto, aunque de forma prudente, para no herir a sus respetados colegas académicos. Aún así, la mitad de la revolución de Lavoisier ya se había realizado en 1779 (Brock, 1998).

En septiembre de 1777, Lavoisier y Bucquet habían iniciado una serie de experimentos con un curioso gas al que no encontraba lugar en su estructura teórica. Era el denominado «gas inflamable» (gas hidrógeno), que se obtenía al hacer reaccionar un ácido diluido con algunos metales. Al quemar dicho gas en el interior de una botella con agua líquida, habían observado que el agua no había sufrido cambio alguno, cosa que le sorprendió, porque él esperaba obtener un ácido. En 1781, el científico inglés Blagden, ayudante de Henry Cavendish (1731-1810), le había comentado a Lavoisier los experimentos que éste había realizado sobre la síntesis del agua a partir de la combustión del «gas inflamable» en el aire. El 24 de junio de 1782 realizó, junto con Laplace y el propio Blagden, el primer experimento con un nuevo aparato, y obtuvo un agua tan pura como la destilada, a la vez que lo conseguía el científico Monge, quien además comprobó que el peso del agua obtenida era prácticamente el mismo que el de la suma de los dos gases reactivos (Gago, 1982).

Pero Lavoisier ya se había interesado por el agua anteriormente. En 1768 había demostrado que el agua no se podía transformar en tierra, al introducir una cierta cantidad de ésta en el interior de un recipiente herméticamente cerrado, y calentarlo hasta ebullición durante ciento un días sin interrupción. Poco a poco se iba formando un residuo sólido, y al finalizar los tres meses volvió a pesar el conjunto, observando que la masa no había variado prácticamente nada respecto de la cantidad inicial, por lo que estaba claro que el fuego no había originado ningún incremento de peso. A continuación pesó el residuo sólido y el recipiente por separado, y observó que la cantidad de materia sólida formada en el proceso coincidía casi exactamente con la disminución de masa que había sufrido el receptáculo, por lo que dedujo que el origen de dicho residuo era el propio recipiente de vidrio, que había sufrido un proceso de lixiviación, al disolverse en el agua los constituyentes solubles del sólido. Para Lavoisier estaba claro que no se había producido la transmutación del agua en tierra, y comunicó los resultados de su trabajo a la Academia en 1770. En su procedimiento se observa la utilización de la ley de conservación de la masa desde un punto de vista metodológico, aunque no llegó a formularla de forma explícita hasta 1789 en su *Traité* (Lavoisier, 1774: 129-130).

A partir de 1781, y ya convencido de la corrección de sus ideas, Lavoisier movilizó a sus aliados para crear las condiciones de una controversia, y convencer así al resto de la comunidad científica. Para ello utilizó la síntesis del agua, en un experimento realizado ante un público selecto (Cartwright, 2000). El 24 de junio de 1783, el rey Luis XVI, uno de sus ministros, Blagden, y algunos miembros de la Academia, se situaron delante de un aparato de combustión, para observar cómo Lavoisier y Laplace giraban los grifos de dos reservorios de gas que contenían hidrógeno y oxígeno. Después de aplicarle una descarga eléctrica, la mezcla generó varias gotas de agua líquida. El fruto de ese experimento fue una primera memoria leída ante la Academia el 21 de abril de 1784, que tuvo continuación en otro trabajo titulado «Memoria donde se prueba, por la descomposición del agua, que este fluido no es en absoluto una sustancia simple, y que existen numerosos medios de obtener en grande el aire inflamable que forma parte de ella como principio constituyente». Es decir, que una vez sintetizada el agua, ahora se trataba de descomponerla. Para ello utilizó hierro, obteniendo hidrógeno y óxido de hierro, y carbón, con el que recogió hidrógeno y dióxido de carbono.

Estos resultados incluso le permitieron rebatir la teoría de Kirwan de que el «gas inflamable» (hidrógeno) era el flogisto puro (Gago, 1982).

Lavoisier deseaba que la demostración de la composición del agua fuera un acontecimiento histórico, y preparó una experiencia espectacular durante todo un año. En febrero de 1785, todo estaba listo para mostrar al mundo que el agua era un cuerpo compuesto. De nuevo se formó un auditorio escogido, constituido por varios miembros de la Academia, el duque de Chaulnes, el Ministro Malesherbes y el intendente Villedeuil. La demostración duró dos días, y consistió en un doble experimento: la síntesis y la descomposición del agua. Históricamente, esta experiencia jugó un papel decisivo, porque el 6 de abril de 1785, Berthollet anunció públicamente que admitía la existencia de un «principio ácido» u «oxygène», de acuerdo con la teoría de Lavoisier. Su postura abrió una importante brecha en el seno de la Academia, entre un pequeño grupo formado por Lavoisier, Laplace, Monge y Berthollet, que se enfrentaron a los demás académicos (Bensaude-Vincent, 1993). La controversia se había iniciado, y a partir de 1785, se libró la batalla decisiva contra el flogisto en el seno de la Academia. El 22 de enero de ese año, Lavoisier leyó una memoria titulada «Sobre la disolución de los metales en los ácidos», en la que advirtió que, a partir de ella, presentaría en todos sus trabajos las pruebas necesarias para demostrar la inexistencia de esta sustancia. En el volumen de 1783 de las Memorias de la Academia, que fue publicado en 1786, Lavoisier incluyó su trabajo titulado «Reflexiones sobre el flogisto» (Gago, 1986: 34). En esta memoria, cuidadosamente elaborada y argumentada, hacía trizas aquella idea, a la que conceptuaba de «opinión», «error funesto», «ser imaginario», y «suposición gratuita». En ella, Lavoisier convenció a sus colegas más reaccionarios con una brillante argumentación, en la que demostró que el flogisto era simplemente un término atribuido a múltiples cosas diversas y contrapuestas, como entidades que se podían pesar e imponderables, sustancias capaces e incapaces de atravesar los recipientes, coloreadas o transparentes, cáusticas e inertes. El flogisto explicaba demasiado, se había convertido en «un verdadero Proteo que cambia de forma a cada instante» (Gago, 1986: 35). Haciendo gala de un cuidado exquisito, Lavoisier otorgaba a cada científico su parte de razón, y sólo criticó la coexistencia de sus razonamientos. Para fundamentar su argumentación utilizó su propia teoría del calor, así como sus experimentos sobre la combustión y la calcinación, retomando las líneas generales de la memoria que había publicado en 1777. Distinguió entre varios tipos de combustión (ignición, inflamación, detonación), y los explicó de forma coherente según su teoría. La batalla estaba ganada; sólo faltaba ganar la guerra, y para ello resultaba imprescindible construir un nuevo lenguaje acorde con la nueva teoría.

III. Una doble reforma: la nomenclatura y la enseñanza de la química

A lo largo de la historia, las diferentes civilizaciones empleaban diferentes métodos para nombrar a las sustancias, por ejemplo, utilizando sus propiedades físicas, como el color (por ejemplo, magnesia alba [carbonato de manganeso]), la consistencia (mantequilla de estaño [cloruro de estaño]), o la forma cristalina (nitro cúbico [nitrato potásico]). También había nombres que hacían referencia a los sentidos del gusto (azúcar de plomo [acetato de plomo]) y del olfato (aire azufroso apestoso [sulfuro de hidrógeno]), los que estaban relacionados con los astros celestes (saturno [plomo]), o los que se basaban en nombres de personas, generalmente sus descubridores (polvo de Algaroth [oxiclورو de antimonio]), en nombres de lugares (vitriolo de Chipre [sulfato de cobre]), en sus propiedades medicinales (sal diurética [acetato de potasio]),

o en sus métodos de preparación (mercurio dulce sublimado [cloruro de mercurio]). Estas denominaciones eran poco exactas por su ambigüedad, y poco a poco se fue produciendo una enorme confusión a medida que, a lo largo del siglo XVIII, se avanzó en el descubrimiento de nuevos minerales, y en el estudio en profundidad de los minerales ya conocidos. Además, junto a estas denominaciones que tenían un origen racional, existía un grupo de nombres exóticos que estaban rodeados de misterio (flores filosóficas de vitriolo [ácido bórico]), y, con el transcurrir del tiempo, se llegó a utilizar un mismo nombre para definir a distintas sustancias, e incluso varias sustancias se denominaban bajo el mismo sustantivo (Crosland, 1988).

Si se analizan las publicaciones químicas de finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII, se puede observar que varios científicos, como Boyle o Stahl, criticaron el empleo abusivo de ciertos términos como «azufre» y «espíritu» para referirse a distintas sustancias. El Real Colegio de Médicos de Londres nombró un comité que reformara la nomenclatura química, el cual elaboró un informe que se publicó en 1742, aunque las modificaciones que proponía no solucionaron el conflicto. A partir de él, numerosos científicos criticaron o incluso intentaron modificar los nombres que consideraban obsoletos, como Caspar Neumann, William Cullen o Pierre Joseph Macquer. Estaba claro que la nomenclatura necesitaba una reforma, y que era necesario buscar nombres sistemáticos para los nuevos elementos y compuestos. A lo largo del siglo XVIII se produjeron varios intentos establecer un método completo de una nomenclatura sistemática, entre los que destacaron las propuestas de Macquer en su *Diccionario de Química* (Macquer, 1766) Jean-Baptiste Bucquet en la *Introducción al estudio de los cuerpos naturales*, (Bucquet, 1771), o Antoine Brongniart en la *Tabla Analítica de las combinaciones y las descomposiciones de diferentes sustancias* (Brongniart, 1778; Crosland, 1988).

Influenciado por la reforma de Linneo en botánica, la actitud de Torbern Olof Bergman (1735-1784), profesor de química en la Universidad de Uppsala desde 1767, se encaminó hacia una reforma de la nomenclatura química. En 1779 indicaba que «la química, como las demás ciencias, ha estado plagada de nombres improprios» (Gago, 1986: 65), e intentó modificarlos en varios textos de mineralogía que publicó en 1782 y 1784. Trabajó junto con Guyton para introducir alguna modificación, pero su fallecimiento en julio de 1784 se lo impidió, dejando el testigo de su trabajo a Guyton. El descontento de éste con los nombres químicos le llevó a afirmar en 1780 que la química «se encuentra bajo el peso de palabras inútiles», opinando que «el estado de perfección del lenguaje de una ciencia refleja el estado de perfección de la ciencia misma», y que esta dificultad era la que no permitía comunicarse a los químicos con facilidad (Crosland, 1988: 207 y ss.).

Guyton propuso varios intentos de reforma cuando todavía era partidario de la teoría del flogisto, y su proyecto no prosperó. En un principio, se reunieron Guyton y Lavoisier para analizar las experiencias de Lavoisier que sustentarían su nueva teoría del oxígeno y desbancarían la del flogisto. Durante los años 1785-1787, Berthollet, Guyton y Fourcroy se convencieron de la inexistencia de dicho principio, y se plantearon la necesidad urgente de confeccionar un nuevo lenguaje que se acoplase a la nueva teoría. Reunidos junto con Lavoisier para realizar dicha tarea en París durante ocho meses de trabajo intensivo, el esfuerzo de los cuatro químicos cristalizó en el libro *Méthode de nomenclature chimique* (Morveau; Lavoisier; Berthollet; Fourcroy, 1787), que se publicó en el verano de 1787. En esta fecha, el cuarteto se encontraba en pleno esplendor: Guyton tenía cincuenta años, Lavoisier cuarenta y cuatro, Berthollet treinta y nueve, y Fourcroy, treinta y dos.

Lavoisier estuvo interesado desde su más temprana juventud en la claridad del razonamiento y en la correcta exposición de las ideas científicas, si bien en las primeras publicaciones que hizo sobre el estado gaseoso, como en el libro *Opúsculos Físicos y Químicos*, confundía el oxígeno con el dióxido de carbono (Lavoisier, 1774: 449). Cuando más tarde se dio cuenta de las distintas características de ambos gases, y de las diferentes propiedades de otros como los que hoy denominamos dióxido de azufre, cloruro de amonio e hidrógeno, la reforma se convirtió en urgente, para impedir cualquier posibilidad de tergiversaciones (Crosland, 1988).

Sobre Lavoisier tuvieron una enorme influencia las ideas del filósofo Étienne Bonnot de Condillac (1715-1780), para quien el lenguaje bien hecho tenía una importancia fundamental en el progreso de la ciencia. De acuerdo con esta concepción, las sustancias más sencillas eran las que deberían nombrarse en primer lugar, pero con nombres que recordaran las sensaciones que proporcionaban los objetos, según el esquema (Gago, 1994):

Objeto Real → Sensación → Idea → Palabra → Conocimiento

El *Méthode* es un libro en octavo, de trescientas catorce páginas, que comienza con una memoria que leyó Lavoisier en la Academia el 18 de abril de 1787, sobre la necesidad que existía en ese momento de reformar y perfeccionar la nomenclatura química, en la que reconocía la importante tarea que habían realizado en este sentido Macquer, Baumé, y sobre todo, Guyton (pp. 1-25). Continúa con otra memoria, que fue leída por Guyton en la Academia el 2 de mayo de 1787, en la que desarrollaba los principios de la nueva nomenclatura propuesta (pp. 26-74). A continuación, Fourcroy firmaba otra memoria que servía de explicación a la tabla de la nomenclatura que se incluía en un cuadro desplegable (pp. 74-100), en la que aparecían varios ejemplos de su propuesta, y que continuaba con dos diccionarios de sinónimos, en los que se detallaba la relación entre los nombres antiguos y los nuevos que ellos proponían, y viceversa (pp. 101-143, y 144-237). Estos diccionarios eran de gran utilidad, y en ellos puede apreciarse cómo los cuatro químicos sistematizaron las denominaciones de las sustancias. Ordenadas alfabéticamente se encontraban tanto las sustancias simples o elementos como el cobre, el estaño o el oxígeno, como los compuestos, en los que se podía apreciar claramente las enormes ventajas de la nueva nomenclatura binomial. Entre ellos, los compuestos de dos elementos se nombrarían citando en primer lugar el término que hacía referencia a su clase o género (por ejemplo, «óxido»), y en segundo lugar, la denominación del elemento específico («de cobre»). Para los compuestos de tres elementos, como los ácidos, se idearon las terminaciones «ico» y «oso», que se referían a los que contenían más proporción o menos del no metal que los originaba (por ejemplo, ácidos sulfúrico y sulfuroso). Las sales sustituirían las terminaciones «ico» y «oso» del ácido que las originaba, por «ato» e «ito». Por ejemplo, el «azúcar de saturno» pasaría a denominarse «acetato de plomo», quedando clara su procedencia, a partir del ácido acético y del metal plomo. Podemos observar que, con ligeras modificaciones, esta nomenclatura es la que ha perdurado hasta el siglo XXI, porque gracias al magnífico trabajo de estos cuatro científicos, la química pudo disponer de un lenguaje sistemático, concreto y universal, que además facilitaba la denominación de cualquier sustancia simple o compuesta, que se pudiera descubrir en un futuro. El libro continúa con un informe que sobre la nueva nomenclatura habían realizado cuatro miembros de la Academia de Ciencias, que tenían la misión de revisar y aprobar el libro, y que está firmado el del 13 de junio de 1787 por Baumé, Cadet de Vaux, Darcet y Sage, y ratificado por el marqués de Condorcet el 23 de junio del mismo año (pp. 238-252). Esta comisión se declaró neutral, porque Baumé y Sage se oponían a la reforma, y sólo Cadet de Vaux, el más joven, era un entusiasta defensor de ella. Para

finalizar, el libro incluía dos informes firmados por Hassenfratz y Adet (pp. 253-287), en el que proponían un sistema de símbolos que representaran a los elementos y a los compuestos, y que estaban basados en unos símbolos geométricos sencillos (cuadrados, círculos, triángulos, etcétera), compilados en seis láminas plegables al final del libro, que termina con el índice de las materias (pp. 313-315). Las páginas 288-312 incluyen el informe de Lavoisier, Berthollet y Fourcroy sobre estos caracteres.

La aceptación de la nueva nomenclatura no fue sencilla en Francia, porque hubo varias voces críticas que se alzaron en su contra. Una de las más representativas fue la de Jean Claude de la Métherie (1743-1817), editor de la revista *Observations sur la Physique* desde 1785 hasta su fallecimiento, y que no cesó de realizar las críticas más duras al nuevo sistema. Por ello, para poder publicar sus trabajos sin censura, Lavoisier y sus compañeros decidieron fundar otra revista, con la aprobación de la Academia. Se tituló *Annales de Chimie*, el primer número salió en 1789, y ha perdurado hasta hoy en día con el título de *Annales de Chimie-Science des Matériaux*. Actualmente cubren un campo científico muy amplio, que va desde la metalurgia y los semiconductores, a los compuestos macromoleculares orgánicos.

A pesar de las posturas reaccionarias, hubo varios químicos que se asociaron con Lavoisier y sus colegas por todo el territorio francés, y a partir de este momento, esta doctrina se denominó «teoría de los químicos franceses», «química nueva», «moderna», o simplemente, «antiflogista», quedando así definida a partir de 1788 por la nacionalidad de sus partidarios, además de por su carácter polémico e innovador. De todos modos, Lavoisier reclamaba su paternidad, indicando que esta teoría era «la suya», y que había sido adoptada por el resto de sus colegas, para formar la «escuela» de los químicos franceses. Pero el objetivo de Lavoisier era acometer una revolución pedagógica, además de la «revolución en química y física». La elaboración del *Método de nomenclatura* fue un primer paso, que se vio coronado por la publicación de su libro *Tratado elemental de química* (Lavoisier, 1789), que estaba *presentado de acuerdo a un orden nuevo, y según los descubrimientos modernos*. De acuerdo con su título, esta obra mostraba de forma íntegra y sencilla las bases de su nueva química, y contrariamente a lo que solía ser habitual en sus trabajos, estaba dirigida a «los principiantes», y no a los eruditos. Según Gago (1982), durante los años 1780-81 Lavoisier redactó un primer borrador de esta obra, si bien la edición final no se completó hasta 1789. Era, por lo tanto, un proyecto antiguo, del que su autor afirmaba que «será la obra de mi vida».

El *Tratado* está formado por un «Discurso preliminar» y por tres grandes bloques. En el primero, titulado «De la formación de los fluidos aeriformes y de su descomposición; de la combustión de los cuerpos simples y de la formación de los ácidos», se detallan las bases teóricas de la nueva química, fundamentada en el calórico o principio asociado a la elasticidad, y en el oxígeno, principio portador de la acidez. También se encuentra en este capítulo la descripción de sustancias como ácidos y sales, tanto orgánicas como inorgánicas. En la segunda parte, «De la combinación de los ácidos con las bases salificables y de la formación de las bases neutras» se muestran, en cuarenta y cuatro tablas sinópticas, las combinaciones de los ácidos con las bases, y las sales neutras que se derivan de ellos. Están ordenadas de lo más simple a lo más complejo, y en la primera se presenta la relación de treinta y tres sustancias simples (elementos), y más de mil compuestos. También incluye otra tabla con los radicales que se combinan con el oxígeno, y puede afirmarse que la novedad introducida por Lavoisier en esta parte no es ni por su forma ni por el contenido, porque colocar los ácidos, las bases y las sales en forma de tablas era el corolario habitual en los tratados de química del siglo XVIII. Su mejora consistió en sustituir las tablas-catálogo que contenían miles de

experiencias, por otras que estaban fundadas en una teoría y en unas prácticas de laboratorio representativas. Con las tablas de Lavoiser, se podría prever cuáles serían los productos de nuevas experiencias, gracias a la sistemática de su método.

En la tercera y última parte, titulada «Descripción de los aparatos y de las operaciones manuales de la química», quedaban reflejados los diferentes instrumentos y procedimientos de laboratorio. Era el complemento de la parte teórica, la conclusión lógica del libro, aunque su forma de presentarlo fue totalmente innovadora. Hasta este momento, la descripción de los aparatos y los montajes de laboratorio era un hecho habitual en los tratados de química, pero siempre aparecían inmersos en la mitad del texto. En el tratado de Lavoisier se encuentran todos los grabados agrupados al final, y son dibujos realizados con un cuidado exquisito por Mme. Lavoisier, en los que se encuentra, además de un gran número de detalles, todos los instrumentos necesarios para describir un tratado completo de práctica química. Junto con los elementos necesarios para realizar medidas gravimétricas y volumétricas, están reflejados los de todas las operaciones fundamentales de la química: destilación, licuefacción, evaporación, etcétera, más los últimos aparatos utilizados para recuperar y medir los gases, y otros diseñados o perfeccionados por él mismo, como el areómetro o el calorímetro, e incluso los utensilios más tradicionales, como alambiques o retortas. En este último bloque, en el capítulo XIII, Lavoisier enunció explícitamente la ley de la conservación de la masa, que si bien ya era conocida por todos los científicos desde hacía bastante tiempo, fue él quien la generalizó en la química, determinando cuál era la característica física de la materia que se mantenía constante durante las reacciones. Además, y tomando como punto de referencia esta ley, Lavoisier ideó por primera vez una ecuación química como si fuera una igualdad matemática: «estamos obligados a suponer en todas [las experiencias en química] una verdadera igualdad o ecuación entre los principios de los cuerpos que se examinan [reaccionan] y los que se retiran por el análisis [los productos]. Así, puesto que el mosto de uvas produce gas ácido carbónico [CO₂] y alcohol, puedo decir que mosto de uvas = ácido carbónico + alcohol» (Lavoisier, 1789: 141; Gago, 1982).

El programa didáctico de esta obra quedaba perfectamente definido en el «Discurso preliminar», donde Lavoisier citaba las ideas de Condillac, indicando que «el arte de razonar se reduce a una lengua bien hecha». También denuncia en él un defecto que era muy común en los tratados de química de su época: comenzaban exponiendo unas nociones generales de la química, como los principios de los cuerpos o las afinidades, dando por supuesto que los alumnos ya tenían adquiridos los conocimientos que, en realidad, debían aprender con dicha ciencia. Para escapar de este círculo vicioso, Lavoisier proponía avanzar de lo conocido hacia lo desconocido, es decir, de acuerdo con Condillac, «seguir la marcha natural de las ideas» (Lavoisier, 1789: v-xxxii).

En el estudio de la expansión de la nueva nomenclatura y de la teoría del oxígeno asociada con ella, es fundamental analizar la divulgación de las dos obras que las contenían, que eran el *Méthode* de 1787 y el *Traité* de 1789. Ambas se difundieron como un reguero de pólvora a finales del siglo XVIII y principios del XIX, porque hubo al menos siete ediciones francesas del *Méthode*, y traducciones al inglés, alemán, español e italiano. El *Traité* fue todavía más conocido, porque tuvo al menos nueve ediciones en francés, cinco en inglés, tres alemanas, dos holandesas, tres italianas, una española, tres norteamericanas y una mexicana, todas publicadas antes de 1805. Además, diferentes secciones del *Méthode*, sobre todo la tabla y el diccionario, fueron reproducidas en numerosas publicaciones científicas, diccionarios y enciclopedias, así como en otros libros de texto (Crosland, 1988). Es decir, que la

revolución química de Lavoisier se produjo rápidamente, a pesar de que no llevó asociada en el tiempo el giro pedagógico que él esperaba, porque incluso sus colaboradores más estrechos tardaron un poco más en aplicarlo.

A partir de este momento, Lavoisier se dedicó a investigar los fenómenos de la respiración, la transpiración y el metabolismo, a realizar estudios económicos, y a estudiar las mejoras que se podían aplicar en las explotaciones agrícolas. Pero en esta época el país atravesaba momentos difíciles, porque la cosecha de 1788 había sido desastrosa, y la situación se volvió insostenible. Entonces la burguesía, el bajo clero y una fracción liberal de la nobleza se opusieron al rey y al grupo de privilegiados formado por nobles, parlamentarios, obispos y superiores de las abadías, y cuando Luis XVI reunió a sus tropas en Versalles, las masas populares parisienses creyeron que lo que se fraguaba era un complot tramado por el rey y los privilegiados para impedir cualquier reforma, por lo que se sublevaron y tomaron La Bastilla, símbolo del absolutismo, el 14 de julio de 1789. Después de muchas vicisitudes, el 10 de agosto de 1792 se preparó la caída de la realeza, y en París se produjeron las matanzas de septiembre. El 21 de ese mismo mes se reunió una asamblea constituyente que gobernaba el país, denominada *Convención*, que proclamó casi inmediatamente la república. La ejecución de Luis XVI el 21 de enero de 1793 provocó que la mayoría de los estados europeos se aliaran contra Francia y entraran en la denominada «guerra contra la Convención». Los últimos vestigios del régimen feudal desaparecieron a lo largo de los años 1792 y 1793, y el 26 de agosto de 1793, la Convención votó una *Constitución de derechos del hombre y del ciudadano*, régimen que proclamaba la libertad, la igualdad, la inviolabilidad de las propiedades y la resistencia a la opresión. La revolución había triunfado. Hubo varios cambios de gobierno, entre los que destacaron los tres mandatos del Terror, desde agosto de 1792 hasta julio de 1794, en los que se detuvieron a 300.000 sospechosos, de los que fueron ejecutados 17.000; entre otros, al propio Danton y a otros líderes revolucionarios (Soboul, 1975).

En un principio, el «ciudadano» Lavoisier participó activamente en el movimiento revolucionario. Era miembro de la guardia nacional, concretamente en la Sección del Arsenal, y se le podría definir como «librepensador». Era miembro de la Comuna de París, y desde su situación en el Arsenal, de considerable importancia estratégica, tuvo que afrontar varias algaradas populares. A pesar de ello, Lavoisier se convirtió en uno de los seis inspectores del nuevo Tesoro Nacional, cargo desde el que elaboró los trabajos titulados «De la riqueza territorial del reino de Francia», y «Del estado de las finanzas de Francia, en el primero de enero de 1792» (Lavoisier, 1791; 1810). También en esta época formó parte del importante proyecto de reforma del sistema de pesas y medidas, que fue encargado a la Academia ante las numerosas reclamaciones que se habían producido por la gran variedad de sistemas métricos que se encontraban en vigor.

Pero muy pronto, todos los pilares que sustentaban la carrera de Lavoisier comenzaron a desmoronarse, y sus ideales revolucionarios fueron puestos en duda numerosas veces. Las sospechas se orientaron contra él a partir del 6 de agosto de 1789, cuando tuvo que rendir cuentas por un barco cargado de pólvora que parecía que iba a ser entregado a los emigrados que conspiraban contra el gobierno revolucionario. Se le pretendió ejecutar de forma sumaria, pero, después de oír sus razones, salvó la vida. A continuación, fue abolido el cargo de *Fermier Général* el 20 de marzo de 1791, por lo que Lavoisier volcó su carrera en la Academia, de la que fue nombrado tesorero en diciembre de 1791. Cuando se congelaron los presupuestos, él adelantó de su bolsillo las sumas necesarias para los sueldos de los académicos, pero la Convención decretó su disolución el 8 de agosto de 1793, y sus esfuerzos

resultaron vanos para salvarla (Bensaude-Vincent, 1991; Poirier, 1996). Para finalizar, la Convención exigió la rendición de las cuentas de la *Ferme Générale*, y el 24 de noviembre de 1793, emitió un decreto de arresto contra los antiguos *Fermiers Généraux*. Cuando fueron a detenerle, Lavoisier no se encontraba en su casa, y se escondió durante varios días en el edificio de la ya disuelta Academia de Ciencias. Sin embargo, el 28 de noviembre, se presentó voluntariamente junto con su suegro, Jacques Paulze, en el antiguo convento de *Port Royal* (Puerto Real), que a partir de la revolución se convirtió en prisión, y tomó el cruel e irónico nombre de *Port Libre* (Puerto Libre).

La instrucción del proceso duró cinco meses, durante los que Lavoisier permaneció encarcelado, y el 8 de mayo de 1794, el Tribunal revolucionario juzgó a 32 *Fermiers Généraux*, a los que acusó de malversación de fondos, beneficios excesivos, gratificaciones abusivas, retrasos injustificados en los pagos al Tesoro público, y además, de haber realizado un importante fraude en el comercio del tabaco, que habían utilizado para realizar «un complot contra el pueblo francés que tendía a favorecer por todos los medios posibles el éxito de los enemigos de Francia» (Poirier, 1996: 379-380). Veintiocho de los *Fermiers* fueron condenados a la guillotina y ejecutados ese mismo día, y se confiscaron todos sus bienes. Lavoisier fue el cuarto en subir al patíbulo, y su brillante carrera de químico, de biólogo, de financiero, de industrial y de economista quedó truncada de forma trágica. Al día siguiente, Joseph Louis Lagrange (1736-1813), célebre matemático francés de origen italiano, autor de su discurso fúnebre, dijo: «Ha bastado un momento para cortar esta cabeza, y tal vez no bastará un siglo para producir otra igual» (Alfonseca, 1998: 332).

Hubo varios científicos, algunos muy próximos a Lavoisier como Carnot, Fourcroy, Monge o Guyton de Morveau, primer presidente del Comité de Salud Pública, que no pudieron hacer nada para ayudarlo después de su arresto, así como otros colaboradores de Lavoisier que incluso osaron protestar por su detención, como sus compañeros de la Oficina de Consulta de Artes y Oficios, los de la Comisión Temporal de Pesos y Medidas, los de la Comisión de Moneda, o sus colegas de la *Régie des poudres et salpêtres*. Paradójicamente, algunos de sus valedores habían sido sus más duros opositores en la polémica contra el flogisto, pero ninguno pudo salvarle la vida. Ni siquiera su mujer, para la que comenzó un terrible calvario al quedarse — literalmente— en la calle, cuando les confiscaron todos sus bienes. Pudo sobrevivir gracias a la ayuda de un antiguo empleado suyo que la acogió en su casa, y ella, una vez ejecutados su marido y su padre, se quedó en la miseria más absoluta, al igual que los familiares del resto de los ejecutados. Después de alzar varios requerimientos a la Convención, en junio de 1795 ésta decidió restituir algunos de los bienes incautados, por lo que Marie-Anne tuvo que peregrinar de oficina en oficina para intentar recuperar algo del importante patrimonio material que compartió con Lavoisier. En 1803, publicó la obra póstuma de Lavoisier, las *Memorias de Química*, que el científico francés tenía casi listas para imprimir (Lavoisier, 1805). Al quedarse viuda tuvo varias propuestas de matrimonio, como las de Charles Blagden y Pierre du Pont, a los que rechazó, hasta que en 1805 se casó con el físico estadounidense Benjamín Thompson, conde de Rumford (1754-1814). Después de dos años de anárquica relación, se divorciaron en 1809 (Brock, 1998).

IV. Epílogo: A modo de conclusión

A partir de su ejecución, la figura y la obra de Lavoisier fueron enaltecidas de tal manera que, sobre todo a lo largo del siglo XIX, se convirtió en un ídolo, que fue empleado para

ensalzar a toda la química en general, y a la química francesa en particular. Se le realizaron numerosos homenajes, y se publicaron trabajos elogiosos sobre su persona y su obra, que llegaron a crear un mito, así como a distorsionar su auténtica imagen (Bensaude-Vincent, 1991). Sus contribuciones al desarrollo de la química son de indiscutible valor, porque además de conseguir desbancar a la teoría del flogisto, normalizó el lenguaje químico, reflexionó sobre el sistema de enseñanza de esta ciencia, utilizó costosos montajes de laboratorio para refutar sus teorías con pruebas experimentales indiscutibles, y abrió numerosas líneas de investigación que pudieron aprovechar otros científicos, como el estudio de las sales realizado en Alemania por Wenzel y Richter, o la química newtoniana de las afinidades que realizó Berthollet. Pero Lavoisier no estuvo solo en esta gesta, porque contaba con el poderoso apoyo de la Academia de Ciencias, de varios de sus colegas científicos, y de su esposa, Marie-Anne. Lavoisier supo utilizar todos estos recursos para desarrollar a lo largo de su vida una amplia gama de actividades, si bien fueron sus contribuciones a la ciencia química las que le han hecho pasar a la historia. Se ha afirmado que el proceso de cambio en esta disciplina se habría iniciado con la famosa experiencia de 1772, y su culminación, con la formación de un nuevo sistema teórico en el *Traité élémentaire de chimie* de 1789, pero alrededor de ellos, Lavoisier realizó muchas más actividades, que muestran cómo la ciencia es una tarea humana, que está unida indisolublemente con numerosos valores culturales, sociales e individuales, y no sólo una fría aglomeración de conocimientos que sirven para intervenir técnicamente en el universo. Lavoisier nació y murió en un momento y en un lugar determinados, y tuvo a su disposición unos recursos personales e institucionales concretos, que fueron los que le permitieron conseguir los resultados que buscaba —y a veces, otros que no buscaba—, en el momento en el que los obtuvo. Si se hubiera cambiado este marco de referencia, los logros que consiguió Lavoisier no se hubieran producido, por lo que hay que valorar, además de su indiscutible esfuerzo e inteligencia, el grupo social y los apoyos de todo tipo con los que contaba.

V. Fuentes y Bibliografía

Fuentes: Las obras de Lavoisier

Las obras originales de Lavoisier han sido estudiadas y reproducidas un gran número de veces, a partir de la reproducción completa de sus publicaciones (Lavoisier, 1862-1893) y de su correspondencia (Lavoisier, 1955-1964). Además, en Internet pueden encontrarse con facilidad copias digitales de la edición original de ellas, que nos acercarán de primera mano a los textos completos, o a parte de ellos. Se encuentran por ejemplo, en las páginas de Internet dedicadas a recopilar textos químicos clásicos, entre las que destacan, entre otras, las páginas de Carmen Giunta (<http://web.lemoyne.edu/~giunta/index.html>), la de José Ramón Bertomeu (<http://www.uv.es/~bertomeu/>), y *Gallica*, Colección de impresos digitalizados por la Biblioteca Nacional de Francia (<http://gallica.bnf.fr/>) (Consultadas el 10.III.2010).

Las obras de Lavoisier que se citan en este capítulo son:

- Lavoisier, A. L. (1768), «Analyse du gypse», en *Journal des Savants*, N^o 5, pp. 341-357.
- _____ (1774), *Opuscules physiques et chimiques*, Paris, Durand.
- Lavoisier, A. L. y Laplace, P. S. marquis de (1780), *Mémoire sur la chaleur*. París, [s.e.]. Traducción al castellano de M. González Redondo, Madrid, Grupo de Trabajo de Análisis Dimensional, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 1992.
- _____ (1789), *Traité élémentaire de Chimie, présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes*, Paris, Chez Cuchet. Existe edición facsímil: Bruselas, 1965; traducción castellana de R. Gago, Madrid, Alfaguara, 1982; traducción catalana de A. Nieto, Barcelona, Institut d'Estudis Catalans, 2003; traducción gallega de M. R. Bermejo, Santinago de Compostela, 2009.
- _____ (1791), *De l'état des finances de France, au premier Janvier 1792. Par un député suppléant à l'Assemblée Nationale Constituante*, Paris, DuPont.
- _____ (1792), *Résultats extraits d'un ouvrage intitulé: de la richesse territoriale du royaume de France; ouvrage dont la rédaction n'est point encore achevée; Remis au Comité de l'Imposition, par M. Lavoisier. Imprimé par ordre de l'Assemblée Nationale*, Paris [s.e.].
- _____ (1805), *Mémoires de chimie*, Paris, DuPont.
- _____ *Oeuvres de Lavoisier*, Paris, J. B. Dumas y E. Grimaux, 1862-1893. 6 v. Editados los cuatro primeros por J. B. Dumas, y los dos últimos por E. Grimaux. Incluyen obras impresas y manuscritos. Están digitalizadas en la página web: http://moro.imss.fi.it/lavoisier/Lavoisier_opere.asp. (visitada el 2.VII.07), y en <http://gallica.bnf.fr/>: Gallica, Colección de impresos digitalizados por la Biblioteca Nacional de Francia (consultada por última vez el 9.III.10).
- _____ (1955-1964), *Oeuvres de Lavoisier. Correspondance*, Paris, R. Fric. 3 fascículos con la mayor parte de la correspondencia de Lavoisier hasta 1783.
- Morveau, M. M.; Lavoisier, A. L.; Berthollet, C. L. y Fourcroy, A. F. (1787), *Méthode de Nomenclature Chimique proposée par M.M. de Morveau, Lavoisier, Berthollet[sic], & de Fourcroy. On y a joint Un nouveau Système de Caractères Chimiques, adaptés à cette Nomenclature / par MM. Hassenfrazt & Adet*, Paris, chez Cuchet. Existe una reimpresión del original francés en Bensaude-Vicent, B., *A propos de Méthode de nomenclature chimique. Esquisse historique suivie du texte de 1787*, Paris, CNRS, 1983.
- Morveau, M. M.; Lavoisier, A. L.; Berthollet, C. L. y Fourcroy, A. F. (1788), *Método de la nueva nomenclatura química de M.M. de Morveau, Lavoisier, Berthollet y de Fourcroy*, Madrid, Antonio de Sancha. Traducido al castellano por P. Gutiérrez Bueno. Existe una obra facsímil de este texto, con un estudio preliminar de Ramón Gago Bohórquez, Madrid, Fundación Ciencias de la Salud, D.L., 1994.

Bibliografía

- Alfonseca, M. (1998), *Grandes científicos de la humanidad*, Madrid, Espasa-Calpe. T. I.
- Bensaude-Vicent, B. (1993), *Lavoisier. Mémoires d'une révolution*, París, Flammarion.
- _____ (1995a), «Lavoisier y la revolución de la química», en *Mundo científico*, 156 (15), pp. 346-352.
- Bensaude-Vicent, B.; García Belmar, A. y Bertomeu Sánchez, J. R. (2003), *L'émergence d'une science des manuels. Les livres de chimie en France (1789-1852)*, París, Éditions des Archives Contemporaines.
- Beretta, M. (2001), *Imaging a Career in Science. The iconography of Antoine Laurent Lavoisier*, Canton, MA. Science History Publications.
- Berthelot, M. (1890), *La Révolution Chimique. Lavoisier*, Paris, Alcan. Traducción al castellano: *Una revolución en la química: Lavoisier*, Buenos Aires, Losada, 1945.
- Bertomeu Sánchez, J. R. y García Belmar, A. (2006), *La revolución química: Entre la historia y la memoria*, Valencia, Universitat de València.

- Branchi, A. (1999), *Historia de la ciencia y de la tecnología. El siglo de las luces*. Madrid, Editex.
- Brock, W. H. (1998), *Historia de la química*, Madrid, Alianza.
- Brongniart, A. (1778), *Tableau Analytique des combinaisons et des décompositions de différentes substances, ou procédés de chymie pour servir à l'intelligence de cette science*, París, P. Fr. Gueffier.
- Bucquett, J. B. (1771), *Introduction à l'étude des corps naturels, tirés du règne minéral*. París, [s.e.].
- Cartwright, J. (2000), *Del flogisto al oxígeno. Estudio de un caso práctico en la revolución química*, Tenerife, Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia.
- Crosland, M. P. (1988), *Estudios históricos en el lenguaje de la química*, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Daumas, M. (1955), *Lavoisier, théoricien et expérimentateur*, París, PUF.
- Diderot, D. y D'Alembert, J. L. R. (1751-1768), *Encyclopédie, ou, Dictionnaire raisonné des sciences des Arts et des Metiers*, París, Briasson.
- Djerassi, C. y Hoffman, R. (2001), *Lavoisier, a play in 2 acts*, Nueva York, Wiley-VCH. Traducción Castellana titulada *Oxígeno, obra en dos actos*, México, FCE, 2003.
- Donovan, A. (1993), *Antoine Lavoisier. Science, Administration and Revolution*. Oxford, Blacwell Publishers.
- Gago, R. y Carrillo, J. L. (1979), *La introducción de la nueva nomenclatura química y el rechazo de la teoría de la acidez de Lavoisier en España. Edición facsímil de las «Reflexiones sobre la nueva nomenclatura química» de Juan Manuel de Aréjula*, Málaga, Universidad de Málaga.
- Gago, R. (1982), *Antoine Laurent de Lavoisier. Tratado elemental de química*, Madrid, Alfaguara. Edición facsímil con introducción, traducción y notas
- _____ (1788), «Estudio preliminar». En Gutiérrez Bueno, P., *Método de la nueva nomenclatura química. Propuesto por M.M. de Morveau, Lavoisier, Berthollet, y de Fourcroy, a la Academia de Ciencias de París, y traducido al castellano por D. Pedro Gutiérrez Bueno, profesor de química en el Real Laboratorio de Madrid, &c. &c.* Madrid, Antonio de Sancha. Madrid, Edición facsímil editada por la Fundación Ciencias de la Salud.
- García Belmar, A. y Bertomeu Sánchez, J. R. (1999), *Nombrar la materia: Una introducción histórica a la terminología química*, Barcelona, El Serbal.
- Guerlac, H. (1961), *Lavoisier. The crucial Year. The Background and Origin of his First Experiments of Combustion, in 1772*, Ithaca, Cornell University Press.
- Hales, S. (1727), *Vegetable staticks: or, an account of some statical experiments on the sap in vegetables: being an essay towards a natural history of vegetation, also a specimen of an attempt to analyse the air*, London, W. and J. Innys, and T. Woodward.
- Holmes, F. (1985), *Lavoisier and the Chemistry of Life. An Exploration of Scientific Creativity*, Wisconsin, University of Wisconsin Press.
- Holmes, F. y Levere, T. H. (eds.) (1998), *Antoine Lavoisier. The next crucial year*, Princeton/ Nueva Jersey, Princeton University Press.
- Ihde, A. J. (1984), *The development of modern chemistry*, Nueva York, Dover.
- Knight, D. M. (1968-1970), *Classical Scientific Papers. Chemistry*, Londres, Mills and Boon.
- Kirwan, R. (1784), *An Essay on phlogiston, and the constitution of acids*, Londres, J. Johnson.
- Macquer, P. J. (1749), *Éléments de chymie-théorique*, París, J.-T. Hérisant.
- _____ (1756 y 1758), *Elements of the theory and practice of chymistry*, Londres, A. Millar, and J. Nourse.
- _____ (1766), *Dictionnaire de Chimie*, París, Chez Lacombe.
- Mielli, A. (1948), *Lavoisier y la formulación de la teoría química moderna*, Buenos Aires-México.
- Partington, J. R. (1961-1970), *A History of Chemistry*, Londres, Macmillan. 4v.
- Pellón, I. (2002a), *Un químico ilustrado. Lavoisier*, Madrid, Nívola.
- _____ (2002b) «Lavoisier y la revolución química». En *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, v. 98, pp. 40-49.

- Perrin, C. (1989), «Document, Text and Mith: Lavoisier's Crucial Year Revisited», en *British Journal of the History of Science*, 22, pp. 3-26.
- Poirier, J. P. (1996), *Lavoisier, chemist, biologist, economist*, Philadelphia, University of Pennsylvania Press.
- Puerto, J. (2001), *El hombre en llamas. Paracelso*, Madrid, Tres Cantos/ Nivela.
- Schwartz, A. (1989), «Instruments of the Revolution: Lavoisier apparatus». En *Bulletin of the History of Chemistry*, 5, pp. 31-34.
- Simon, A. (2005), *Chemistry, Pharmacy and Revolution in France, 1777-1809*. Aldershot-Burlington, Ashgate.
- Soboul, A. (1975), *Compendio de la historia de la revolución francesa*, Madrid, Tecnos.

Otras páginas de Internet sobre Lavoisier

(visitadas el 10.III.2010)

<http://www.liv.ac.uk/Chemistry/Links/links.html>: Virtual Library History of Science, Technology & Medicine. Página general de Historia de la Ciencia, que facilita información sobre biografías y disciplinas.

Lavoisier: <http://www.liv.ac.uk/Chemistry/Links/links.html>

<http://www.woodrow.org/teachers/ci/1992/>: History of Chemistry. Woodrow Wilson Summer Institute in Chemistry. Selección de textos clásicos de historia de la química.

Lavoisier: <http://www.woodrow.org/teachers/ci/1992/Lavoisier.html>

<http://www.ambix.org/>: *AMBIX: The Journal of Society for the History of Alchemy and Chemistry*. Es la principal revista especializada en la historia de la química, publicada por la *Society for the History of Alchemy and Chemistry*.

Lavoisier: Hay varios artículos sobre él y sus contemporáneos, pero no se encuentran en línea, hay que solicitarlos y pagar su importe.

<http://scienceworld.wolfram.com/biography/>: *Eric Weisstein's Treasure Trove of Scientific Biography*. Biografías de químicos: 1,071 entries, 2,144 cross-references, 222 figures.

Lavoisier: <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Lavoisier.html>

http://www.ihaystack.com/authors/y/arthur_young/00015556_voyages_en_france_pendant_les_annees_178717881789/00015556_french_iso88591_p001.htm:

Digitalización del texto Young, A. (1792), *Voyages en France pendant les années 1787-1788-1789*. D'après l'édition de 1882 (Guillaumin et Cie, Librairies). Traduit par M. H. J. LESAGE.

<http://www.ucm.es/BUCM/foa/index.php>: *Proyecto Dioscórides*: Biblioteca Histórica de la Universidad Complutense de Madrid.

Lavoisier: http://cisne.sim.ucm.es/search*spi~S6/X?SEARCH=lavoisier

12. Darwin y el evolucionismo

I. Introducción

Charles Darwin es una de las figuras más interesantes en la historia de la ciencia, tanto por su personalidad y su pasión investigadora como por el extraordinario descubrimiento que revolucionó la forma de pensar en las ciencias de la vida: la evolución por medio de la selección natural.

Una teoría que tiene el enorme mérito de unificar dos mundos que a priori parecerían separados: la vida y el medio físico. Una teoría elegante que arroja luz sobre toda la biología e incluso sobre la estatura del hombre, capaz de unificar en una misma familia histórica al ser humano y al más insignificante de los protozoos, tremendamente bella por su simplicidad y, al mismo tiempo, muy difícil de asumir en el momento en que fue formulada. Una teoría que despertó pasiones encontradas y que aún en nuestros días las sigue despertando.

Darwin comentó en alguna ocasión que: «Cuando se dijo por primera vez que el sol permanecía fijo y que el mundo giraba, el sentido común de la humanidad declaró la doctrina falsa; pero el viejo dicho *Vox populi, vox Dei*, como todo filósofo sabe, no puede ser aplicado a la ciencia.» (Darwin, 1859, VI).

La contribución de Darwin a la ciencia no se limita al campo del Evolucionismo, sino que cultivó muchas otras disciplinas como la geología, la entomología o la botánica, con un enorme legado de publicaciones y cartas, propio de una de las mentes más despiertas de su tiempo.

En este capítulo vamos a hablar del hombre y del científico, y sobre todo de su gran legado evolucionista. Esbozaremos primero una breve historia de la teoría evolutiva, para luego introducir la biografía de Darwin. Después hablaremos de la acogida de su obra maestra, *El Origen de las Especies* para terminar con unas breves notas sobre la teoría en sí.

II. Breve historia de la teoría evolutiva

Para empezar aclaremos que el Evolucionismo precede a la figura de Darwin, pues es un error común confundirlo con el Darwinismo. Darwin fue quien mejor supo defender el Evolucionismo y, además, quien convirtió la evolución en una hipótesis de trabajo para los naturalistas de la época. Propuso (junto con Alfred Russel Wallace) un mecanismo de

acción (la selección natural) que podía ser testado de acuerdo con los cánones científicos de la época, y en ese sentido fue el principal actor en la historia de la teoría evolutiva.

Pero es importante tener en cuenta que darwinismo no es igual a evolución «a secas». Darwinismo es evolución por medio de la selección natural. Nadie duda del proceso evolutivo, pero sí hay controversia y análisis en cuanto a sus causas.

Es importante conocer, aunque sea someramente, la historia de la teoría evolutiva, que vamos a analizar a continuación. Lo haremos de forma cronológica y siguiendo las ideas de los principales actores aunque, como consecuencia, nos dejaremos en el tintero a muchos otros grandes naturalistas. En la bibliografía podrán encontrar documentación sobre la historia de la teoría, que recomiendo encarecidamente pues es verdaderamente apasionante.

Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon, en los años 1749 a 1789 escribió su *Historia Natural* y propuso que los seres vivos se originaron de manera espontánea al enfriarse el planeta. En el volumen 14 incorpora el origen evolutivo de especies parecidas a partir de tipos ancestrales (por ejemplo, tigres, gatos y pumas han «degenerado» a partir de un gato ancestral). Es un gran ejemplo del Materialismo Científico y la Ilustración que, como tal, desplazó a Dios como creador y planteó «moldes internos» que dirigen la generación espontánea y la subsiguiente «degeneración» en otras formas.

Pero Buffon fue duramente criticado por Georges Cuvier, ferviente opositor al Evolucionismo, quien sí había observado una progresión de formas, desde las más sencillas a las más complejas, en sus estudios de las columnas geológicas. Él propuso una pauta histórica de inundaciones catastróficas que acababan con la vida terrestre, y una posterior repoblación por migración o creación. Era enormemente respetado en los círculos científicos de la época por sus impresionantes investigaciones sobre anatomía comparada. Su teoría terminó siendo doctrina para muchos naturalistas que denostaban las explicaciones evolucionistas. Pese a ello, la corriente evolucionista siguió tomando impulso cada cierto tiempo con algún nuevo descubrimiento.



Figura 1. Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon. *Wikimedia Commons*.



Figura 2. Baron Georges Leopold Chretien, Frédéric Dagobert Cuvier. *Wikimedia Commons*.

En 1796, Pierre Simon Laplace propuso que los planetas se forman por condensación de nebulosas de polvo y gas que se aplastan en rotación debido a su propia gravedad. Partiendo de estas ideas, William Buckland propuso que el enfriamiento gradual es la causa de la sucesión orgánica. Imaginó un bondadoso Dios creando una sucesión de especies bien

diseñadas para su época geológica. Él fijaba la evolución y ésta tenía un fin, que somos nosotros. Estas mismas ideas eran compartidas por muchos otros naturalistas de principios del siglo XIX (Larson, 2006).

En 1802 Jean-Baptiste Lamarck publicó la primera *Teoría de la transmutación* (1910). Propuso una generación espontánea y progresiva de organismos vivos por acción de una «fuerza vital» que afectaría a la materia física. El mundo externo y las necesidades internas harían que esta fuerza vital (que también llamaba fluido nervioso) se repartiera y concentrara en determinadas zonas para dar lugar a nuevos órganos o, en función del uso, a la atrofia y expansión de los preexistentes (pues el fluido migraba de forma natural de los menos a los más usados).

Cuvier criticó duramente también a Lamarck y replicó que las distintas partes de la anatomía eran tan interdependientes que el conjunto no podía haber evolucionado por partes (en base a su famoso principio de correlación de las partes). Además hizo notar la falta de especies de transición entre unas formas y otras.



Figura 3. Jean-Baptiste Lamarck. *Wikimedia Commons*.

El siguiente gran actor en la historia de la teoría evolutiva es el propio Darwin, pero de él hablaremos detenidamente más adelante. Después de Darwin también hay importantes controversias y, de hecho, hasta mediados del siglo XX, aparte del Darwinismo hay otras cuatro teorías rivales para explicar el mecanismo de acción de la evolución:

1. *Neolamarckismo*.
2. *Ortogénesis* (evolución impulsada por mecanismos intrínsecos del ser vivo, no por el ambiente).
3. *Teoría de la mutación o saltacionismo* (evolución a saltos).
4. *Finalismo o Evolucionismo teísta* (teología natural que incluye la evolución).

La selección natural es la presión del ambiente que, de una forma paulatina, afecta a los seres vivos a lo largo del tiempo. La ortogénesis, en su lectura del registro fósil, organizaba a las especies en líneas ordenadas y creía en fuerzas internas que impulsaban la evolución en una dirección. Los neolamarckistas, por su parte, pensaban que los caracteres adquiridos se añadían al final del desarrollo embrionario. Tanto ortogenetistas como lamareckistas son *finalistas*, pues para ellos los cambios no se deben al azar.

Este punto es importante, pues es un error común incluso hoy día pensar de esta forma (como por ejemplo al decir que hay una «tendencia a aumentar el tamaño del cerebro», o que «el pulgar oponible aparece para perfeccionar la manipulación»). En este sentido, debemos pensar más bien que la evolución lo que hace es reorganizar las estructuras del organismo. Si alguna de esas modificaciones resulta útil para la vida en

un ambiente determinado será seleccionada, pero no hay que buscar un propósito en la evolución. Por eso muchas veces se dice que la evolución hace «chapuzas», no tira el edificio y lo construye de nuevo, sino que actúa sobre el edificio y lo modifica.

La teoría de la mutación (saltacionismo) de Hugo de Vries no abandonaba la selección como motor, pues los mutantes serían sometidos a la presión selectiva del medio.

La síntesis moderna entre el darwinismo y la genética se llama Neodarwinismo. Esta síntesis, formulada a mediados del siglo XX, acaba básicamente con los lamarekistas y ortogenetistas. Hoy día se analizan tres teorías:

1. *Neodarwinismo*
2. *Equilibrio puntuado*
3. *Un saltacionismo renovado*

Para el *equilibrio puntuado* la selección actúa a varios niveles, no sólo en el de individuo, sino también a nivel de especie. En el registro fósil la estabilidad predomina frente al cambio. Darwin pensaba que la *especiación* (el proceso de generación de una nueva especie a partir de una preexistente) se debía al cambio morfológico seleccionado (por selección natural). Pero el cambio no es especiación, ni la adaptación tampoco, y ésta última es el resultado de la selección natural. Para los *neodarwinistas* el cambio es constante en el tiempo, mientras que para los defensores del equilibrio puntuado el cambio en la morfología se produce en el momento de especiación. En las poblaciones grandes el cambio es más lento porque los cambios se pierden en un enorme banco (o *pool*) de genes, mientras que en poblaciones aisladas y pequeñas el cambio es más rápido. Para el equilibrio puntuado, la especiación es rápida pero no a saltos.

Los nuevos saltacionistas (como Richard Goldschmidt) piensan que la especiación nunca es resultado de la selección natural, sino de una alteración en el desarrollo de un individuo que produce un «monstruo» (Dietrich, 2000). En general, la genética lo rebate, pero algunos ven en la semejanza de genes operadores (que regulan la expresión de otros) en especies muy separadas una posibilidad para el saltacionismo, pues pequeños cambios en estos genes producen grandes cambios morfológicos.

Pese a las diversas corrientes, la evolución es uno de los pilares fundamentales de todas las ciencias de la vida. Darwin con su teoría consiguió unificar el mundo vivo con el mundo inanimado, y en este sentido, es posiblemente uno de los autores que más ha influido en la historia de la ciencia.

Y recordemos que, en biología, todo tiene sentido a la luz de la evolución.

III. Biografía

Charles Robert Darwin fue el quinto hijo de Robert Darwin y Susannah Wedgwood, y nació el 12 de febrero de 1809 en Shrewsbury, Inglaterra. Murió el 19 de abril de 1882 tras protagonizar una auténtica revolución científica en torno a su *Teoría de la evolución por medio de la selección natural*.

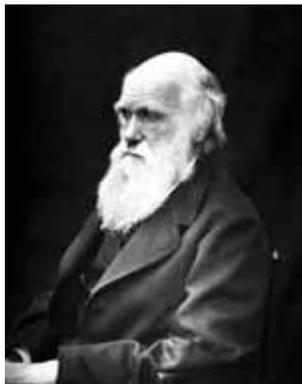


Figura 4. Fotografía de Charles Darwin. *Wikimedia Commons*.

En 1818 comenzó a asistir a la escuela de Samuel Butler, donde permaneció hasta 1825. Sobre ese periodo, y en concreto sobre dicha escuela, no guardó Darwin un buen recuerdo, a juzgar por lo que se desprende de su autobiografía

Nada pudo ser peor para el desarrollo de mi mente que la escuela del Dr. Butler, pues era estrictamente clásica, y no se enseñaba otra cosa que un poco de anticuada geografía e historia. La escuela como medio de educación para mí fue simplemente un espacio en blanco.¹

Desde su infancia fue un gran coleccionista, tanto de minerales como de insectos. También apunta que cerca del final de sus estudios en dicha escuela, solía dedicarse con su hermano, que estudiaba química, a hacer experimentos, cosa que llegó a oídos del Dr. Butler, quien le recriminó públicamente por «perder el tiempo en tales inútiles asuntos.»

En 1825 su padre le sacó antes de tiempo de la escuela y le envió a la Universidad de Edimburgo, con su hermano, para cursar estudios en medicina. Comenzó a relacionarse con naturalistas de su época y en 1826 entró a formar parte de la Sociedad Pliniana, donde hizo sus primeras lecturas. También entró en contacto con la Real Sociedad Médica (que no le interesó demasiado) y la Sociedad Werneriana.

Durante su segundo año en Edimburgo asistió a diversas lecturas sobre Geología y Zoología, pero como él mismo relata: «el único efecto que produjeron en mí fue la determinación de no leer en la vida un libro sobre Geología, o estudiar dicha ciencia de ninguna otra manera.»

Tras el segundo año estudiando medicina sin demasiado interés, su padre le sugiere que se haga pastor protestante. A Darwin le atraía la idea de ser pastor (aunque no la de creer ciegamente en todos los dogmas de la Iglesia de Inglaterra), y en 1827 es admitido en el «Christ's College» de la Universidad de Cambridge, donde se muda en enero de 1828.

En su autobiografía dice:

Considerando cuán duramente he sido atacado por los ortodoxos, resulta ridículo el que yo pretendiera un día ser pastor. Esta intención y deseo de mi padre no fueron oficialmente abandonados, sino que murieron de muerte natural cuando, al abandonar Cambridge, me uní al *Beagle* como naturalista.

Y sobre este periodo en Cambridge: «Desperdiicé mi tiempo durante los tres años que estuve en Cambridge, en lo que a estudios académicos se refiere, tanto como en Edimburgo

¹ Todas las citas de esta sección pertenecen a esta obra mientras no se especifique lo contrario (en VAN Wyhe, 2002), traducción propia.

o en la escuela». De esta época, sin embargo, recuerda mejorar sus hábitos como coleccionista, y la satisfacción de ver su nombre junto a la descripción de una nueva especie («*capturado por C. Darwin*»).

En 1831 finaliza sus estudios en Cambridge sin honores, y al volver a casa se encuentra con una carta informándole de que «el capitán Fitz-Roy compartiría parte de su propia cabina con cualquier joven que se ofreciera voluntario para ir con él, sin paga, como naturalista del viaje del Beagle».

En principio su padre se muestra reacio a este viaje y Darwin escribe para rechazar la oferta. Pero al día siguiente su tío (Josiah Wedgwood), que creía que aceptarla sería bueno para su sobrino, convenció a su padre para que permitiera al joven Charles Darwin embarcarse en el Beagle, en el que fue el viaje más importante de su vida y que permitió muchas de las observaciones que le llevarían a su *teoría de la evolución por medio de la selección natural*, así como a otras publicaciones más inmediatas.

Tras dos intentos fallidos, el Beagle zarpa el día 27 de diciembre de 1831.

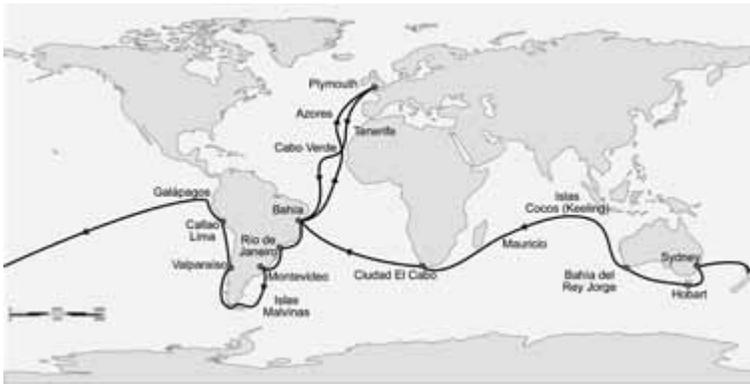


Figura 5. Mapa del viaje del Beagle. *Wikimedia Commons*.

Esta etapa es crucial para el desarrollo posterior de sus teorías, y además le permitió reconciliarse con la geología, en la que también fue un destacado autor. Cuando Darwin zarpó en el Beagle era un catastrofista típico bajo el manto de Cuvier, pero el capitán Fitz-Roy le prestó un ejemplar de los «Elementos de Geología» de Lyell (1833), una teoría polémica y nueva (el *Uniformismo*) que rápidamente interiorizó. Al principio del viaje, Darwin analizó a la luz del uniformismo la geología de Cabo Verde. Esto es muy importante para su teoría de la evolución, pues al aceptar que cambios graduales en el tiempo llevan a grandes modificaciones en el medio, aceptó la idea del uniformismo, pero a diferencia de Lyell, llevó a término esta noción acercándose a una idea evolucionista de la biología.

Más tarde, en las islas Galápagos se abrió ante él la idea de la evolución orgánica. Se trata de un conjunto de islas en las que observó especies altamente emparentadas (como los famosos pinzones), pero con ligeras variaciones en su estructura y sus hábitos alimenticios. También se percató de que estas islas compartían especies con Sudamérica, que es el continente más cercano, mientras que otras islas cercanas a África, por ejemplo, compartían fauna y flora en gran medida con aquel continente. Por tanto, empezó a pensar que las especies de las Galápagos procedían de Sudamérica, de un antecesor común y, posteriormente, se habrían diferenciado en las diferentes islas.

El viaje se prolonga hasta el 2 de octubre de 1836, cuando el Beagle llega a puerto en Falmouth. Dos días después Darwin regresa a Shrewsbury. Sobre este viaje, escribe en su biografía lo siguiente: «El viaje en el Beagle ha sido de lejos el evento más importante de mi vida, y ha determinado toda mi carrera. [...] Siempre he sentido que le debo a este viaje el primer verdadero entrenamiento y educación de mi mente». A partir de este momento empieza a publicar una prolífica lista de artículos sobre sus observaciones durante el viaje, muchos de índole geológica y otros zoológicos.

Publicó la *Zoología del Viaje del Beagle* en colaboración con otros naturalistas entre 1838 y 1843, un extenso compendio de observaciones sobre la zoología de los diversos lugares visitados por Darwin en su viaje. En 1839 publicó su primer libro enteramente propio, el *Viaje de un naturalista alrededor del mundo*, también conocido como *El viaje del Beagle*.

Sobre la etapa de octubre de 1836 a enero de 1839, Darwin escribió: «Esos dos años y tres meses fueron los más activos de toda mi vida, aunque me encontraba ocasionalmente enfermo.» (Darwin, 1839). A finales de 1838 se muda a Londres y en enero de 1839 se casa con Emma Wedgwood. La dote de Emma, junto con su propia fortuna le permitió dedicarse a elaborar sus teorías con total libertad. Ese mismo año nacerá su primer hijo, de los diez que tuvo a lo largo de su vida. Únicamente siete de ellos llegarían a la edad adulta.

En 1837 comienza a elaborar cuadernos sobre sus ideas acerca de la transmutación de las especies y en 1838 leyó, por diversión, el *Ensayo sobre el principio de la población* de Thomas Malthus (1830), economista británico que postulaba que el aumento de la población mundial estaba rozando los límites de explotación de los recursos naturales, lo que provocaría una lucha por la supervivencia de la que sobreviviría solo el más fuerte.

Y resultó que las ideas de Malthus en ese libro fueron tremendamente clarificadoras para Darwin en el contexto de la evolución. Sobre este particular escribió

me dí cuenta de que bajo estas circunstancias las variaciones favorables tenderán a ser preservadas, y las desfavorables a ser destruidas. El resultado de esto sería la formación de nuevas especies. Por tanto, finalmente tenía una teoría en la que trabajar, pero estaba tan ansioso de evitar perjuicios que determiné no escribir nada sobre ello durante algún tiempo. En junio de 1842 me permití la satisfacción de escribir un breve esbozo de la teoría en 35 páginas; y éste fue ampliado en 1844 a 230 páginas.

De 1839 a 1842 siguió publicando artículos y en 1842 se muda con su familia a Downe. Ese mismo año elabora el primer borrador de su teoría, escrito a lápiz en 35 páginas durante una visita a casa de sus suegros en Staffordshire. En 1844 lo amplía, y le pide a Emma que, en caso de su repentina muerte, se encargase de hacer llegar el ensayo a algunos amigos para su edición. No publicó nada acerca de sus teorías durante veinte años, pese a que las consideraba dignas (como atestigua su petición a Emma), por varias razones. Una de ellas fue el miedo a sufrir el mismo destino de Lamarck o de su propio abuelo, Erasmus Darwin, quien también publicó a favor de la evolución. Este destino no era otro que ser ridiculizado a manos de los científicos victorianos corrientes. Otra razón para dilatar tanto su publicación fue la obsesión de Darwin por conocer de antemano las posibles objeciones a su teoría, las cuales trató de contestar antes de que pudieran ser formuladas.

En 1844 se publica el libro *Vestiges of the Natural History of Creation*, que tuvo bastante buena aceptación y puso en boga el debate del Evolucionismo (Chambers, 1844). Darwin lo leyó, pero no le causó demasiada impresión, entre otras cosas por su escaso rigor. Sin embargo, escribió «tal libro, si no hace ningún otro bien, cuanto menos extiende el gusto por las Ciencias Naturales». Y justamente causó ese efecto pues, si bien fuere duramente criticado por muchos científicos de la época, también puso el Evolucionismo en boca de todos ellos.

Hasta 1846 siguió haciendo experimentos relacionados con la evolución en su casa de Downe, mientras publicaba más artículos y reediciones de sus aventuras en el *Beagle*. En 1846 comienza a estudiar los percebes, a los que dedicó ocho años, durante los cuales continuó creciendo su seguridad en la teoría. El trabajo con los percebes le sirvió para notar cómo minúsculas adaptaciones daban cuenta del éxito diferencial de distintas especies (Brown, 2007). Escribió:

Los cirrípedos conforman un grupo altamente variable y difícil de clasificar; y mi trabajo con ellos me fue de considerable uso cuando tuve que discutir en el *Origen de las Especies* los principios de la clasificación natural. En cualquier caso, dudo de si el trabajo finalmente merece todo el tiempo que consumió.

Efectivamente, publicó dos gruesos volúmenes sobre los percebes tras ocho años de investigación, pero su estado de salud iba empeorando y, según sus diarios, perdió dos de esos años a causa de su enfermedad.

En noviembre de 1848 muere su padre, Robert Waring Darwin, a cuyo entierro no pudo llegar a tiempo a causa de su enfermedad. Y en 1851 muere su hija mayor, Annie, con 10 años. Su muerte causó un gran impacto en Darwin y le llevó a profundizar su agnosticismo. Finalmente, en 1854 termina su colección sobre los cirrípedos y se dedica enteramente a su teoría de la evolución.

En su autobiografía escribió:

Tras volver a Inglaterra, me pareció que seguir el ejemplo de Lyell en la geología y recolectar todos los datos que tuvieran algo que ver con la variación de los animales y plantas domésticos y en la naturaleza podría quizá dar alguna luz al problema. [...] Pronto me di cuenta de que la selección era la piedra de toque del éxito del hombre al hacer razas útiles de animales y plantas. Pero cómo podría aplicarse esta selección a organismos viviendo en estado natural permaneció un misterio para mí durante algún tiempo.

En 1855 se dedicó principalmente a experimentar con semillas y a leer toda la documentación sobre el tema de la variación que pudo encontrar. Entre 1856 y 1857 se dedica (por consejo de Charles Lyell) a escribir lo que luego serán capítulos de *El Origen de las Especies*.

El año 1858 fue especialmente trascendente para Darwin, pues durante el verano Alfred Russel Wallace le envió su artículo *Sobre la Tendencia de las Variedades a Diferenciarse Indefinidamente de la Forma Original*. Vio en este artículo un resumen perfecto de su propia teoría, y le escribió a Lyell²:

Hoy [Wallace] me ha enviado el texto adjunto con una carta pidiéndome que se lo dirija. Creo que merece la pena leerlo. Sus palabras se han cumplido con creces: debería haberme anticipado. Eso dijo usted cuando le expliqué mi teoría de que la «selección natural» depende de la lucha por la existencia. Nunca he visto una coincidencia más sorprendente. ¡Si Wallace tuviera una copia de mi esquema de 1842 no podría haberlo resumido mejor! [...] De este modo, mi originalidad, cualquiera que sea, va a quedar destruida.

2 Las referencias a la correspondencia de Darwin obtenidas en *Darwin Correspondence Project*, una gran base de datos de correspondencia accesible desde <http://www.darwinproject.ac.uk/>, salvo indicación contraria.



Figura 6. Alfred Russel Wallace. *Wikimedia Commons*.

Efectivamente, Darwin creyó haber perdido la originalidad de su descubrimiento, e incluso redactó una carta para Wallace en la que le concedía toda prioridad, pero Lyell y Joseph Dalton Hooker le convencieron de que debía presentar un resumen de sus ideas junto con el resumen de Wallace ante la *Linnean Society* de Londres, y lo hizo pese a que en principio no le pareció buena idea, pues temía que Wallace dudara de su honorabilidad. Finalmente aceptó y utilizó sus antiguas notas (de 1842) y una carta escrita a Asa Gray con un resumen de sus ideas para la comunicación pública.

Al principio dude mucho consentir, pues pensaba que Wallace podría considerar el hacerlo injustificable por mi parte, ya que entonces no sabía cuán generosa y noble era su disposición. El extracto de mis notas y la carta a Asa Gray nunca fueron pensados para ser publicados, y estaban mal escritos. El ensayo de Wallace, por otro lado, se expresaba admirablemente y era muy claro. En cualquier caso, nuestra comunicación conjunta despertó poco interés, y la única reseña publicada que puedo recordar fue hecha por el profesor Houghton de Dublin, cuyo veredicto era que en ella todo lo nuevo era falso, y lo verdadero era viejo.

El 1 de julio de 1858 Lyell y Hooker presentaron las comunicaciones de Darwin y Wallace en orden alfabético por apellidos, ante la *Linnean Society* de Londres, sin la presencia de ninguno de los dos. Entretanto, el 28 de junio de 1858 muere el pequeño Charles por fiebre escarlata. Darwin se va a la Isla de Wight donde comienza a preparar una obra más extensa que culminará con la publicación en noviembre de 1859 de *El Origen de las Especies por medio de la Selección Natural, o la Preservación de las Razas Favorecidas en la Lucha por la Existencia*.

Cierra esta primera edición de la obra fundamental de Darwin el siguiente párrafo:

Hay grandeza en esta concepción de que la vida, con todo su poderío, fue originalmente infundida a unas pocas formas de vida o a una sola, y en la idea de que mientras este planeta giraba inmutablemente de acuerdo a la ley de la gravedad, de un comienzo tan simple, las más bellas y prodigiosas formas de vida hayan evolucionado, y lo siguen haciendo. (Darwin, 1859)³

La primera edición se agota el mismo día que sale a la venta, y en 1860 se publica la segunda. Curiosamente, en esta edición y en las posteriores, el cierre mencionado anteriormente se modifica para incluir a un posible creador «fue originalmente infundida por el Creador a

3 «There is grandeur in this view of life, with its several powers, having been originally breathed into a few forms or into one; and that, whilst this planet has gone cycling on according to the fixed law of gravity, from so simple a beginning endless forms most beautiful and most wonderful have been, and are being, evolved».

unas pocas formas de vida o a una sola... «⁴, quizá en un intento de aclarar que, para Darwin, aún quedaba sitio para un Dios creador en el momento primero de aparición de la vida, pese a que su agnosticismo iba creciendo con los años.

A partir de este momento se dedica, cuando su mala salud se lo permite, a producir obras que desarrollan temas que en *El Origen de las Especies* son únicamente capítulos. Entre ellas cabe destacar la publicación de *La Variación de los Animales y de las Plantas bajo la Acción de la Domesticación* (1868), *La Descendencia Humana y la Selección Sexual* también conocido como *El Origen del Hombre y la Selección Sexual* (1871), y *La Expresión de las Emociones en el Hombre y en los Animales* (1872).

El libro sobre la variación lo comienza en 1860. En 1861 continúa con la escritura de esta obra y se publica la tercera edición de *El Origen de las Especies*. También comienza a preparar material sobre las orquídeas, que al año siguiente se publicará (Darwin, 1862). Ese mismo año comienza a dejarse su famosa barba, tras un empeoramiento de su salud.

De hecho, a partir de 1863 su salud empeora tanto que se convierte en un problema para su trabajo, y continúa así hasta 1866, cuando se publica la cuarta edición de *El Origen de las Especies*.

En 1871 publica *El Origen del Hombre y la Selección Sexual*. Dice Darwin en sus memorias que

tan pronto me convencí, en el año 1837 o 1838, de que las especies eran mutables, no pude evitar pensar que el hombre debe seguir la misma regla. Por ello recogí notas al respecto para mi propia satisfacción y, durante un largo periodo, sin ninguna intención de publicarlas. Y aunque en *El Origen de las Especies* no se discute ninguna especie en particular, sin embargo pensé que sería mejor, a fin de que ningún hombre honorable me acusara de ocultar mis puntos de vista, añadir que con trabajo ‘se arrojará luz sobre el origen del hombre y su historia’.

Darwin aplicó la selección natural a todos los caracteres humanos, incluso los más nobles o elevados. Y su punto de vista no pasó desapercibido, sobre todo entre sus detractores, pese a que esta obra no tuvo tanta repercusión como el *Origen de las especies*. Si bien muchos naturalistas de la época podían (y lo hicieron) aceptar la teoría de la selección natural mientras se hablara de gusanos, pavos reales o pinzones, una cosa muy distinta era que aceptaran (incluyendo, por ejemplo, a Wallace) el mismo tratamiento para el ser humano.

Pero lo cierto es que desde la publicación de *El Origen...* en 1859 se había discutido extensamente en los círculos científicos (y no científicos) sobre la posibilidad de que el hombre también fuera producto de la evolución; por esa razón el libro de Darwin no supuso demasiada novedad. De hecho en 1863 Thomas Henry Huxley publicó su *Evidence as to Man's place in Nature* con la famosa secuencia de esqueletos de primates que se reproduce a continuación (Huxley, 1863):

4 «There is grandeur in this view of life, with its several powers, having been originally breathed by the Creator into a few forms or into one; and that, whilst this planet has gone cycling on according to the fixed law of gravity, from so simple a beginning endless forms most beautiful and most wonderful have been, and are being, evolved».

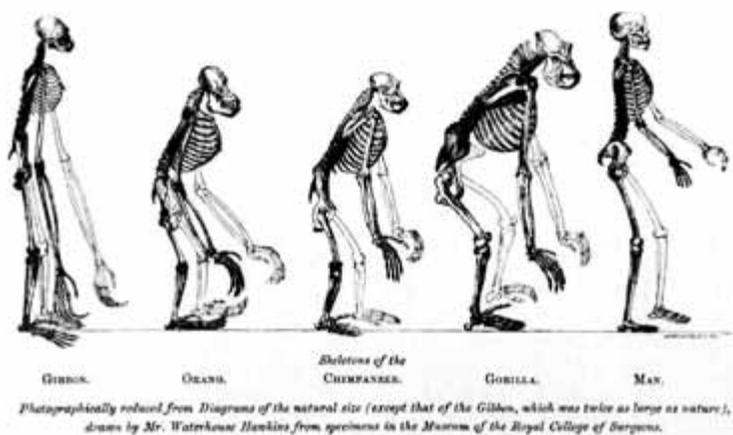


Figura 7.

Por todo ello, la nueva publicación de Darwin no tuvo tanto efecto como *El Origen...* En 1872 publica *La Expresión de las Emociones en el Hombre y los Animales* (junto con la sexta edición de *El Origen...*). Con ello completa sus obras sobre la evolución, pues esta última, junto con *El Origen del Hombre* y *La Variación de los Animales y las Plantas bajo la Acción de la Domesticación* completan capítulos de *El Origen...* de forma extensiva.

En 1875 publica una obra sobre plantas insectívoras, y en 1876 escribe su autobiografía, tal y como será publicada más tarde por Francis Darwin. Por cierto, el primer nieto de Darwin (hijo de Francis y Amy) nace este mismo año. Amy Darwin muere en el parto y Francis se muda a la casa de Down con el recién nacido. Francis será a partir de ese momento el secretario y asistente de Darwin. Este mismo año publicará también *Efectos de la fertilización propia y cruzada en el Reino Vegetal*. En 1877 publica *Las Diferentes Formas de las Flores en Plantas de la Misma Especie* y en 1880, *El Poder del Movimiento en las Plantas*.

Sus últimos años los pasa totalmente dedicado a la tarea científica y a escribir aún otra obra sobre la formación de humus. En 1881 muere su hermano Erasmus, que fue una de las personas que más influyó en la determinación de su carrera científica.

Finalmente Charles Darwin muere el 19 de abril de 1882 y es enterrado en la Abadía de Westminster. Deja tras de sí un legado prolífico y una vida dedicada a la ciencia, durante la cual revolucionó la forma de entender la biología e, incluso, la estatura del hombre y su lugar en el mundo.

IV. Acogida de El Origen de las Especies

La reacción a la obra de Darwin no tardó en llegar tras la publicación de *El Origen de las Especies* en 1859. Si bien no se trataba de un debate nuevo (por ejemplo, hubo acaloradas discusiones a causa del *Vestiges...*) sí es cierto que, por vez primera, se trataba de una teoría de la «transmutación» completamente plausible y dotada de un rigor científico incuestionable. Esto hizo que una gran parte de la comunidad científica de la época se posicionara a favor de las teorías de Darwin, excepción hecha de la élite dirigente científico-clerical.

De hecho, se puede decir que, en general, las ideas de Darwin fueron aceptadas por los sectores liberales de la población al representar un cambio de mentalidad respecto al orden establecido. De forma similar, los sectores más conservadores se opusieron ferozmente. La

reacción de la iglesia anglicana fue dual. Por una parte, había quien negaba tajantemente la teoría y por otra, algunos clérigos anglicanos liberales la aceptaron entendiéndola como un instrumento del creador.

Huxley se convirtió en un gran defensor de Darwin y utilizó su teoría para atacar a Richard Owen, quien representaba el ala religiosa oficial de la ciencia británica victoriana. En 1860 tuvo lugar una famosa discusión en una reunión de la *British Association for the Advancement of Science* entre Huxley y Samuel Wilberforce (obispo de Oxford). Ambas partes eran muy conscientes de la transcendencia de este debate, y desafortunadamente no tenemos registros del mismo, fuera de los que dejaron posteriormente sus actores y algún que otro asistente. Reproducimos aquí lo que escribió el zoólogo Alfred Newton en una carta a su hermano Edward:

En la Sección de Historia Natural tuvimos otro apasionado debate darwiniano [...] Henslow pidió a Huxley que expusiera sus ideas con más extensión, y esto hizo que hablase el obispo de Oxford [...] Refiriéndose a lo que Huxley había dicho dos días antes, sobre que al fin y al cabo no le importaría saber si descendía de un gorila o no, el obispo se mofó de él y le preguntó si tenía preferencia por descender de él por parte de padre o de madre. Esto dio a Huxley la oportunidad de decir que antes preferiría ser familia de un simio que de un hombre como el propio obispo, que utilizaba tan vilmente sus habilidades oratorias para tratar de destruir, mediante una muestra de autoridad, una discusión libre sobre lo que era o no verdad, y le recordó que en lo que se refiere a las ciencias físicas la «autoridad» siempre había acabado siendo destronada por la investigación, como podía verse en los casos de la astronomía y la geología. A continuación atacó los argumentos del obispo y mostró cómo no se correspondían con los hechos, y cómo el obispo no sabía nada de lo que había estado hablando (Wollaston, 1921: 118-120).

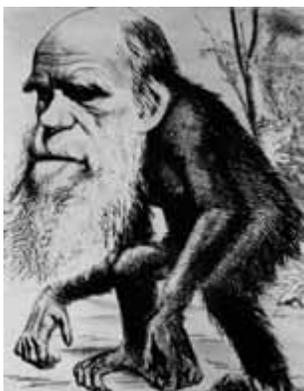


Figura 8. Caricatura de Darwin de 1871.



Figura 9. Caricatura de 1881. Wikimedia Commons.

Pero si bien las críticas más acuciantes fueron las religiosas, renovando el debate ciencia versus religión, también hubo críticas científicas que fueron, además, las que más preocuparon a Darwin, quien se prestó a resolverlas con prontitud en las sucesivas ediciones de *El Origen...* y otros libros relacionados con el tema evolutivo.

Como comentamos en el epígrafe sobre la historia de la teoría evolutiva, al inicio, Darwin tuvo que competir dentro del ámbito científico con otras teorías de la transmutación como el *lamarckismo* y la *ortogénesis*. Además, Darwin carecía de un apoyo de vital importancia al

no poder explicar los mecanismos de la herencia, necesarios para sostener todo el edificio teórico.

Darwin no conocía los desarrollos de Gregor Mendel, que pasarían desapercibidos hasta el siglo XX. A principios de dicho siglo, la unificación de las teorías de Darwin con la incipiente genética daría origen al *Neodarwinismo*, que obtendría ya una aceptación absoluta en la comunidad científica internacional (con algunos desacuerdos y nuevos desarrollos que completan la teoría más que derogarla).

Pero volviendo al tiempo de la publicación, uno de los primeros artículos en aparecer sobre *El Origen...* lo hizo en la revista *Athenaeum* solo cuatro días después de la salida del libro. En dicho artículo se retoma la polémica despertada ya en tiempos del *Vestiges* acerca de la descendencia del hombre desde los monos (Leifchild, 1859). Los esfuerzos de Darwin por evitar esta polémica fueron evidentemente en vano, y dicha controversia fue la que más pasiones encontradas despertó y, desafortunadamente, sigue despertando.

Así, la mayoría de la comunidad científica fue poco a poco aceptando la teoría de Darwin, excepción hecha en muchos casos de su aplicación al ser humano. Owen, por ejemplo, dijo acerca de *El Origen...* que ofrecía la mejor explicación hasta la fecha de la manera en que aparecían nuevas especies, aunque tenía grandes dudas en el caso del hombre. Darwin trataba de convencer a Owen, como a muchos otros, de que la evolución se regía por determinadas leyes, dejando los detalles (buenos o malos) al trabajo del azar. Respecto a la cuestión religiosa, Darwin escribió:

Con referencia al punto de vista teológico de la cuestión (esto siempre es doloroso para mí), estoy perplejo. No tenía la intención de escribir de forma atea. Pero reconozco que no puedo ver tan claramente como otros hacen, y como me gustaría hacer, indicios de designio y de benevolencia a todo nuestro derredor. Me parece que hay mucha miseria en el mundo. No puedo persuadirme de que un Dios benévolo y omnipotente haya creado adrede a los Ichneumonidae con la intención expresa de que se alimentaran desde el interior del cuerpo vivo de ciertas orugas.

En una cartaque le envía Adam Sedgwick (geólogo, profesor y amigo de Darwin) el 24 denoviembre de 1859 le dice:

Si no pensara que es Vd. un hombre de buen temperamento y amante de la verdad, no le diría que [...] he leído su libro con más dolor que placer. Algunas partes he admirado enormemente, de otras me he reído hasta que me han dolido los costados, y otras he leído con absoluto dolor, porque pienso que son completamente falsas y ofensivamente maliciosas». Y también: «Hay en la naturaleza una parte moral o metafísica a la vez que física. [...] Vd. ha ignorado este nexoy [...] la humanidad en mi opinión, podría sufrir un daño que podría embrutecerlay hundir a la raza humana en un grado de degradación mayor que cualquier otro en que haya caído desde que tenemos registros escritos que nos hablen de su historia.

En su respuesta a Sedgwick, Darwin escribió:

Solo puedo decir que he trabajado como un esclavo en el tema durante más de 20 años y que no soy consciente de que segundas intenciones hayan influenciado las conclusiones a las que he llegado. Me aflige haber escandalizado a un hombre a quien honro sinceramente. Pero no creo que Vd. deseara que nadie escondiera los resultados a los que ha llegado tras trabajar con el mejor talento que posee. No creo que mi libro sea malicioso, pero hay tanta gente trabajando en el tema que, de estar equivocado, será rápidamente aniquilado.

Y, efectivamente, Darwin pensaba que la mejor muestra de la validez de su teoría era su resistencia ante los ataques que recibía, que eran numerosos. En sus propias palabras: «los ataques han estado cayendo abundante y pesadamente sobre mi ahora endurecida piel.».

Cuando las tesis de *El Origen...* llegaron a Estados Unidos encontraron, como en Inglaterra, partidarios y detractores. Partidarios entre muchos científicos y las partes liberales y ateas de la población. Detractores sobre todo entre los sectores más religiosos. Asa Gray fue uno de los impulsores de la publicación de *El Origen...* en EEUU, si bien no estaba totalmente convencido de la teoría en toda su extensión. De hecho publicó un pequeño libro llamado *La Selección Natural no es Inconsistente con la Teología Natural*, cosa que agradó mucho a Darwin, quien rápidamente importó cientos de copias a Inglaterra y las envió a amigos y detractores.

En el campo de la ciencia, como ya hemos comentado, la aceptación fue bastante buena, sobre todo entre los investigadores más jóvenes, que a la luz de la evolución empezaron a trabajar de otra manera en anatomía comparada, por ejemplo. Por primera vez era posible explicar el origen de una especie o incluso de la vida misma sin recurrir al capricho de un Dios hacedor, y ello motivó a una generación de jóvenes investigadores que a su vez ayudaron a expandir la propia teoría de la evolución con sus descubrimientos. Aparecía así una nueva ciencia evolutiva.

Mucho después de la muerte de Darwin y de la aceptación prácticamente universal de la selección natural entre los científicos, la aceptación en el público no especializado (excepción hecha de quien la veía más como una extensión de sus ideas políticas o religiosas) era bastante limitada. Esto, unido a la capacidad de convocatoria de la Iglesia, dio lugar a desafortunados episodios como el *caso Scopes* en Estados Unidos. Creo que merece la pena hablar aquí un poco de este caso, pues no fue el último y desgraciadamente aún en nuestros días podemos ver cosas similares.

John Thomas Scopes tenía 24 años en 1925 y era un profesor de biología en Dayton, Tennessee. A principios de 1925 los parlamentarios de dicho estado aprobaron una ley que prohibía la enseñanza de la teoría de la evolución y, al amparo de la misma, dos policías se personaron en la clase del profesor Scopes y le arrestaron.



Figura 10. Scopes, poco después del juicio. *Smithsonian Institution Archives*.

Poco tiempo después se preparó uno de los juicios más famosos de la historia de Estados Unidos que fue apodado por la prensa como «el juicio del mono». William Jennings Bryan asumió la acusación y Clarence Darrow, la defensa en un juicio que llamó la atención de la prensa del mundo entero, y en el que Scopes fue declarado culpable de enseñar la evolución en la escuela secundaria de Dayton, multado con 100 dólares (que más tarde se redujeron a uno) y puesto en libertad. La historia de este juicio fue, por cierto, admirablemente llevada al cine con el título *La herencia del viento*.

Este caso tiene interés fuera de la pura anécdota, pues la llamada «cruzada antievolucionista» en EEUU no terminó en los años veinte, ni ha terminado aún en nuestros días. De hecho, será muy interesante en el futuro analizar todo el movimiento en torno al *diseño inteligente* (doctrina que sostiene que la evolución es el resultado de acciones racionales y deliberadas de un agente inteligente) que está teniendo lugar aún hoy.

Me permitiré la licencia aquí de opinar sobre el asunto. El llamado *diseño inteligente* es, a opinión del que escribe, un nuevo creacionismo que vuelve, renovado y con más fuerza, disfrazado de ciencia experimental. Podría parecerme bien si se reservara únicamente a la esfera de lo privado, a los convencimientos y creencias de cada cual. Pero el «diseño inteligente» puja por introducirse en la vida pública, principalmente en los currículos de biología del sistema educativo estadounidense (y por extensión de muchos otros lugares). De forma similar al antiguo fanatismo religioso de los años veinte, los defensores de dicha teoría tratan de condicionar la enseñanza de la evolución. Y pareciera que al no poder eliminar a Darwin de las escuelas, intentarían ponerse a su altura para al menos poder, desde dentro, influir en los estudiantes.

V. La evolución por medio de la selección natural

La teoría de la evolución por medio de la selección natural descrita por Darwin es sencillamente genial, no solo por ser un marco en el que, mirado de este modo, las leyes del mundo vivo se unifican con las del mundo inanimado, sino además por su gran belleza. Una teoría elegante, capaz de dar respuesta a misterios tan antiguos como el ser humano, y a su vez tan simple que al leerla no puede evitarse exclamar un «¡claro!»¹. Y ciertamente esa es otra de las grandes virtudes de este marco de comprensión de la naturaleza.

Toda la obra es un enorme razonamiento, que comienza con el análisis de las razas domésticas en un intento de persuadir al lector de que, tomando en consideración que el hombre ejerce sobre ellas una especie de selección artificial para producir variedades que le sean útiles, no es descabellado que algo similar pueda ocurrir en la naturaleza y que, por tanto, unas especies puedan descender de otras.

Escribe en el capítulo primero a modo de advertencia:

¿No podrían esos naturalistas, que, sabiendo mucho menos de las leyes de la herencia de lo que saben los criadores, y no sabiendo más que lo que éstos saben de los eslabones intermedios de las largas líneas genealógicas, admiten, sin embargo, que muchas especies de nuestras razas domésticas descienden de los mismos padres, no podrían aprender una lección de prudencia cuando se burlan de la idea de que las especies en estado natural sean descendientes directos de otras especies?²

Y también es interesante el siguiente pasaje, que aparece en el apartado *Principios de selección seguidos de antiguo y sus efectos* del capítulo primero:

No podemos suponer que todas las castas se produjeron de repente tan perfectas y tan útiles como ahora las vemos; realmente, en muchos casos sabemos que no ha sido ésta su historia. La clave está en la facultad que tiene el hombre de seleccionar acumulando; la Naturaleza da variaciones sucesivas; el hombre las suma en cierta dirección útil para él. En este sentido puede decirse que ha hecho razas útiles para él.

1 Puede verse a este respecto la excelente serie documental de la cadena norteamericana PBS *Evolution* (más información en <<http://www.pbs.org/wgbh/evolution/>>)

2 Tomaremos las citas de la traducción al castellano hecha por Antonio de Zulueta y disponible gratuitamente en la Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes (accesible desde <www.cervantesvirtual.com>) mientras no se indique lo contrario.

Después analiza Darwin con bastante éxito la cuestión de las diferencias individuales en el capítulo segundo:

Las muchas diferencias ligeras que aparecen en la descendencia de los mismos padres, o que puede presumirse que han surgido así por haberse observado en individuos de una misma especie que habitan una misma localidad confinada, pueden llamarse diferencias individuales. Nadie supone que todos los individuos de la misma especie estén fundidos absolutamente en el mismo molde. Estas diferencias individuales son de la mayor importancia para nosotros, porque frecuentemente, como es muy conocido de todo el mundo, son hereditarias, y aportan así materiales para que la selección natural actúe sobre ellas y las acumule, de la misma manera que el hombre acumula en una dirección dada las diferencias individuales de sus producciones domésticas.

A continuación escribe sobre la problemática al clasificar especies y variedades:

Compárense las diversas floras de la Gran Bretaña, de Francia y de Estados Unidos, escritas por diferentes naturalistas, y véase qué número tan sorprendente de formas han sido clasificadas por un botánico como buenas especies y por otro como simples variedades. Y añade: ... considero yo las variedades, que son en algún modo más distintas y permanentes, como pasos hacia variedades más intensamente caracterizadas y permanentes, y estas últimas como conduciendo a las subespecies y luego a las especies.

Como se ve, Darwin intenta (dando gran cantidad de ejemplos que no pueden resumirse aquí) que el lector considere la descendencia común de especies como algo posible, al utilizar analogías con las variedades domésticas o incluso las diferencias entre individuos para luego, sirviéndose de la problemática que conlleva la clasificación, construir un continuo entre diferencias individuales, variedades, subespecies y especies que resulta necesario para proceder a explicar el concepto de la selección natural y la lucha por la existencia. En el capítulo tercero finalmente se refiere a ella en estos términos:

Debido a esta lucha [por la vida], las variaciones, por ligeras que sean y cualquiera que sea la causa de que procedan, si son en algún grado provechosas a los individuos de una especie en sus relaciones infinitamente complejas con otros seres orgánicos y con sus condiciones físicas de vida, tenderán a la conservación de estos individuos y serán, en general, heredadas por la descendencia. La descendencia también tendrá así mayor probabilidad de sobrevivir; pues de los muchos individuos de una especie cualquiera que nacen periódicamente, sólo un pequeño número puede sobrevivir. Este principio, por el cual toda ligera variación, si es útil, se conserva, lo he denominado yo con el término *deselección natural*, a fin de señalar su relación con la facultad de selección del hombre; pero la expresión frecuentemente usada por Herbert Spencer de *lasupervivencia* de los más aptos es más exacta y es algunas veces igualmente conveniente. La abordará con extensión en el capítulo cuarto.

Sobre el alcance de la selección natural, dice Darwin:

Si el hombre puede producir, y seguramente ha producido, resultados grandes con sus modos metódicos o inconscientes de selección, ¿qué no podrá efectuar la selección natural? El hombre puede obrar sólo sobre caracteres externos y visibles. La Naturaleza —si se me permite personificar la conservación o supervivencia natural de los más adecuados— no atiende a nada por las apariencias, excepto en la medida que son útiles a los seres. Puede obrar sobre todos los órganos internos, sobre todos los matices de diferencia de constitución, sobre el mecanismo entero de la vida.

Nótese que esta última frase («sobre el mecanismo entero de la vida.») tiene hoy día un sentido más completo que cuando fue escrita, pues hoy conocemos en bastante profundidad ese mecanismo, y además sabemos que es sobre él sobre quien se puede modificar un carácter de forma heredable. Nos referimos, evidentemente, al material genético de una especie dada. No deja de ser interesante cómo se pueden releer en nuestros días muchos pasajes de

la obra de Darwin, obteniendo un significado nuevo y para él desconocido, a la luz de los nuevos avances de la ciencia.

Acerca de este punto, nótese la aclaración de Darwin en el resumen del capítulo quinto:

Cualquiera que pueda ser la causa de cada una de las ligeras diferencias entre los hijos y sus padres —y tiene que existir una causa para cada una de ellas—, tenemos fundamento para creer que la continua acumulación de diferencias favorables es la que ha dado origen a todas las modificaciones más importantes de estructura...

En el cuarto capítulo, Darwin incluye además la idea de la selección sexual:

Esta forma de selección depende, no de una lucha por la existencia en relación con otros seres orgánicos o con condiciones externas, sino de una lucha entre los individuos de un sexo —generalmente, los machos— por la posesión del otro sexo. El resultado no es la muerte del competidor desafortunado, sino el dejar poca o ninguna descendencia. La selección sexual es, por lo tanto, menos rigurosa que la selección natural.

Habla en varias ocasiones de la conveniencia de representar las especies en forma de árbol. Por ejemplo, en el capítulo quinto escribe: C

reo que este ejemplo expresa mucho la verdad; las ramitas verdes y que dan brotes pueden representar especies vivientes, y las producidas durante años anteriores pueden representar la larga sucesión de especies extinguidas. En cada período de crecimiento, todas las ramitas que crecen han procurado ramificarse por todos lados y sobrepujar y matar a los brotes y ramas de alrededor, del mismo modo que las especies y grupos de especies, en todo tiempo han dominado a otras especies en la gran batalla por la vida. Las ramas mayores, que arrancan del tronco y se dividen en ramas grandes, las cuales se subdividen en ramas cada vez menores, fueron en un tiempo, cuando el árbol era joven, ramitas que brotaban, y esta relación entre los brotes pasados y los presentes, mediante la ramificación, puede representar bien la clasificación de todas las especies vivientes y extinguidas en grupos subordinados unos a otros.

Y efectivamente, Darwin fue uno de los primeros en utilizar este tipo de diagramas de la vida que hoy llamamos *cladogramas*. Por ejemplo, aparece en el primer esbozo de la teoría que escribió en 1837.

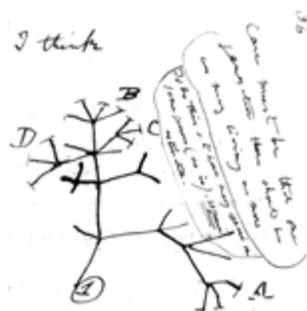


Figura 11. Primer esbozo de la teoría (1837). *Wikimedia Commons*.

El tomo primero termina en ese capítulo quinto, y es donde se explica la teoría. Posteriormente Darwin se dedica a buscar dificultades (todo el segundo tomo en general) que, según Darwin, se resumen en cuatro puntos principales:

1. Si las especies han descendido de otras especies por suaves gradaciones, ¿por qué no encontramos en todas partes innumerables formas de transición? ¿Por qué no está toda la naturaleza confusa, en lugar de estar las especies bien definidas según las vemos?
2. ¿Es posible que un animal que tiene, por ejemplo, la confirmación y costumbres de un murciélago pueda haber sido formado por modificación de otro animal de

costumbres y estructura muy diferentes? ¿Podemos creer que la selección natural pueda producir, de una parte, un órgano insignificante, tal como la cola de la jirafa, que sirve de mosqueador, y, de otra, un órgano tan maravilloso como el ojo?

3. ¿Pueden los instintos adquirirse y modificarse por selección natural? ¿Qué diremos del instinto que lleva a la abeja a hacer celdas y que prácticamente se ha anticipado a los descubrimientos de profundos matemáticos?
4. ¿Cómo podemos explicar que cuando se cruzan las especies son estériles o producen descendencia estéril, mientras que cuando se cruzan las variedades su fecundidad es sin igual?

Esto era muy importante para Darwin, que se dedicó casi obsesivamente a recopilar todas las posibles objeciones a su teoría para rebatirlas en las distintas ediciones del *Origen*. Todo el segundo tomo gira en torno a estos cuatro puntos. Hay aún un tercer tomo en el que escribe mayoritariamente acerca de la distribución geográfica, punto de importancia capital para la teoría. En el capítulo decimotercero escribe:

si nos hacemos el cargo debido de nuestra ignorancia de los efectos de los cambios de clima y de nivel de la tierra que es seguro que han ocurrido dentro del período moderno y de otros cambios que probablemente han ocurrido; si recordamos nuestra gran ignorancia acerca de los muchos curiosos medios de transporte ocasional; si tenemos presente —y es esta una consideración importantísima— con qué frecuencia una especie puede haberse extendido sin interrupción por toda un área dilatada y luego haberse extinguido en las regiones intermedias, no es insuperable la dificultad en admitir que todos los individuos de la misma especie, dondequiera que se encuentren, descienden de padres comunes, y varias consideraciones generales, especialmente la importancia de los obstáculos de todas clases y la distribución análoga de subgéneros, géneros y familias, nos llevan a esta conclusión, a la que han llegado muchos naturalistas con la denominación decentros únicos de creación.

Termina la obra con un capítulo resumen, al final del cual escribe Darwin la siguiente conclusión:

Es interesante contemplar un enmarañado ribazo cubierto por muchas plantas de varias clases, con aves que cantan en los matorrales, con diferentes insectos que revolotean y con gusanos que se arrastran entre la tierra húmeda, y reflexionar que estas formas, primorosamente construidas, tan diferentes entre sí, y que dependen mutuamente de modos tan complejos, han sido producidas por leyes que obran a nuestro alrededor. Estas leyes, tomadas en un sentido más amplio, son: la decrecimiento con reproducción; la deherencia, que casi está comprendida en la de reproducción; la de variación por la acción directa e indirecta de las condiciones de vida y por el uso y desuso; una razón del aumento, tan elevada, tan grande, que conduce a una lucha por la vida, y como consecuencia a la selección natural, que determina la divergencia de caracteres y la extinción de las formas menos perfeccionadas. Así, la cosa más elevada que somos capaces de concebir, o sea la producción de los animales superiores, resulta directamente de la guerra de la naturaleza, del hambre y de la muerte. Hay grandeza en esta concepción de que la vida, con sus diferentes fuerzas, ha sido alentada por el Creador en un corto número de formas o en una sola, y que, mientras este planeta ha ido girando según la constante ley de la gravitación, se han desarrollado y se están desarrollando, a partir de un principio tan sencillo, infinidad de formas las más bellas y portentosas.

Es, en cualquier caso, difícil resumir en tan poco espacio una obra tan extensa y prolija en ejemplos y largas argumentaciones, por lo que no podemos dejar de recomendar su lectura íntegra, pues pese al evidente envejecimiento de la teoría como estructura científica (ciertamente dejada atrás hace mucho tiempo), no deja de ser un magnífico ejemplo de argumentación científica.

VI. Tabla: principales obras

Principales obras de Charles Darwin (títulos originales)
1838-43: <i>Zoology of the Voyage of H.M.S. Beagle</i>
1839: <i>Journal and Remarks (The Voyage of the Beagle)</i>
1842: <i>The Structure and Distribution of Coral Reefs</i>
1844: <i>Geological Observations of Volcanic Islands</i>
1846: <i>Geological Observations on South America</i>
1859: <i>On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life</i>
1862: <i>On the various contrivances by which British and foreign orchids are fertilised by insects</i>
1868: <i>Variation of Plants and Animals Under Domestication</i>
1871: <i>The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex</i>
1872: <i>The Expression of Emotions in Man and Animals</i>
1875: <i>Movement and Habits of Climbing Plants</i>
1875: <i>Insectivorous Plants</i>
1876: <i>The Effects of Cross and Self Fertilisation in the Vegetable Kingdom</i>

VII. Bibliografía seleccionada

- Arsuaga, J. L. (2004), *El Enigma de la Esfinge: Las Causas, el Curso y el Propósito de la Evolución*, Barcelona, Debolsillo.
- Brown, J. (2007), *La Historia de El Origen de las Especies*, Madrid, Debate.
- Chambers, R. (1844), *Vestiges of the Natural History of Creation*, Londres, John Churchill.
- Darwin, C. (1921), *El origen de las especies por medio de la selección natural*, Madrid, Calpe. Edición digital: Alicante, Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 1999. Trad. A. de Zulueta, disponible en <<http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=2174&portal=0>>
- _____ (1839), *Narrative of the surveying voyages of His Majesty's Ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836, describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe. The Voyage of the Beagle (Journal and remarks)*. 1832-1836, III, Londres, Henry Colburn.
- _____ (1859), *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*, Londres, John Murray, disponible en <<http://darwin-online.org.uk/>>
- _____ (1862), *On the various contrivances by which British and foreign orchids are fertilised by insects, and on the good effects of intercrossing*, Londres, John Murray.
- Dietrich, M. R. (2000), «From Hopeful Monsters to Homeotic Effects: Richard Goldschmidt's Integration of Development, Evolution, and Genetics», en *Amer. Zool*, 40, pp. 738-747.
- Huxley, T. H. (1863), *Evidence as to Man's place in nature*, Londres, Williams & Norgate.
- Jay Gould, S. (2004), *La Estructura de la Teoría de la Evolución*, Barcelona, Tusquets.
- Lamarck, J. B. (ca. 1910 [1809]), *Filosofía zoológica*, Valencia, F. Sempere y Compañía Editores (F. Sempere y V. Blasco Ibáñez). Col. Biblioteca filosófica y social. Prólogo de E. Hæckel.
- Larson, E. (2006), *Evolución: La Asombrosa Historia de una Teoría Científica*, Madrid, Debate.
- Leifchild, J. R. (1859), «Review of 'Origin'», en *Athenaeum*, N^o 1673.

Lyell, C. (1833), *Principles of Geology*, Londres, John Murray.

Malthus, T. (1830 [1798]), *An Essay On The Principle Of Population*, Nueva York, Penguin Classics. Summary View and Introduction by A. Flew.

Van Wyhe, J. (ed.) (2002), *The Complete Work of Charles Darwin Online*, disponible en <<http://darwin-online.org.uk/>>

Wollaston, A. F. R. (1921), *Life of Alfred Newton: late Professor of Comparative Anatomy, Cambridge University 1866-1907, with a Preface by Sir Archibald Geikie OM*, Nueva York, Dutton.

Recursos online

The complete work of Charles Darwin online: <http://darwin-online.org.uk/>

Darwin correspondence project: <http://www.darwinproject.ac.uk/>

13. El problema del V postulado y el surgimiento de las geometrías no euclidianas³

I. Introducción

El siglo XIX representa un punto de inflexión en la historia de las matemáticas, no solo por el surgimiento de nuevas teorías, sino —y más importante— por la emergencia de una cierta conciencia entre los matemáticos respecto de la naturaleza de su actividad. Varios aspectos de la concepción tradicional de las matemáticas se vuelven problemáticos, especialmente el concerniente a la relación entre matemáticas y realidad. Por primera vez se hace patente la necesidad de encontrar un fundamento para las matemáticas, y surgen diversas filosofías de las matemáticas buscando explicar su naturaleza. El advenimiento de las así llamadas *geometrías no euclidianas* tiene un sitio de preferencia en este largo y complejo proceso que lleva a la problematización de las matemáticas. Pero para poder comprender ese papel debemos realizar un recorrido histórico que nos llevará desde los comienzos de la matemática axiomática en la antigüedad griega hasta algunas de las más sofisticadas teorías físicas actuales.

II. El problema del V postulado

II.a. Los «elementos» de Euclides

Muchos pueblos antiguos —como los egipcios, babilonios y griegos— habían acumulado importantes resultados en geometría, pero conformaban más una serie de resultados inconexos de cariz empírico que un corpus sistemático. Es a los griegos alejandrinos a quienes cabe el honor de ser los primeros sistematizadores de la geometría. Más específicamente se le atribuye

3 Una versión preliminar y abreviada del presente artículo figura en Rodríguez (2007).

a un personaje llamado Euclides, quien habría vivido hacia el año 300 a.C. en Alejandría, y sería el autor de los *Elementos* de geometría (Euclides, 1991)⁴.

Esta genial obra está compuesta por trece libros, a los que se añadieron más tarde dos más, escritos por autores posteriores. Estos libros trabajan una gran variedad de temas, como problemas de geometría plana (propiedades de rectas, triángulos, circunferencias, etcétera), problemas de aritmética, teoría de inconmensurables, geometría del espacio, etcétera.

Más allá de los conocimientos específicos que el tratado de Euclides transmite, lo que nos va a interesar es la forma en que los presenta: lo que ha sido posteriormente conocido como *sistema axiomático-deductivo*. Si bien está muy lejos de satisfacer los cánones actuales de corrección para tales sistemas, aparecen de forma clara y diferenciada sus elementos esenciales. En primer lugar, un conjunto de proposiciones que sirven de base o fundamento para la construcción del sistema, que se aceptan como verdaderas sin demostración. Se considera que no es posible demostrarlas porque su evidencia radica en ellas mismas, es comprobable por una inspección directa. Hoy en día las identificamos con los axiomas, pero en Euclides conforman un conjunto más complejo de proposiciones con distinto status: nos referimos a los postulados, los axiomas (o nociones comunes) y las definiciones. En segundo lugar, aparece otro conjunto de proposiciones —llamadas teoremas— que expresan todos los resultados geométricos conocidos y que se demuestran rigurosamente a partir de los axiomas. Por último, tenemos un conjunto de reglas que hacen posible tales deducciones y tienen un carácter estrictamente lógico.

El libro comienza con 23 definiciones básicas, aunque luego se introducen muchas más. Su función es brindar una breve caracterización de los elementos básicos con los cuales se va a construir el sistema. Citemos a título de ejemplo las que revisten más interés para nuestro propósito (Euclides 1991: 189ss.):

- Un punto es lo que no tiene partes.
- Una línea es una longitud sin anchura.
- Una línea recta es aquella que yace por igual respecto de los puntos que están en ella.
- Son rectas paralelas las que estando en el mismo plano y siendo prolongadas indefinidamente en ambos sentidos, no se encuentran una a otra en ninguno de ellos.

En el sistema de Euclides las definiciones son lógicamente anteriores tanto a las nociones comunes como a los postulados porque presentan los conceptos básicos sobre los cuales aquellos van a formularse.

Siguen a las definiciones, cinco postulados y diez nociones comunes —llamadas axiomas por Proclo (1948)—. Esta distinción entre postulados y nociones comunes ya había sido establecida por Aristóteles en los *Analíticos Posteriores* (1973), y se basa únicamente en su grado de generalidad⁵. Mientras que las nociones comunes son válidas para todas las ciencias, los postulados son específicos para una ciencia determinada. Las nociones comunes postulan la igualdad, desigualdad, suma, resta, duplicación y división de las magnitudes. Por ejemplo, si a dos magnitudes iguales se añade una magnitud, aquellas siguen siendo iguales. Tienen un carácter tan fuertemente autoevidente que les confiere una certeza exenta de control empírico.

Los postulados son (Euclides, 1991: 197-198):

4 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Melogno, «Los Elementos de Euclides y el desarrollo de la matemática griega» (*comps.*).
 5 Véase en este mismo volumen el artículo de Elena Díez de la Cortina Montemayor, «Ciencia y método en Aristóteles» (*comps.*).

- I. Postúlese el trazar una línea recta desde un punto cualquiera a un punto cualquiera.
- II. Y el prolongar continuamente una recta finita en línea recta.
- III. Y el describir un círculo con cualquier centro y distancia.
- IV. Y el ser todos los ángulos rectos iguales entre si.
- V. Y que si una recta, al incidir sobre dos rectas hace los ángulos internos del mismo lado menores que dos rectos, las dos rectas prolongadas indefinidamente se encontrarán en el lado en que están los (ángulos) menores que dos rectos.

La primera impresión que nos producen es que enuncian proposiciones de distinta índole. Los tres primeros postulados aluden a construcciones posibles, se fija la existencia y unicidad de la recta (determinada por dos puntos) y de la circunferencia (dado su centro y radio). El cuarto establece una importante propiedad de ángulos, que resulta clave para justificar distintos tipos de movimientos garantizando la homogeneidad del espacio. Por su parte, el quinto postulado tiene —por su extensión y compleja formulación— todo el aspecto de un teorema. Con razón se ha dicho que es una de las mejores pruebas del talento de Euclides el que reconociera que debía aceptarse como axioma para construir la geometría.

Para Euclides y demás matemáticos antiguos lo que garantizaba la solidez del sistema geométrico era la *autoevidencia* de los postulados. Consideramos un postulado autoevidente si es el caso que su verdad se nos manifiesta de forma inmediata y su negación aparece como un absurdo. Esta peculiar característica de los postulados se extraía de intuiciones geométricas respecto del espacio y de las figuras reales de nuestra experiencia cotidiana. Por ello, un sistema matemático que parte de postulados autoevidentes debe ser necesariamente el que se aplica al mundo real, e incluso debe considerarse como una descripción del mismo.

La brecha existente entre los primeros cuatro postulados y el quinto se hace más ancha si tomamos en consideración la exigencia del status de autoevidencia intuitiva. Los cuatro primeros expresan propiedades evidentes para nuestra intuición geométrica que incluso pueden extraerse de nuestra experiencia cotidiana. Al tener dos puntos siempre es posible trazar una y solo una recta que los una, siempre podemos prolongar una recta o construir un círculo a partir de cualquier punto y con cualquier radio, etcétera. Sin embargo, la complicación técnica del V postulado pone en tela de juicio su evidencia intuitiva. Una muestra de que al propio Euclides no escapó esta diferencia es que dilata su utilización lo más posible. Recién lo aplica por primera vez para demostrar la proposición 29 del Libro I. Para que el postulado funcione es fundamental considerar las rectas euclidianas como *actualmente infinitas*, lo que genera las mayores dificultades a la hora de atribuirle significado empírico. En la figura 1 parece evidente que si se extienden las rectas hacia la derecha llegaría un momento en que encontraríamos un punto en el que se cortarían.

Si alguien objetara que en esta hoja no se cortan, podríamos decir que solo debemos extender la hoja. Pero ¿que pasa si los ángulos internos a la derecha suman $179,99^\circ$? Sin duda tendríamos que conseguir un papel muchísimo más grande. Pero si a medida que agrandamos el papel hacia la derecha seguimos añadiendo nueves a aquella cifra decimal nunca encontraremos el punto de intersección. Como jamás podemos trazar rectas actualmente infinitas, es imposible verificar empíricamente si esas rectas se cortan o no, lo que atenta contra el carácter intuitivo del axioma.

II.b. La historia del V postulado de Euclides a Saccheri

Los matemáticos de épocas posteriores asumieron los postulados y axiomas como verdades incuestionables, y como los teoremas se derivan deductivamente de aquellos, todo el

edificio euclidiano adquirió la reputación de inquebrantable. El único problema era la falta de autoevidencia del V postulado, lo que produjo severas dudas, no sobre su verdad, sino sobre su status axiomático.

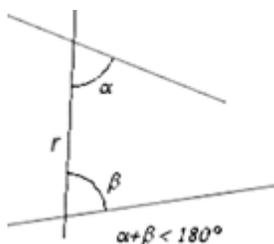


Figura 1.

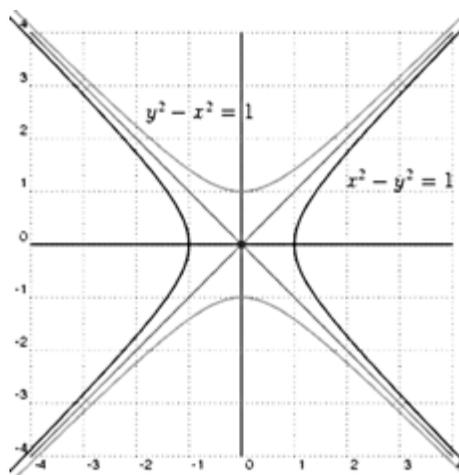


Figura 2.

Por ejemplo, Proclo (410/412-485 d.C.), el matemático bizantino al que se deben las pocas noticias que tenemos sobre Euclides y los primeros comentarios sobre los «Elementos», afirma en su obra *Comentario al Libro I de los 'Elementos' de Euclides* que

«la afirmación de que puesto que cuando las rectas son prolongadas más y más, alguna vez se cortarán parece plausible pero no necesaria. Por esto, es claro que debemos dar una prueba de este teorema, que es ajeno al carácter especial de los postulados».

La conclusión de Proclo es que «debe ser borrado por completo de los postulados porque se trata de un teorema henchido de dificultades» (en Hernández Paricio, 2003: 1).

Un ejemplo de Proclo es la existencia de algunas líneas que se aproximan indefinidamente sin nunca encontrarse. Tal es el caso de las ramas de la hipérbola y sus asíntotas, que pueden aproximarse tanto como se quiera, pero que nunca llegan a cortarse. ¿Por qué tendrían que cortarse las dos rectas en el caso del V postulado? «A partir de esto es claro que debemos encontrar una prueba del presente teorema y que es ajeno al carácter especial de los postulados» (en Hernández Paricio, 2003: 1).

Estos reparos sobre la independencia del V postulado produjeron a lo largo de los siglos una profusa serie de intentos de deducirlo a partir de los demás postulados. El objetivo de los matemáticos que enfrentaron tal cuestión era demostrar que no se trata en realidad de un postulado sino más bien de un teorema. Aquellos que juzgaron inalcanzable ese propósito, pretendieron encontrar alguna formulación equivalente al V postulado pero que gozara de mayor evidencia intuitiva. A pesar de la cantidad y calidad de los matemáticos que derrocharon esfuerzos en el problema, no se alcanzó otro resultado que el descubrimiento de que el V postulado tenía una vasta familia de proposiciones equivalentes⁶, que por otra parte no resultaban más aceptables que el original desde el punto de vista de la autoevidencia.

Una primera tendencia, que surgió con Posidonio (135-41 a. C.), fue modificar la definición de rectas paralelas a fin de encontrar una formulación más evidente. En Euclides las

6 Señalemos que dos postulados se dicen equivalentes cuando es posible deducir exactamente los mismos teoremas a partir de la conjunción de cada uno de ellos con el resto de los postulados.

rectas paralelas son aquellas que, estando en el mismo plano, no se encuentran al prolongarse indefinidamente. Posidonio redefine la paralela a una recta dada como el lugar geométrico de todos los puntos equidistantes a la misma. Este tipo de intentos resultaron infructíferos, dado que la dificultad inicial solo es desplazada. En este caso, se debería probar que ese conjunto de puntos forma efectivamente una recta, y esto no se puede demostrar a partir de los primeros cuatro postulados, por lo que hay que establecerlo como postulado independiente, con lo cual nada se gana.

El primer intento de demostrar que era un teorema fue hecho por el famoso astrónomo Claudio Ptolomeo (85-165 d. C.), quien trató de deducir el V postulado a partir de los demás postulados, de las nociones comunes y de algunos teoremas que no dependen del mismo. Sin embargo, Ptolomeo asumió sin darse cuenta que si una recta cruza a dos paralelas entonces lo que sea válido para los ángulos internos de un lado de la secante vale para los ángulos internos del otro lado de la secante. También Proclo intentó dar una prueba del V postulado pero no pudo evitar basarse siempre en algún otro postulado, con lo que simplemente sustituyó uno por otro. Entre los postulados equivalentes hallados por Proclo están: (a) si una recta encuentra a una de dos paralelas, encuentra necesariamente a la otra, (b) dos rectas paralelas a una tercera son paralelas entre sí⁷.

Entre los árabes hubo muchos matemáticos que trataron el problema de las paralelas. Podemos mencionar el caso de Alhazen (965-1039), quien intentó demostrarlo argumentando que si un cuadrilátero tiene tres ángulos rectos también debe ser recto el cuarto. El problema de su demostración es que, al igual que Posidonio, supuso que el lugar geométrico de los puntos equidistantes a una recta constituía una nueva recta. Y esta simple afirmación de que existen dos rectas equidistantes es equivalente al V postulado. Por otro lado, la propiedad que afirma que en un cuadrilátero trirectángulo el cuarto ángulo debe ser recto, es también equivalente al V postulado. Omar Khayyam (1050-1123) estudió cuadriláteros birrectángulos con dos lados paralelos congruentes y probó que los ángulos superiores del cuadrilátero debían ser congruentes. Luego negó la posibilidad de que estos ángulos fueran agudos u obtusos a partir del argumento de que la distancia entre rectas paralelas ni se expande ni se contrae. Lo más importante de estos dos trabajos no es tanto los resultados alcanzados sino el planteamiento. Los dos cuadriláteros utilizados tendrán un papel central en los trabajos de Saccheri y Lambert, que representan el puntapié inicial de la revolución de las geometrías no euclidianas.

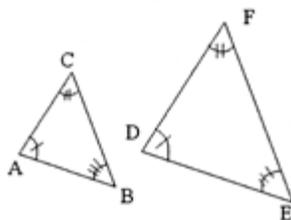


Figura 3.

En 1663 el matemático inglés John Wallis (1616-1703) propuso un axioma equivalente al V de Euclides pero con mayor carga de autoevidencia, según su consideración. Podemos

7 También se atribuye a Proclo la forma más conocida del postulado, que se llama axioma de Playfair y será mencionado más adelante.

formularlo de la siguiente manera: dado un triángulo ABC cualquiera y dado un segmento DE finito, existe siempre un triángulo DEF que es semejante a ABC —pero no congruente con él— de magnitud arbitraria. Wallis demuestra que este postulado es equivalente al V de Euclides⁸. La idea intuitiva es que es posible expandir o contraer un triángulo sin alterar las proporciones, al no ser afectados los valores de los ángulos. Por otra parte, esta formulación resulta la más próxima al pensamiento de Euclides pues funciona como una continuación del postulado III, que afirma la existencia de circunferencias semejantes. Sin embargo, la mayor plausibilidad que Wallis pretende para su postulado no es sostenible, pues involucra la noción de infinito, que es la que generaba los mayores problemas en la interpretación del V postulado. La versión más famosa y comúnmente utilizada en la actualidad, al punto que se la suele presentar como «el V postulado de Euclides», es la que se atribuye al matemático escocés John Playfair (1748-1818). En 1795 Playfair escribió un famoso comentario a Euclides en sus «*Elements of Geometry*» en el que se proponía reemplazar el V postulado por este otro: *por un punto exterior a una recta se puede trazar una y sólo una paralela a dicha recta* (Playfair, 1860).

Todos estos intentos de demostrar el V postulado no dieron otro resultado que su transformación en versiones equivalentes, aunque, en ciertos casos, con apariencia muy distinta a la original. Invariablemente, el error de todos estos matemáticos fue suponer implícita o explícitamente alguna propiedad que les parecía obvia pero que resultó ser equivalente al V postulado. Esto no se debe de ninguna manera a incapacidad ni ingenuidad por parte de tales autores. Quienes hicieron aquella suposición explícitamente respondían a una concepción de los postulados según la cual estos expresan propiedades intuitivas del espacio real. Aquellos que lo hicieron inadvertidamente fueron víctimas de la ausencia de una lógica rigurosa que permitiera distinguir claramente una derivación estrictamente lógica de una que apelara a componentes extralógicos basados en la intuición.

II.c. La historia del V postulado de Saccheri a Gauss

Las tentativas reseñadas tenían como propósito demostrar directamente que el V postulado se derivaba de los otros cuatro. A partir del trabajo del jesuita italiano Girolamo Saccheri (1667-1733) se produce un quiebre en la forma en que los matemáticos empiezan a afrontar el problema. Saccheri intentó probarlo de una forma indirecta, utilizando la forma argumental conocida en lógica como *reducción al absurdo*, y que consiste básicamente en asumir la negación de la tesis a probar e intentar derivar una contradicción a partir de la tesis negada, lo cual indicaría que la tesis es correcta. En nuestro caso la idea sería asumir los primeros cuatro postulados y la negación del V, e intentar derivar una contradicción, lo cual mostraría que el V postulado se sigue como teorema de los otros cuatro. En otro caso un simple cambio de procedimiento no tendría mayor importancia, pero en este va a resultar clave.

Poco antes de morir —en el año 1733— Saccheri publicó un libro titulado *Euclides ab omni naevo vindicatus* —Euclides vindicado de todo error— (Saccheri, 1920), en el cual desarrolla esta nueva estrategia. Para ello parte de un cuadrilátero similar al estudiado por Omar Khayyam, y que se conoce como *cuadrilátero de Saccheri*.

8 Esta equivalencia resultará más evidente más adelante, cuando veamos como esa proposición no se sostiene en ninguna de las geometrías no euclidianas.

9 Utilizaremos esta formulación del postulado para desarrollar sus variantes no euclidianas.

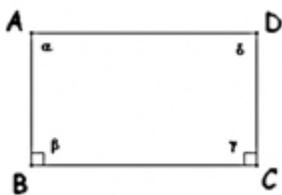


Figura 4.

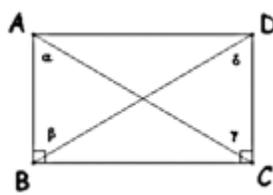


Figura 5.

En la figura suponemos que los lados AB y CD son iguales, y que los ángulos β y γ son rectos. La pregunta que se plantea Saccheri es qué sucede con los ángulos α y δ . Es bien fácil probar que son iguales y Saccheri lo hace usando las propiedades de triángulos congruentes, probadas por Euclides en las proposiciones 4 y 8, antes de que el V postulado fuera utilizado por primera vez (proposición I, 29). En primer lugar se demuestra que el triángulo ABC es congruente con el BCD , lo cual queda garantizado porque tienen dos lados iguales y el ángulo comprendido por ellos igual: $AB = CD$ (por hipótesis), $BC = BC$, $\beta = \gamma$ (por hipótesis).

De aquí se sigue que las diagonales AC y BD son iguales. Esto nos permite demostrar que los triángulos DAB y CDA también son congruentes pues sus tres lados son iguales: $AC = BD$ (demostración anterior), $AB = CD$ (por hipótesis), $AD = AD$. De esto se sigue que los ángulos α y δ son iguales.

Ahora bien, se presentan tres posibilidades respecto de esos dos ángulos: que sean *rectos*, *obtusos* o *agudos* (las llamaremos respectivamente hipótesis del ángulo recto, obtuso o agudo). Saccheri muestra que la hipótesis de que son rectos es equivalente a esta otra: *la suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos rectos*. Esto es así porque si los dos ángulos fueran rectos la suma de los ángulos del cuadrilátero sería 360° ($90 \cdot 4$), y todo cuadrilátero puede descomponerse en dos triángulos, por lo que sus ángulos sumarían 180° ($360 / 2$). Y este resultado es equivalente al V postulado. Veámoslo.

Directo: si el V postulado es verdadero entonces el de los ángulos del triángulo también.

Prueba (proposición I, 32 de los *Elementos*): en la figura de abajo, si α y β miden menos de 180° , entonces las rectas r y s se cortan en un punto P , formando un triángulo cuyo tercer ángulo es γ . Si trazamos una paralela a la secante t que pase por P , entonces por la propiedad de los ángulos alternos internos (proposición I, 27), $\alpha = \delta$ y $\beta = \epsilon$. Y dado que δ , γ y ϵ son suplementarios, suman 180° , por lo que también α , β y γ suman 180° .

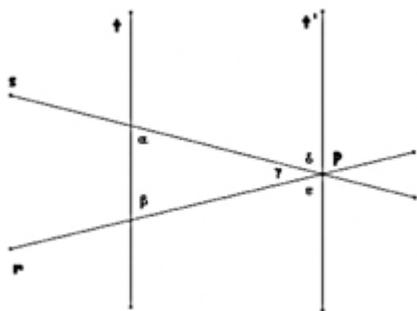


Figura 6.

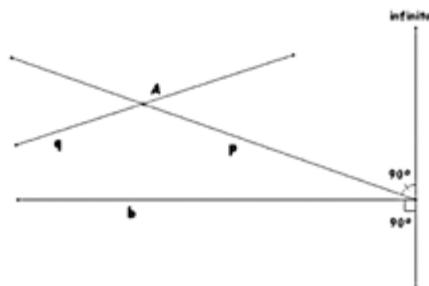


Figura 7.

Recíproco: si el postulado de los ángulos del triángulo es verdadero entonces el V de Euclides también lo es.

Prueba: construimos un triángulo cualquiera, como el formado por las rectas r , s y t . Como la suma de los ángulos de todo triángulo suma 180° entonces los ángulos α y β sumarán siempre menos de 180° . Y si prolongamos las rectas r y s que forman esos ángulos siempre se encontrarán en algún punto P , que resulta ser el tercer vértice del triángulo. De esta manera las rectas r y s siempre se intersecarán del lado en el cual forman ángulos menores que 180° con la secante t . Por lo tanto, la hipótesis de los ángulos rectos es equivalente al V postulado de Euclides y a partir de la misma y los demás postulados obtenemos la geometría euclidiana. Pero ¿qué pasa con las otras dos posibilidades? Saccheri intenta reducir al absurdo a las hipótesis de los ángulos obtuso y agudo, que equivalen a los casos en los cuales la suma de los ángulos de todo triángulo es mayor o menor que dos rectos, respectivamente. En primer lugar, asumió la *hipótesis del ángulo obtuso* y derivó un teorema según el cual ciertas rectas debían ser finitas, lo que es absurdo, pues se opone al postulado II. En segundo lugar, intentó hacer la misma *reductio ad absurdum* con la *hipótesis de los ángulos agudos* y llegó a resultados que consideró contradictorios con la naturaleza de las rectas. Por lo tanto, concluyó que la única hipótesis posible era que los ángulos eran *rectos*, y al ser esta equivalente al V postulado, lo dio por demostrado.

Sin embargo, la «contradicción» que encontró en la hipótesis de los ángulos agudos no era tan clara y se refería más bien a la naturaleza de las rectas. Saccheri apelaba más a la idea sobre lo que una recta debía ser que a una auténtica inconsistencia lógica. En determinado momento de la argumentación Saccheri llegó al siguiente teorema:

dato cualquier punto A y una recta b , existe en el haz de rectas que pasan por A dos rectas p y q que dividen el haz en dos partes. La primera de ellas consiste en las líneas que intersecan a b y la segunda la forman las líneas (que forman un ángulo α) que tienen una perpendicular común con b en algún sitio a lo largo de b . Las rectas p y q son asintóticas a b .

Saccheri dedujo que p y b tendrían una perpendicular común en su punto común, que está en el infinito. Es esto lo que Saccheri consideró que no correspondía a la naturaleza de las rectas. Para decirlo con sus palabras: «La hipótesis del ángulo agudo es absolutamente falsa, porque repugna a la naturaleza de la línea recta», pues en tal caso «una oblicua y una perpendicular [a la recta b] tendrían una perpendicular común en un punto común en el infinito»¹⁰ (Saccheri, 1920, 15)¹¹.

¿Qué quiere decir matemáticamente que algo es repugnante? O bien ¿cuál es la naturaleza de las rectas? Saccheri llegó a un formidable resultado pero no pudo obtener las conclusiones adecuadas debido al marco intelectual en el cual estaba inmerso. La «contradicción» a la que le condujo la hipótesis del ángulo agudo *no era lógica sino ideológica*. Para Saccheri la geometría euclidiana era necesariamente verdadera y describía el mundo que nos rodea, no encontrar una contradicción hubiera significado dar con una geometría que viola nuestra percepción de la realidad, lo que era impensable. Solo un arraigado prejuicio a favor de la geometría euclidiana pudo hacerle reconocer una demostración tan poco matemática. Pero lo más increíble del caso es que logró derivar varios teoremas de las geometrías no euclidianas sin siquiera darse

10 Como b y p son asintóticas deben tener un punto común en el infinito, que se llama punto impropio, pero como son paralelas, la recta del infinito resulta perpendicular a ambas, generando el resultado que Saccheri considera absurdo.

11 Traducción propia.

cuenta. Esta situación empieza a sugerirnos que la cuestión se resolvería más con un *espíritu revolucionario* que con genio matemático.

El problema de las paralelas siguió abierto durante muchos años más. Tal era la trascendencia del problema que en 1755 D' Alembert afirma que «la definición y las propiedades de la línea recta, así como de las líneas paralelas son por así decir el escándalo de los elementos de geometría» (en Bonola, 1955: 52). El matemático alemán Georg Klügel (1739-1812) observó en una disertación de 1763 que los resultados de Saccheri estaban equivocados, que la supuesta contradicción a la que había llegado no era tal, sino que eran simplemente resultados que no se correspondían con la experiencia. Por su parte expresó sus dudas acerca de la posibilidad de encontrar una demostración satisfactoria del V postulado. La visión de Klügel representa un doble avance, por un lado se abre la posibilidad de reconocer la *independencia* del V postulado, por el otro, empieza a resultar problemática la *relación entre la geometría y la realidad*.

Por su parte, el matemático suizo Johann Lambert (1728-1777), en *La teoría de las paralelas*, escrito en 1766 y probablemente influenciado por Klügel, realizó un trabajo similar al de Saccheri. Consideró un cuadrilátero con tres ángulos rectos y consideró las tres posibilidades respecto del cuarto ángulo.

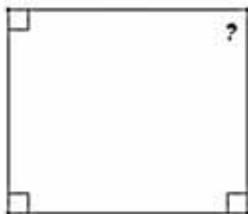


Figura 8.

Señaló que la hipótesis del ángulo obtuso se contradice con el postulado de Arquímedes, por lo que debe ser falsa. Respecto de la hipótesis del ángulo agudo no llegó a ninguna contradicción, por el contrario, descubrió nuevas propiedades de la geometría no euclidiana. Por ejemplo, que el área de un triángulo es proporcional a su defecto, es decir, la diferencia entre dos rectos y la suma de sus ángulos interiores. Esto quiere decir que al decrecer el área la suma de los ángulos se aproxima a dos rectos, mientras que al crecer aquella esta suma será tan pequeña como deseemos. También conjeturó que la hipótesis del ángulo agudo se podría verificar sobre una esfera de radio imaginario. Estos resultados abren una nueva puerta en la interpretación de la geometría: quizás una geometría pueda ser válida mientras mantenga su consistencia lógica, aunque no se corresponda con la realidad.

Tanto Saccheri como Lambert obtuvieron varios teoremas de la geometría no euclidiana, si hubieran considerado que esta geometría era perfectamente legítima hubieran sido saludados como los descubridores de la geometría no euclidiana. Pero no pudieron hacerlo. La razón de más peso era la concepción predominante en el siglo XVIII de que todo sistema geométrico que no estuviera de acuerdo con el de Euclides era prácticamente una herejía matemática. De hecho, todos los filósofos modernos desde Descartes hasta Kant, pasando por Hobbes, Spinoza, Locke y Hume, vieron a la geometría euclidiana como el paradigma de la certeza epistémica.

III. El nacimiento de las geometrías no euclidianas

III.a. El problema de la prioridad

A partir de las investigaciones de los matemáticos del siglo XVIII sobre el problema del V postulado, algunos fueron llegando al convencimiento de que nunca podría demostrarse y que por tanto se trataba de un verdadero postulado, no un teorema. Esto abrió las puertas al surgimiento de las geometrías no euclidianas, una revolución matemática que se fue gestando en los trabajos de varios matemáticos a lo largo de muchos años. Sin embargo, lo más importante era dar el *salto conceptual* de un *paradigma matemático* a otro, y esto muy pocos fueron capaces de hacerlo. Son tres grandes matemáticos de comienzos del siglo XIX los que recibirán el crédito, aunque en diferentes medidas. Nos referimos al alemán Carl Friedrich Gauss (1777-1855), el húngaro Janos Bolyai (1802-1860) y el ruso Nikolai Ivanovich Lobachevsky (1793-1856). Los tres llegaron de forma relativamente independiente a la misma conclusión: el V postulado no puede demostrarse sobre la base de los demás y por tanto es necesario para fundamentar la geometría euclidiana. Y si es un postulado independiente, se justifica lógicamente la adopción de otro postulado contrario con el fin de deducir una geometría diferente a la euclidiana, una geometría *no euclidiana*. En esta etapa primigenia de la revolución se entenderá por geometría no euclidiana una que conserve todos los postulados de Euclides menos el de las paralelas, el cual es sustituido por su negación.

Un punto debatido es el referente al establecimiento de los méritos relativos de cada uno de estos matemáticos, la determinación del auténtico padre fundador de la nueva geometría. Este es el problema de la prioridad. Cronológicamente hablando fue Gauss el primero en llegar a aquellos resultados, pero como ya había sido coronado de fama por otras investigaciones, temió que la presentación de una teoría tan revolucionaria le acarrearía problemas. A pesar de que vio la importancia del descubrimiento y siempre alentó a quienes lo proseguían, se negó a publicar sus trabajos. «Pasará tiempo antes de que yo elabore para conocimiento público mis extensas investigaciones, y quizás esto no llegue a ocurrir durante mi vida, pues temo el griterío de los beocios, si alguna vez me propusiera exponer mi criterio» (en una famosa carta a Bessel de 1829). Lobachevsky comienza a trabajar en el problema de las paralelas a mediados de la segunda década del siglo XIX, sus primeros trabajos datan de 1826 y se desarrollan en sus obras entre 1830 y 1840. La investigación de Bolyai empieza alrededor de 1823 pero recién se publican sus resultados en 1832, y se cuenta que al leerlo Gauss, escribió al padre de Janos diciéndole que no podía aplaudir ese trabajo porque sería como aplaudir su propio trabajo.

Históricamente la revolución de las geometrías no euclidianas se asocia más que nada con Lobachevsky, pues fue el primero en publicar una nueva geometría, y como vimos muchos estuvieron muy cerca de conseguirlo pero por una razón u otra no pudieron dar el paso decisivo. Este acto de talento y valentía intelectual por parte del ruso le hizo merecedor del título de *padre de la geometría no euclidiana*. Consideramos que este título es justo: frente a los matemáticos del siglo XVIII por ser conciente de lo que hacía, frente a Gauss por haber tenido el valor de publicarlo, y frente a Bolyai por haberlo hecho primero. En las siguientes secciones analizaremos las principales líneas directrices de los trabajos de estos tres autores, que revolucionarían nuestra comprensión de la geometría y la matemática toda.

III.b. Carl Friedrich Gauss

Sin lugar a dudas, Gauss es uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos, produjo resultados del más alto nivel en casi todos los campos de las matemáticas puras y aplicadas, haciéndose merecedor del título de *Príncipe de los matemáticos*. De acuerdo con sus notas, fue el primero en darse cuenta de que el V postulado era necesariamente independiente y que su negación no llevaba a ninguna contradicción, sino que por el contrario, podía construirse una nueva geometría a partir de la conjunción de su negación con los demás postulados. Al leer el trabajo de Janos Bolyai, escribe que hacía 40 años que venía estudiando el tema de las paralelas y que proyectaba desarrollar una geometría no euclidiana. De hecho, sus trabajos en el tema comenzaron en 1792, cuando contaba con solo 15 años, desde entonces pasó varios años tratando de deducir el V postulado. En 1799 escribió a su amigo, el también matemático Farkas Bolyai (padre de Janos), sosteniendo que no era posible deducir el V postulado de los otros postulados euclidianos. «He hecho algunos progresos en mi trabajo. Sin embargo el camino que he escogido no lleva al objetivo que busco. [...] Parece por el contrario llevarme a dudar de la verdad de la geometría misma» (en Bonola, 1955: 65). Hacia 1813 había hecho muy poco progreso y escribe «en la teoría de las paralelas no estamos lejos de Euclides. Esta es una parte vergonzosa de las matemáticas» (en Waldo Dunnington, 1955: 462)¹². A partir de entonces, convencido de que el V postulado era independiente de los otros, comenzó a sacar las consecuencias de una geometría en la cual puede pasar más de una paralela por un punto exterior a una recta. Hacia 1931 había concluido su geometría no euclidiana expresando su convicción de que prescindir del V postulado no lleva a contradicción aunque resulte en consecuencias paradójicas. La nueva geometría fue llamada primero anti-euclidiana (1816), luego astral (1819), porque Gauss supuso que sería válida con magnitudes estelares, y finalmente no euclidiana (1831).

Al igual que la mayoría de los matemáticos modernos, Gauss asumía que la geometría debía aplicarse a la experiencia, por lo que intentó comprobar empíricamente sus resultados no euclidianos. Como vimos, el V postulado es equivalente a la afirmación de que la suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos rectos. Basado en este resultado Gauss realizó medidas de los ángulos de triángulos con lados enormes, por ejemplo, midió los ángulos del triángulo formado por tres montañas —Hohenhagen, Brocken e Inselsberg— para demostrar que esta suma era superior a los 180 grados. El resultado que obtuvo fue $179^{\circ} 59' 58''$. No pudo concluir nada porque el margen de error era mayor que 2", siempre quedaba la duda sobre si la verdadera suma difiere de dos rectos en una cantidad no apreciable por la precisión de los instrumentos de medida. A pesar de esto, es realmente importante su afirmación de que la geometría no euclidiana era no solamente válida en términos lógicos sino que podía explicar o describir partes de nuestra realidad.

III.c. Janos Bolyai

Janos Bolyai era hijo del también matemático Farkas Bolyai¹³ (1775-1856), quien dedicó largos años de su vida al problema de demostrar el V postulado, analizándolo varias veces

¹² Traducción propia.

¹³ En la forma alemana los nombres de padre e hijo son Wolfgang Bolyai y Johann Bolyai, mientras que en la forma húngara el nombre sigue al apellido: Bolyai Farkas y Bolyai Janos. Nosotros adoptamos la versión más conocida de los mismos.

con su amigo Gauss. Farkas enseñó a matemáticas a su hijo Janos pero le advirtió seriamente que no se interesara por este problema.

Sin embargo, Janos no atendió a los ruegos de su padre y comenzó a trabajar en el tema, llegando a convencerse en 1823 que a partir de la negación del V postulado podía crear un sistema geométrico coherente. En una carta a su padre de ese año escribe:

He resuelto publicar un trabajo sobre la teoría de las paralelas, tan pronto como pueda ordenar el material y las circunstancias lo permitan. No he completado aun este trabajo, pero el camino que he seguido me ha dado la certeza de que el objetivo será alcanzado. [...] He descubierto cosas tan maravillosas que quedé atónito... de la nada he creado un nuevo y extraño mundo (en Bonola, 1955: 98).¹⁴

Entonces Farkas pidió a su hijo que le permitiera publicar su trabajo como apéndice a un libro que estaba escribiendo y que se llamaría *Intento de introducir a la juventud estudiosa en los elementos de Matemáticas Puras*. La obra maestra de Janos fue publicada en 1832 como apéndice de aquella bajo el nombre *Ciencia absoluta del espacio* (Bolyai, 1955). Cuando Farkas envió el apéndice a su amigo Gauss, este reconoció que Janos era un genio, pero que no quería alabarlos demasiado pues él mismo había realizado idéntico trabajo muchos años antes. Ante esta reacción de Gauss, y sobre todo al enterarse más tarde que Lobachevsky había publicado un trabajo similar unos años antes que el suyo, abandonó completamente el tema.

Junto al ruso, Janos Bolyai fue el primero en construir un sistema geométrico completo en el cual el V postulado no se verifica. El primer paso de Bolyai consistió en distinguir las proposiciones geométricas que necesitan el V postulado para su verificación de aquellas que son independientes del mismo. A estas las llama *absolutas* o *absolutamente verdaderas*, y la geometría que se refiere a esas propiedades la llama *geometría absoluta*. Lo de «absoluto» tiene que ver con la independencia de esa geometría respecto de toda decisión que tomemos sobre el problemático V postulado, es válida para geometrías euclidianas o no euclidianas. La geometría absoluta puede ser especificada añadiendo el V postulado o su negación, y esto último es lo que hizo Bolyai, derivando una geometría no euclidiana.

III.d. Nikolai Ivanovich Lobachevsky

Lobachevsky nació en la actual Gorka (Rusia), estudió en la Universidad de Kazán, se recibió en 1811, fue profesor desde 1816 y rector entre 1827 y 1846. Ya en 1915 estaba trabajando en el problema de las paralelas, pero recién en 1923 concibió la idea de una geometría no euclidiana. Al igual que Bolyai, realizó la distinción entre la geometría absoluta y las geometrías que adoptan alguna versión del V postulado. Entonces probó sustituirlo por su negación, supuso que a través de un punto exterior a una recta dada puede pasar más de una paralela. Advirtió que no se obtiene una contradicción formal y el sistema de deducción se conforma en una nueva geometría diferente de la euclideana, rigurosa y consecuente a pesar de lo extraño de sus teoremas. El 12 de febrero de 1826 informó sus investigaciones a la sección matemática de la Universidad de Kazán en la exposición *Breve exposición de los fundamentos de la geometría con una demostración lógica del teorema de las paralelas*. Este manuscrito, que se ha perdido, es considerado el primer trabajo publicado sobre geometrías no euclidianas, y el que le daría la paternidad sobre el descubrimiento. En los años siguientes desarrollaría sus puntos de vista en *Sobre los elementos de geometría* (1829), *Geometría imaginaria* (1835), *Nuevos elementos de la geometría con una teoría completa de*

14 Traducción propia.

las paralelas (1838) e *Investigaciones geométricas sobre la teoría de las paralelas* (1840), en alemán (Lobachevsky, 2007). Finalmente, en 1855 presenta la visión final y más completa de su concepción en *Pangeometría. Geometría fundada sobre una teoría general y rigurosa de las paralelas*. La geometría lobachevskiana fue llamada primero *geometría imaginaria* porque parecía que esta teoría no podía tener ninguna representación real, a pesar de su importancia matemática, y finalmente *pangeometría*.

En la geometría de Lobachevsky por un punto exterior a una recta pasa un número infinito de rectas paralelas a la dada. Esto se deriva de la hipótesis del ángulo agudo de Saccheri. Así desarrolló una doctrina lógicamente impecable en la que se llegaba a resultados que parecen extraños pues no son válidos en el plano euclidiano que nos es familiar. Por ejemplo, la suma de los ángulos interiores de un triángulo es menor a dos rectos, no puede haber triángulos como un área tan grande como se quiera, la circunferencia no vale $2\pi r$, no vale el teorema de Pitágoras, etcétera. A pesar de esto, algunos teoremas euclidianos también valían en la geometría de Lobachevsky, como la igualdad de los ángulos opuestos por el vértice y la de los de la base de los triángulos isósceles. Más adelante desarrolló muchas identidades trigonométricas para triángulos, mostrando que cuanto más pequeño era el triángulo las identidades tendían a las trigonométricas usuales. Esta geometría era equivalente a la desarrollada por Bolyai, y constituiría uno de los tipos de geometrías no euclidianas, que se llamaría hiperbólica.

También Lobachevsky veía a las matemáticas como reflejo de las relaciones existentes entre los objetos del mundo real. Por eso consideraba importante testear la validez de su geometría, y como había deducido que a pequeña escala los resultados coincidían con la geometría euclidiana, lo hizo calculando la suma de los ángulos internos de los triángulos formados por estrellas. Sin embargo, al igual que le pasara a Gauss, no obtuvo resultados concluyentes en ningún sentido. Lo que estaba claro para ellos es que en último término la experiencia decidiría cual es la geometría válida.

Si bien desde un punto de vista retrospectivo el nacimiento de la geometría no euclidiana constituyó una auténtica revolución en las matemáticas de la época, su influencia en la comunidad matemática de su tiempo no fue inmediata. Como Gauss no publicó sus resultados, la nueva geometría provenía de dos países que hasta el momento no habían contribuido al desarrollo de las matemáticas —Hungria y Rusia— y que carecían de importancia en la comunidad científica europea. El trabajo de Lobachevsky había sido publicado en ruso y en una revista local de la universidad de Kazán, siendo incluso rechazado por Ostrogradsky, la máxima autoridad rusa al respecto. Recién en 1837 se traduciría al francés y en 1840 al alemán, pero la comunidad matemática no estaba preparada para aceptar ideas tan revolucionarias. Lobachevsky murió en 1856 todavía incomprendido y muy lejos de ser reconocido. El año anterior moría Gauss, tras lo cual se publicaron sus trabajos incluyendo notas y correspondencias desconocidas respecto de la geometría no euclidiana. Esto hizo que a partir de los 60's la comunidad comenzara a ponerle atención al tema y a tomar conciencia de la trascendencia del descubrimiento.

Un problema fundamental que Lobachevsky no pudo resolver es el de la fundamentación de la nueva geometría, solo intentó encontrar modelos empíricos en los cuales su geometría se realizara. Tenemos que esperar a los trabajos de Beltrami para obtener esta prueba de consistencia que despejaría el camino para las geometrías no euclidianas hacia el reconocimiento pleno.

IV. Geometría hiperbólica y elíptica

IV.a. Diferentes geometrías no euclidianas: hiperbólica y elíptica¹⁵

Imaginemos una recta r y un punto P exterior a ella, existen tres casos posibles: (a) por P pasa una sola recta que no corta a r : *pasa una sola paralela*, (b) toda recta que pasa por P corta a r : *no pasa ninguna paralela*, (c) las rectas que pasan por P y están comprendidas en determinado ángulo no cortan a r : *pasan dos paralelas e infinitas no secantes*. El caso (a) corresponde a la *geometría euclidiana* mientras que los casos (b) y (c) corresponden a las geometrías no euclidianas llamadas, respectivamente, *elíptica* e *hiperbólica*. Por lo tanto, a partir del V postulado de Euclides y sus dos negaciones posibles obtenemos tres tipos distintos de geometrías. Dado un punto de la geometría hiperbólica, si trasladamos el plano tangente al punto paralelamente hacia la superficie, la corta formando una *hipérbola*. Si tomamos un punto de la geometría elíptica y trasladamos el plano tangente en el punto paralelamente hacia la superficie la corta formando una *elipse*.

Junto a la parábola, la elipse y la hipérbola son los tres tipos de cónicas que existen en la geometría (la circunferencia es un tipo de elipse). La elipse es el lugar geométrico de los puntos del plano tales que la suma de sus distancias r_1 y r_2 a dos puntos fijos F_1 y F_2 , llamados focos, es constante.

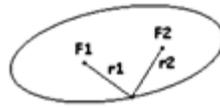


Figura 9.

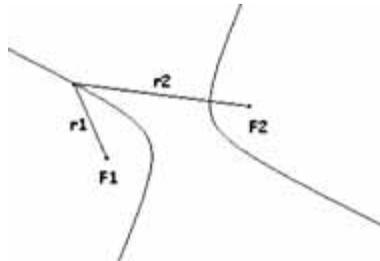


Figura 10.

La hipérbola es el lugar geométrico de los puntos del plano tales que el valor absoluto de la diferencia $r_1 - r_2$ (siendo r_1 y r_2 las distancias a los focos F_1 y F_2 respectivamente) es igual a una constante prefijada.

La parábola es el lugar geométrico de los puntos del plano para los que la distancia r a un punto fijo F es igual a la distancia a una recta dada l .

Las figuras que corresponden a las cónicas en tres dimensiones son las cuádricas: el elipsoide (incluye la esfera), el hiperboloide y el paraboloides.

¹⁵ En griego «elipse» significa «exceso» e hipérbola significa «defecto», de allí sus nombres, pues en la geometría elíptica los ángulos de un triángulo experimentan un exceso respecto de los dos rectos y en la hiperbólica un defecto.

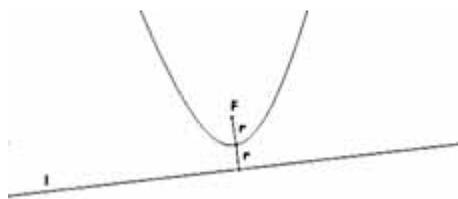


Figura 11.

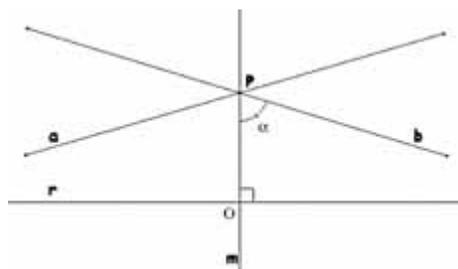


Figura 12.

IV.b. Geometría hiperbólica

Históricamente, el primer modelo de geometría no euclidiana fue el desarrollado por Gauss, Lobachevsky y Bolyai, el cual fue conocido como geometría lobachevskiana pero fue llamado más adelante por el matemático alemán Félix Klein *geometría hiperbólica*. Estas geometrías correspondían a la *hipótesis del ángulo agudo* de Saccheri, y se obtienen a partir de la sustitución del V postulado de Euclides por el siguiente: *por un punto exterior a una recta pasan dos paralelas, que separan las infinitas rectas no secantes de las infinitas secantes*. Supongamos que tenemos una recta r y un punto P exterior a la misma. En la geometría hiperbólica la suposición de que por P pasa más de una paralela a r , lleva a la conclusión de que hay un número infinito de tales rectas paralelas. Esas infinitas paralelas constituyen un haz, cuyas dos rectas extremas son a y b (ver Fig 12). Gauss, Lobachevsky y Bolyai llaman paralelas a esas dos rectas. A las infinitas rectas que quedan comprendidas entre a y b no las llaman paralelas, sino simplemente rectas que no intersecan a r , aunque en el sentido de Euclides éstas son paralelas a r (no la cortan), y en este sentido, en la geometría hiperbólica pasa un número infinito de paralelas a r por P . También se llama a las rectas extremas *hiperparalelas*, y a las infinitas rectas intermedias *ultraparalelas* o disjuntamente paralelas, y aquí adoptaremos esta terminología¹⁶. Todas las rectas ultraparalelas resultan ser «asintóticas» a r pues se acercan infinitamente a ella sin nunca cortarla. Así, tenemos esta forma modificada del postulado de las paralelas para la geometría hiperbólica: *por un punto P exterior a una recta r pasan exactamente dos rectas hiperparalelas a r , e infinitas rectas ultraparalelas a r .*

Si llamamos m a la perpendicular a r que pasa por P , el ángulo α que forma con las rectas hiperparalelas se llama *ángulo de paralelismo* para el segmento que va de r a P (OP). El ángulo de paralelismo en la geometría euclidiana es una constante, siempre vale 90° , mientras que en la geometría hiperbólica es un ángulo agudo que varía desde 0 hasta 90° .¹⁷

¹⁶ Otros autores, como Eves (1985), llaman paralelas a las extremas e hiperparalelas a las infinitas interiores.

¹⁷ Nótese que en el caso extremo en el cual el ángulo de paralelismo mide 90° la geometría hiperbólica coincide con la euclidiana, siendo entonces esta un caso particular de aquella.

Una función, descrita por Lobachevsky, atribuye un único ángulo de paralelismo para cada longitud del segmento OP. El ángulo de paralelismo tiende a 90° al disminuir la longitud de OP, mientras que al incrementarse esta aquel se acerca a 0, para OP infinito es 0. Debido a esta razón, al hacerse más pequeñas las distancias, el plano hiperbólico se comporta de forma cada vez más similar al plano euclidiano. Por lo tanto, a pequeñas escalas, un observador en el plano hiperbólico tendrá dificultades para darse cuenta de que la geometría del mismo no es euclidiana.

Ya mencionamos que una de las consecuencias fundamentales del abandono del V postulado de Euclides tiene que ver con los ángulos internos de los triángulos. En la geometría euclidiana la suma de los ángulos de cualquier triángulo es siempre 180° . Por el contrario, en la geometría hiperbólica esta suma es siempre menor de 180° . Ya Lambert había notado que la diferencia (es decir, lo que le falta a la suma de los ángulos para alcanzar los dos rectos) era proporcional al área del triángulo. Al disminuir dicha área la suma de los ángulos se acerca a 180° , mientras que al aumentar el área la suma se aleja de 180° . En geometría euclidiana dos triángulos son semejantes cuando tienen ángulos iguales y lados proporcionales. Por lo tanto puede haber triángulos semejantes con lados distintos, y en consecuencia, con diferentes áreas. En geometría hiperbólica, como una diferencia de área implica una diferencia de ángulos, no puede haber triángulos semejantes a menos que sean congruentes.

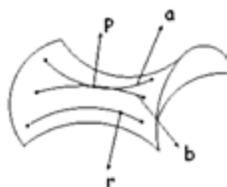


Figura 13.



Figura 14.

A partir de los trabajos de Riemann y Beltrami¹⁸ se caracteriza la geometría hiperbólica como la geometría que se aplica a las superficies de *curvatura constante negativa*. La imagen más clásica de un objeto con curvatura constante negativa es el *paraboloide hiperbólico*, muy parecido a una silla de montar. En la figura podemos ver como por un punto P exterior a una recta r pasan más de una paralela. Las rectas a y b serían las hiperparalelas.

En la figura 14 podemos visualizar como sobre tal superficie la suma de los ángulos de un triángulo es menor que dos rectos.

En el instante en que se reemplaza el V postulado de Euclides por el de Lobachevsky, las figuras geométricas que nos ayudan a entender la geometría elemental dejan de ser útiles. Para estudiar las propiedades geométricas de una superficie de curvatura constante negativa resulta cómodo disponer de una representación de la misma sobre un plano. Pero en un plano euclidiano es imposible construir esquemas hiperbólicos, para ello requeriríamos otros tipos de planos, lo que da lugar a distintos *modelos* de geometrías hiperbólicas. Estos modelos son estructuras que se obtienen interpretando los términos de un sistema axiomático, es decir, dándoles significado real. Además, el hallazgo de un modelo real para una teoría funciona como una prueba de su consistencia, pues lo autocontradictorio no puede tener ningún modelo real. Hay cuatro modelos comúnmente usados en la geometría hiperbólica: (a) el modelo de Klein, (b) el modelo del disco de Poincaré, (c) el modelo de la mitad

18 Ver más adelante V.b. La consistencia de las geometrías no euclidianas.

superior de Poincaré, (d) el modelo del hiperboloide (Lorentz y Minkowski). Veamos a modo de ejemplo algunos detalles del modelo de Klein.

IV.c. El modelo de Klein

Basado en trabajos de Cayley y Beltrami fue propuesto por el matemático alemán Félix Klein en *Sobre la llamada geometría no euclidiana* de 1871 (Klein, 1871). Es un modelo para una geometría hiperbólica n -dimensional en la cual los puntos se encuentran en un disco n -dimensional, y las líneas son segmentos contenidos en el disco.

Dibujamos un círculo C en el plano euclidiano normal y llamamos O al centro del círculo, siendo R un punto de la circunferencia entonces el segmento OR es el radio. El interior de C consiste en todos los puntos Y tales que OY es menor que OR . Los puntos del interior del círculo representan los puntos del nuevo plano hiperbólico. Nótese que los puntos de la circunferencia no son parte de este plano hiperbólico. Una cuerda es un segmento que conecta dos puntos A y B , pertenecientes a la circunferencia. Este segmento sin los puntos extremos A y B se llama cuerda abierta. Una recta en este modelo es una cuerda abierta.

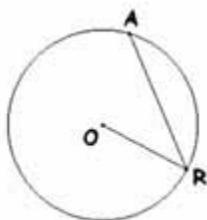


Figura 15.

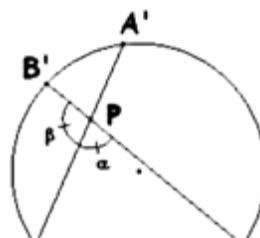


Figura 16.

Veamos por qué esta es una geometría no euclidiana en el sentido primario de este término, es decir, una geometría que cumple con los primeros cuatro postulados pero no con el quinto. El I postulado se cumple porque dos puntos cualesquiera del plano hiperbólico pueden unirse con un único segmento totalmente contenido en el mismo. Como la circunferencia no pertenece al plano, los puntos extremos de las rectas tampoco y por lo tanto las rectas son abiertas e ilimitadas, cumpliéndose el II postulado. Una recta siempre puede prolongarse indefinidamente sin alcanzar los puntos de la circunferencia, pues entre el punto extremo y cualquier otro existen infinitos puntos. Por la misma razón también es válido el III postulado: por cualquier punto del plano y con cualquier radio puede trazarse una circunferencia¹⁹. El IV postulado se cumple pues dados dos ángulos rectos siempre es posible superponerlos en un movimiento. Pero el V postulado ya no se cumple: por un punto P exterior a una recta AB pasan: (a) las rectas interiores al ángulo α (APB), que son secantes a AB , (b) las rectas interiores al ángulo β (APB'), que son no secantes a AB , (c) las rectas AA' y BB' que separan ambas clases de rectas y tampoco cortan a AB (podríamos decir que la cortan en el infinito). Las dos rectas (c) son las hiperparalelas y las infinitas (b) son las ultraparalelas. El ángulo $\alpha/2$ es el ángulo de paralelismo.

De lo anterior se deducen varias propiedades que constituyen los teoremas de la geometría no euclidiana hiperbólica. Por ejemplo, se cumple la extraña propiedad de que dos rectas paralelas a una tercera —como AB y $A'B'$ — pueden ser secantes entre sí.

¹⁹ En algunos casos, por la definición de distancia hiperbólica el centro de la circunferencia queda corrido y la circunferencia parece menor si la vemos con «ojos euclidianos».

Nótese que esto sucede porque la definición de rectas paralelas que se utiliza en este modelo únicamente exige no intersección: dos rectas son paralelas si no tienen ningún punto en común.

Otra propiedad hiperbólica es que dos rectas a y b cualesquiera admiten siempre una paralela común: es la recta que une dos de los puntos en que a y b cortan a la circunferencia: A y B .

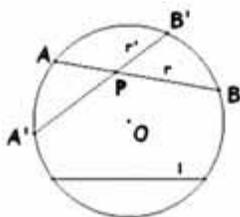


Figura 17.

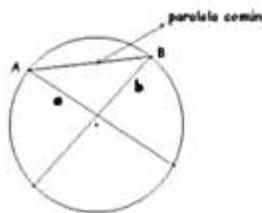


Figura 18.

El modelo de Klein y los otros mencionados eran modelos abstractos o ideales, el modelo que más se aproximaba a una representación real era la pseudoesfera de Beltrami, pero esta no era totalmente hiperbólica y hablaremos de ella abajo. Por más de un siglo los matemáticos buscaron en vano una superficie física que cumpliera con las propiedades de la geometría hiperbólica. Recién en la década de los 90's en el siglo XX, la matemática letona Daina Taimina creó el primer modelo físico utilizable, mediante el método de tejido del crochet, obteniendo un plano hiperbólico en la cual el espacio se curva en cada punto con una curvatura negativa. En la figura podemos ver uno de los modelos de Taimina (Taimina; Henderson, 1998).



Figura 19.

IV.d. Geometría elíptica

El desarrollo de la geometría hiperbólica había sido el primer gran paso en la construcción de las geometrías no euclidianas. Pero de la negación del V postulado se desprendían dos posibilidades: que por un punto exterior a una recta pasaran más de una paralela o que no pasara ninguna. La geometría hiperbólica se desarrolló apoyada en la primera posibilidad, si adoptamos la segunda obtenemos una versión alternativa de la geometría no euclidiana, conocida como *geometría elíptica*. Este segundo tipo de geometría no euclidiana fue creada por el brillante matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866) a partir de 1851.

Como veremos más adelante, en la geometría elíptica las rectas son cerradas y por lo tanto finitas. Esta es la contradicción que dedujo Saccheri de la hipótesis del ángulo obtuso respecto

del II postulado, que afirma que podemos prolongar un segmento cualquiera indefinidamente. Esta aparente contradicción es lo que había impedido que la geometría elíptica fuera considerada en un principio¹. Entonces Riemann tiene la brillante idea de reinterpretar el II postulado como afirmando que lo que realmente podemos garantizar no es una recta actualmente infinita, sino más bien que el proceso de extender un segmento no posee fin. Hizo una distinción muy sutil entre *longitud infinita* y *longitud ilimitada*. Por ejemplo, uno puede recorrer una esfera sin jamás toparse con un límite final, pero sin embargo su superficie es finita. De esta manera, las rectas elípticas no son infinitas sino ilimitadas. Armado con la reformulación de este postulado y la versión del quinto según la cual no pasa ninguna paralela por un punto exterior a una recta, Riemann creó una nueva geometría no euclidiana. La geometría elíptica tiene varios modelos: el *esférico simple*, el *doble esférico*, el *proyectivo* y el *estereográfico*. Nosotros utilizaremos el modelo doble esférico para señalar las principales características de aquella.

IV.e. Modelo doble esférico

Llamamos *geometría esférica* al estudio de las propiedades de rectas, puntos, segmentos, y todas las figuras geométricas ubicadas sobre la superficie de una esfera². Aquella da lugar a dos modelos distintos: el esférico simple que consiste en una semiesfera y el doble esférico que consiste en una esfera completa. En esta geometría el plano es la superficie de la esfera, mientras que los puntos son los mismos que en la geometría euclidiana. Por el contrario, las rectas esféricas —o geodésicas— son las curvas de longitud mínima entre dos puntos, que no son segmentos sino arcos. Estos arcos pertenecen a las circunferencias máximas de la esfera, así llamadas porque son las mayores que puede haber en la misma. Estas circunferencias se obtienen a partir de la intersección de un plano que pasa por el centro de la esfera y la superficie esférica. El diámetro de la circunferencia máxima coincide con el de la esfera misma.

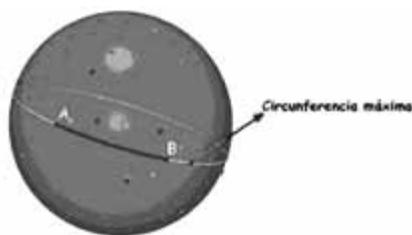


Figura 20.

Con este modelo a la vista podemos apreciar la distinción de Riemann entre longitud infinita y longitud ilimitada. Las rectas esféricas son cerradas —y por tanto finitas— pues partiendo de un punto siempre volveremos a él. Sin embargo, son ilimitadas pues no poseen

- 1 Recuérdese que definimos geometría no euclidiana como aquella que resulta de la conjunción de los cuatro primeros postulados de Euclides y la negación del quinto, aun no se extendía ese concepto hacia un uso libre de los postulados.
- 2 Puede resultar sorprendente que, dado que la geometría de Riemann se adapta perfectamente a la superficie de una esfera, los griegos, quienes la consideraban el cuerpo más perfecto y habían realizado varios estudios geométricos sobre la misma, no dieran con una geometría no euclidiana. El problema es que estaban muy inmersos en el paradigma euclidiano —y esto vale para todos los matemáticos posteriores hasta el siglo XIX—; para ellos el modelo de recta física es una cuerda estirada o el filo de una regla, no era concebible que una geodésica, por ejemplo, sea considerada como recta de una nueva geometría.

principio ni fin, nunca alcanzamos un extremo de la misma, podemos recorrerla indefinidamente. De esta forma se logra evitar el problema planteado por el II postulado, pero surge un nuevo inconveniente respecto del I postulado. Nótese que si tomamos un punto A y el punto diametralmente opuesto A', siempre existe una circunferencia máxima que pasa por ambos. Ahora bien, si rotamos el plano que contiene dicha circunferencia alrededor del eje determinado por A y A', obtenemos infinitas circunferencias máximas que pasan por tales puntos. En este caso resulta falso decir que dos puntos determinan una y solo una recta, deberíamos decir que dos puntos determinan al menos una recta y potencialmente infinitas. La única forma de determinar una recta única sería a partir de dos puntos que no sean diametralmente opuestos. Para evitar esta contradicción con el I postulado se suele convenir que los puntos diametralmente opuestos son en realidad uno y el mismo punto³.

Respecto del III postulado, dado un punto A y un radio r (arco de circunferencia máxima) siempre es posible trazar una circunferencia con ese centro y ese radio. Para ello, consideramos todas las rectas que pasan por ese punto (y por el diametralmente opuesto) y determinamos en cada una de ellas un punto que se encuentre a la distancia r de A. El conjunto de tales puntos es la circunferencia de centro A y radio r. El IV postulado también se cumple pues los ángulos rectos se pueden superponer mediante un movimiento.

En la geometría esférica dos rectas siempre poseen dos puntos de intersección, o más estrictamente uno solo, pues aquellos son diametralmente opuestos. Una recta está determinada por la intersección de la superficie de la esfera y un plano que pasa por el centro de la misma. Por lo tanto, los planos que determinan dos rectas se intersecan en una recta diametral a la esfera, y la intersección de esta recta diametral con la superficie de la esfera determina los dos puntos de intersección de las rectas. Ahora bien, siendo eso así, si consideramos una recta r y un punto P exterior a ella, cualquier recta que pase por P necesariamente va a intersecar a r en dos puntos. Luego, dada una recta y un punto exterior no existe ninguna paralela que pase por el punto, y esta es la versión elíptica del postulado de las paralelas.

En la geometría esférica la suma de los ángulos interiores de un triángulo es mayor que 180° , por lo que los ángulos interiores de un cuadrilátero siempre son mayores que 360° y por lo tanto corresponde a la *hipótesis del ángulo obtuso* de Saccheri. Al igual que en la geometría hiperbólica, esa suma varía dependiendo del área del triángulo. El exceso de la suma de los ángulos —cuanto se aleja de 180° — es proporcional al área del triángulo. Conforme se hace más pequeña el área del triángulo, la suma de sus ángulos tiende cada vez más a los 180° , mientras que al crecer el área del triángulo la suma se aleja de 180° , siendo su límite mayor 540° . En la figura, los ángulos en A y B son rectos porque los planos que determinan las rectas AC y BC son perpendiculares al plano que determina la recta AB. Esto ya demuestra que la suma de los ángulos del triángulo ABC es mayor que 180° .

3 Advirtamos que en el caso del modelo esférico simple no es necesario hacer esta restricción, porque no hay puntos diametralmente opuestos en una semiesfera, sería un modelo más adecuado de geometría elíptica.

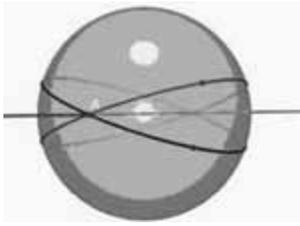


Figura 21.

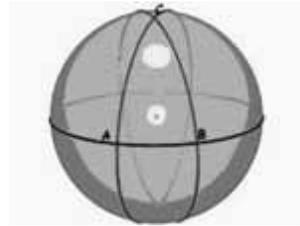


Figura 23.

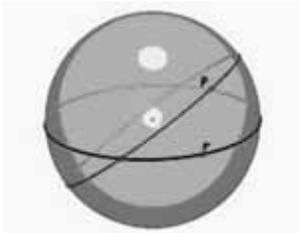


Figura 22.



Figura 24.

Por otra parte, es posible girar la circunferencia máxima AC o BC de forma tal que el ángulo en C sea cada vez mayor y sin embargo los planos que las determinan sigan siendo perpendiculares al plano determinado por A, B y el centro de la esfera. Al agrandar el triángulo de esta manera, los ángulos en A y B permanecen iguales mientras que el ángulo en C crece, demostrando así la proporcionalidad del área del triángulo respecto de la suma de sus ángulos interiores.

De esto se deduce una segunda coincidencia con la geometría hiperbólica: dos triángulos que son semejantes son necesariamente congruentes. Esto es así porque la semejanza sobre la esfera exige igualdad en los tres ángulos, y a su vez para que eso suceda es necesario que tengan la misma área, luego, serán congruentes. Por lo tanto, un triángulo esférico queda completamente determinado por sus ángulos. En las geometrías no euclidianas no puede haber triángulos, ni figuras más generales (pues pueden descomponerse en triángulos), que sean semejantes sin ser congruentes, es decir, que la propiedad de semejanza desaparece.

V. Desarrollos posteriores

V.a. El concepto de curvatura de Riemann

En la disertación «Sobre las hipótesis en que se funda la geometría», Riemann (1859) da comienzo a una nueva dirección de la geometría no euclidiana: la métrico-diferencial. Su trabajo no se limita a crear una nueva geometría, sino que coloca a las geometrías no euclidianas en un marco teórico más general. Ya no se trataba de que se cumpliera el postulado de las paralelas o no. Su idea era estudiar el espacio geométrico localmente y no como un todo, esos «trozos» del espacio se llaman variedades. La geometría diferencial utiliza las técnicas del cálculo diferencial para estudiar cada tipo de variación de las propiedades geométricas.

Otro avance sustancial de la concepción de Riemann consiste en la generalización de las propiedades geométricas a un número arbitrario de dimensiones, abandonando el enfoque tridimensional clásico. A partir de este enfoque logra descubrir lo que hoy conocemos como el *tensor de curvatura* de una variedad. Este importante concepto nos permite ver a todas las geometrías como casos particulares de la geometría riemanniana para n dimensiones. Por

ejemplo, la geometría euclidiana sería aquella caracterizada por la anulación del tensor de curvatura. Las geometrías no euclidianas elíptica e hiperbólica serían dos casos distintos de geometrías de curvatura constante, una positiva y la otra negativa. De esta forma, podemos decir que el espacio euclidiano tiene *curvatura constante cero*, el espacio hiperbólico tiene *curvatura constante negativa* y el espacio elíptico tiene *curvatura constante positiva*.

V.b. La consistencia de las geometrías no euclidianas

En 1868 el matemático italiano Eugenio Beltrami (1835-1900) publica *Ensayo sobre la geometría no euclidiana* (Beltrami, 1868a), donde busca demostrar que es imposible encontrar una prueba del V postulado y que las geometrías que lo niegan son tan consistentes como la euclidiana.



Figura 25.

Para ello produce un modelo de geometría no euclidiana bidimensional dentro del marco de la geometría euclidiana tridimensional. Ese modelo se conoce como *seudoesfera*, un cuerpo que se obtiene rotando una curva llamada tractriz⁴ alrededor de su asíntota. El modelo de Beltrami consiste en la superficie de este cuerpo, que posee curvatura constante negativa, y por lo tanto es un modelo de geometría hiperbólica.

Como el estudio geométrico de la superficie de la pseudoesfera se hace a partir de la geometría euclidiana del espacio tridimensional que la contiene, resulta demostrado que la geometría hiperbólica no puede contener contradicción si no la tiene la geometría euclidiana. Aun más, aquella superficie puede estudiarse también sobre la base de la geometría analítica, por lo que tampoco puede haber contradicción en la geometría no euclidiana si no la hay en la analítica, es decir, en último término, en la aritmética. Esta fue la idea general de la demostración de la consistencia de la geometría no euclidiana y por lo tanto de la indemostrabilidad del V postulado de Euclides. Sin embargo, la demostración resultó incompleta, ya que la superficie de la pseudoesfera no puede extenderse indefinidamente en todas las direcciones, y carece de curvatura negativa en la cúspide. Es solo *localmente* isométrica al plano hiperbólico.

Esta prueba provocó un cambio profundo en la actitud de los matemáticos hacia las geometrías no euclidianas, que pasaron a mostrarse como algo más tangible y no tan ficticio. Hasta ese momento ni la geometría de Lobachevsky ni la de Bolyai habían sido probadas como consistentes (aunque tampoco lo había sido la de Euclides). El trabajo de Beltrami las coloca a todas a la par, se reduce el problema de la consistencia de las geometrías no euclidianas al de la consistencia de la euclidiana, la cual no había sido puesta en duda hasta la fecha.

4 La tractriz es la curva que describe un objeto arrastrado por otro, que se mantiene a distancia constante y se desplaza en línea recta.

V.c. Fundamentación de la geometría

En la segunda mitad del siglo XIX cobra gran fuerza la tendencia hacia la *fundamentación lógico-formal* de las matemáticas. Uno de los elementos clave es la aparición de las geometrías no euclidianas, que al mostrar alternativas al sistema clásico ponen en tela de juicio los fundamentos de la geometría euclidiana. Durante siglos el sistema euclidiano fue sometido a un estudio intensivo pero nunca se pensó que los postulados debían ser modificados o completados. Es un mérito de la revolución de las geometrías no euclidianas el poner de manifiesto esta necesidad. Desde este nuevo punto de vista el sistema de Euclides presenta varios defectos formales y debilidades lógicas, como la no mención de postulados que sin embargo son utilizados.

En 1882 Moritz Pasch (1843-1930) presenta en *Lecturas sobre geometría moderna* (Pasch, 1882) un sistema completo y suficiente de postulados para exponer la geometría proyectiva. En la misma obra hace un llamado para una fundamentación de la geometría euclidiana a partir de axiomas más precisos y con mayor preocupación por los métodos deductivos empleados. Por primera vez se llama la atención sobre las asunciones tácitas de Euclides, y se descubre que la noción de «entre» requiere un postulado especial, introduciéndose así los *axiomas de orden*.

Pero el verdadero sistematizador del pensamiento axiomático en geometría fue el matemático inglés David Hilbert (1862-1943), con sus famosos *Fundamentos de la geometría* de 1899 (Hilbert, 1950). Utiliza 20 axiomas⁵ distribuidos en 5 grupos.

1. *Axiomas de enlace o incidencia*: determinan la existencia y unicidad de la recta y el plano, y la incidencia de los puntos sobre los mismos.
2. *Axiomas de orden*: determinan la ordenación de los puntos en una recta, incluyen el axioma de Pasch.
3. *Axiomas de congruencia*: determinan las relaciones de congruencia entre puntos, segmentos, rectas, ángulos y triángulos.
4. *Axioma de las paralelas*: es el Postulado de Playfair.
5. *Axiomas de continuidad*: incluyen el Axioma de Arquímedes y el de completud de la línea.

Si comparamos el sistema de Hilbert con el de Euclides, vemos que los postulados euclidianos desempeñan el papel de los axiomas de enlace más el de las paralelas. Las nociones comunes son sustituidas por los axiomas de congruencia, mientras que los axiomas de orden y el de continuidad no tienen equivalente en el sistema euclidiano. Sin embargo, estas omisiones no perjudican a la construcción de Euclides porque nunca se procede de forma tal que esos postulados sean violados. Las omisiones se explican por el carácter fuertemente intuitivo de los axiomas omitidos, se los veía como algo tan evidente que parecía superfluo incluirlos, las proposiciones contrarias eran simplemente inimaginables.

VI. Consecuencias filosóficas

VI. a. Geometría y realidad

El primer efecto filosófico importante que tuvo esta revolución en la geometría fue cuestionar la *relación entre matemáticas y realidad*. Siempre se había considerado que la

5 En Hilbert (1950) se utiliza un axioma 21 pero posteriormente se veía que no era independiente.

geometría euclidiana era una descripción inalterable de las propiedades geométricas del mundo que nos rodea. Esto hace que resulte impensable la posibilidad de construir una geometría consistente que parta de postulados contrarios a los euclidianos. Sin embargo, esto puede hacerse sin contradicción, lo cual pone en tela de juicio la relación más o menos evidente que se creía había entre geometría y realidad. Los tres matemáticos creadores de las geometrías no euclidianas, especialmente Gauss y Lobachevsky, pensaron que la geometría hiperbólica podía tener aplicación en el mundo real. Sin embargo, los matemáticos posteriores —un ejemplo es Klein— consideraron que la geometría que describía la estructura del mundo era la euclidiana, mientras que las demás eran ficticias. A partir de la demostración de la consistencia de las geometrías no euclidianas, estas pasan a encontrarse, al menos a priori, en un plano de igualdad como candidatas a la «verdadera geometría». Al ser todas las geometrías matemáticamente equivalentes, la validez de una de ellas sólo puede decidirse empíricamente y no por evidencia interna.

Estas consideraciones nos introducen al caso más espectacular de aplicación de una geometría no euclidiana a las ciencias naturales, me refiero a la teoría general de la relatividad. Newton había elaborado sus leyes del movimiento sobre la base de una estructura geométrica euclidiana del espacio físico, y utilizando los conceptos de espacio y tiempo absolutos e independientes. Cuando Einstein desarrolla la teoría general de la relatividad⁶, aborda la cuestión de la estructura geométrica del universo. Dos conceptos introducidos por Riemann van a pavimentar el camino hacia su solución: el concepto de curvatura intrínseca a una superficie y la generalización de la geometría diferencial a dimensiones arbitrarias, lo que sugiere que aquel concepto puede aplicarse tanto al espacio tridimensional como al espacio-tiempo cuatridimensional, siempre y cuando prevalecieran circunstancias análogas a las que se registran en las superficies curvas. Newton entendía a la gravedad como una acción de fuerzas, por ejemplo, dos esferas ejercen entre sí una fuerza que actúa a través de la línea recta que pasa por sus centros. Para Einstein todo cuerpo con masa produce una curvatura en el espacio-tiempo, que termina siendo la responsable de la fuerza de gravedad. Para tener una imagen gráfica simple podemos imaginarnos el universo como una cama bien tendida, en cuyo caso su superficie se asemejaría a un plano euclidiano clásico. Pero si apoyamos un objeto pesado sobre esa superficie, deja de ser plana para transformarse en curva en la zona que rodea al objeto. Cualquier otro objeto que se encuentre sobre la cama cerca del primer objeto se deslizará hacia este por efecto de la curvatura producida. Así es como la Tierra curva nuestro espacio de manera que cuando arrojamus un objeto este se cae hacia el suelo.

De esta forma Einstein reinterpreta el campo gravitatorio clásico como curvatura del espacio-tiempo, lo que requiere una geometría distinta a la euclidiana, utilizada en el modelo de Newton. En tal geometría los cuerpos bajo la acción de la fuerza gravitatoria siguen las líneas más rectas posibles, que se llaman geodésicas. Lo mismo sucede con la luz (y con las ondas electromagnéticas en general), Einstein descubre que se curva ante campos gravitatorios importantes, como estrellas o planetas. Como la curvatura del espacio-tiempo es positiva, en la teoría general de la relatividad la geometría del espacio es una geometría diferencial elíptica de Riemann. Esta brillante conjunción de teorías permitió a los físicos del siglo XX explicar fenómenos astronómicos frente a los cuales el modelo de Newton se había mostrado impotente. La teoría de Einstein fue notablemente confirmada en 1919

6 Véase en este mismo volumen el artículo de Leonardo Moledo, Nicolás Olszewicki y Esteban Magnani, «Einstein y la reinención de la Física» (*comps.*).

durante un eclipse de Sol, cuando se registró que los rayos que provenían de las estrellas se curvaban al pasar cerca del Sol debido al intenso campo gravitatorio que ejercía sobre ellos.

Lo importante aquí es que Einstein no inventó la geometría necesaria para su modelo del universo sino que la halló en los trabajos sobre geometrías no euclidianas del siglo XIX, como preparados a propósito para tal tarea. Sin aquellos trabajos la teoría general de la relatividad, una de las teorías más importantes de la historia de la ciencia, no hubiera sido posible. Esta espectacular aplicación es la que cambia definitivamente el status siempre menoscabado de las geometrías no euclidianas dentro del campo de las matemáticas.

VI.b. Una nueva concepción de las matemáticas

Las consideraciones anteriores podrían sugerirnos que la geometría elíptica utilizada por Einstein es la «verdadera» geometría, al menos según una de las teorías físicas más sofisticadas de las que disponemos. Pero si el objetivo de la geometría es realizar una descripción de ciertas estructuras del mundo: ¿cómo es posible que las otras geometrías sean consistentes si son «falsas»? Esto comienza a sugerirnos que el criterio de autoevidencia exigido a los postulados deja de ser funcional, pues geometrías con postulados ampliamente anti-intuitivos son perfectamente posibles. La crisis de la geometría se ubicó al comienzo dentro del marco del problema del V postulado, pero terminó expandiéndose hasta alcanzar al concepto mismo de axioma, y por extensión, a la idea misma de sistema axiomático-deductivo.

Antes de la aparición de las geometrías no euclidianas se creía que los axiomas debían de alguna manera reflejar la realidad percibida, que debía haber una cierta relación entre los mismos y ciertos hechos básicos del mundo. Esto quiere decir que el criterio de aceptabilidad de una teoría geométrica es la *verdad*, entendida esta como *correspondencia* con la estructura geométrica de la realidad física. Se creía que había tal lazo entre matemáticas y realidad que una construcción matemática que no la reflejará sería necesariamente autocontradictoria. De esta concepción se sigue que solamente puede existir una geometría. Pero a partir de la demostración de la consistencia de las geometrías no euclidianas, los matemáticos empiezan a sentirse libres para considerar una geometría como definida por cualquier sistema de axiomas compatibles. La distinción misma entre axiomas y teoremas deja de ser algo determinado de antemano por características intrínsecas de las proposiciones. El criterio de verdad como correspondencia es sustituido por tres criterios diferentes. En primer lugar tenemos el criterio de coherencia: se exigirá que los axiomas sean compatibles entre sí, es decir, que sea imposible deducir dos teoremas contradictorios entre sí o algún teorema que contradiga un axioma. En segundo término, los axiomas deben ser suficientes para deducir todos los teoremas que se siguen de ellos a partir de las definiciones de los elementos del sistema. La demostración que hace el lógico polaco Kurt Gödel en 1931 respecto de la incompletud de los sistemas de aritmética básica muestra la imposibilidad de cumplir cabalmente el segundo criterio en matemáticas (Gödel, 2006). Finalmente, los axiomas deben ser independientes, ninguno de ellos puede ser deducible a partir de uno o más de los restantes. Este es más bien un principio de economía, en el sentido de que no afecta a la validez del sistema, siendo incluso violado en muchos casos, pues la introducción de axiomas no independientes facilita enormemente la deducción de los teoremas. Es por tanto el criterio de coherencia interna, de no contradicción de los postulados entre sí y con los teoremas, el que va a sustituir con mayor fuerza a la antigua exigencia de correspondencia con la realidad.

El problema de las *definiciones* marca un segundo punto de divergencia respecto de la antigua concepción de sistema axiomático-deductivo. Euclides pretendió definir todos los

elementos de su geometría, por considerarlo imprescindible para una correcta comprensión del sistema. En la concepción moderna se cree que no es posible definirlo todo. Para darse cuenta de este punto basta con considerar si es posible aprender un lenguaje extranjero mediante la lectura de un diccionario de dicho lenguaje. Es evidente que no lo es pues toda palabra se definiría en términos de otras palabras, y así sucesivamente, lo que no nos permite salir nunca del círculo del lenguaje para saber de qué objetos hablamos. En los lenguajes naturales el círculo se rompe mediante la definición ostensiva de algunos términos del lenguaje, pero este método no es posible en matemáticas.

La solución que encontró Hilbert fue reconocer que hay ciertos términos que deben permanecer indefinidos, definiéndose los demás en términos de estos. En su sistema hay tres términos indefinidos, llamados primitivos: punto, línea, plano; y tres relaciones primitivas: «entre», pertenencia y congruencia. Pero siendo esto así, ¿cómo sabemos de qué objetos estamos hablando en geometría? Se considera que los términos primitivos quedan *definidos implícitamente* por las relaciones establecidas entre ellos por los axiomas. Esto quiere decir que los elementos de la geometría son aquellos objetos que satisfacen los axiomas, por ejemplo, un punto es cualquier objeto que satisfaga los axiomas que hablan de puntos, una recta es cualquier objeto que satisfaga los axiomas que hablan de rectas, etcétera.

A partir de estos resultados, Hilbert desarrolla una nueva filosofía de las matemáticas, conocida como *formalismo*, según la cual las matemáticas no se refieren al mundo físico, de hecho, no tienen ningún objeto propio y por lo tanto no se refieren a nada⁷. Este punto puede visualizarse más fácilmente a partir de la distinción entre matemática pura y matemática aplicada. La matemática pura carece de contenido o significado fáctico, no se refiere a ningún objeto, ni empírico ni abstracto, pues los axiomas no son afirmaciones sobre el mundo que puedan ser verdaderas o falsas. El status de los axiomas es el de las definiciones, es decir, que son convencionales. Únicamente las matemáticas aplicadas tienen un objeto, es decir, cuando se interpretan los términos primitivos mediante algún modelo en el cual se cumplan los axiomas. El problema es que todo sistema geométrico tiene muchos modelos que satisfacen los axiomas, por lo que el sistema abstracto en sí mismo no se refiere a nada. Por ejemplo, si una biblioteca cumple con los axiomas de la geometría euclidiana, entonces un punto es un libro, una recta es una hilera y un plano es un estante.

Una importante consecuencia de estas consideraciones es que las matemáticas logran alcanzar un elevado grado de *autonomía* respecto de las ciencias de la naturaleza. Durante toda la modernidad la matemática fue poco más que una doncella de la ciencia natural. Si ponemos las cosas en perspectiva histórica, la relevancia de la geometría no euclidiana en ese proceso es extraordinaria, representa el grito inicial de independencia frente a otras ciencias y de autonomía frente al mundo exterior. A pesar de ello, no podemos soslayar la importancia que tuvo el grado de abstracción que alcanzó el álgebra, el cual alteró el carácter intuitivo de la aritmética elemental e impregnó en mayor o menor medida todos los ámbitos de la matemática. El matemático ya no debía justificar sus construcciones mediante una demostración de concordancia con el mundo real, en este sentido, podemos afirmar que tiene absoluta libertad.

En definitiva, el criterio que nos permite distinguir una construcción matemática fértil de un estéril juego especulativo es la *utilidad* práctica. Sin embargo, muchas teorías nacieron sin tener muchas probabilidades de aplicación y con el tiempo resultaron fundamentales

7 Para ser más exactos, en la concepción formalista, el objeto de las matemáticas son los signos matemáticos mismos, considerados como carentes de significado, únicamente se consideran sus relaciones sintácticas a partir de las reglas de manipulación determinadas por el sistema.

para las teorías físicas más sofisticadas, como sucedería con la geometría riemanniana respecto de la teoría de la relatividad. Estos grandes hitos de la historia de la ciencia parecen sugerir que deberíamos dejar a los matemáticos desarrollar libremente sus teorías sin preocuparnos demasiado por sus aplicaciones inmediatas. Solo el tiempo puede demostrar si una teoría matemática era fundamental para el desarrollo de la ciencia o un simple pasatiempo para quienes gustan de la abstracción.

Si ya no consideramos que las matemáticas, al menos las puras, puedan considerarse verdaderas o falsas, sino más o menos útiles para determinados propósitos, ¿cómo debemos considerar el caso de la aplicación de la geometría elíptica a la teoría general de la relatividad? A partir de la discusión anterior, debería haber quedado claro que no podemos decir que la geometría elíptica sea la verdadera y las demás sean falsas. En primer lugar, por más exitosa que haya sido, la teoría de Einstein es falible y dista mucho de ser definitiva. No podemos saber si no será sustituida en el futuro por otra teoría que haga uso de otra geometría, quizás una que aun no fue inventada. Por otra parte, la geometría euclidiana es muy útil para las pequeñas dimensiones, pues la diferencia con las no euclidianas son despreciables, y es usada con éxito en la actualidad. En el fondo la elección de una u otra geometría en tales contextos es cuestión de sencillez y comodidad.

En este sentido la revolución de las geometrías no euclidianas es perfectamente comparable con la que sucedería en la lógica matemática más de un siglo y medio después. Desde la formalización de la lógica clásica en sistemas matemáticos simbólicos, tarea debida fundamentalmente a Frege, Russell y Whitehead, se creyó que la lógica clásica de primer orden era «la» lógica. Sin embargo, muy temprano empezaron a aparecer otros sistemas, que negaban y modificaban algún aspecto básico de la lógica clásica, o que buscaban ampliarla con nuevos axiomas. Un ejemplo del primer caso son las lógicas polivalentes, que admiten más de dos valores de verdad y por lo tanto contienen distintos axiomas. Un ejemplo del segundo caso son las lógicas modales que mantienen el aparato clásico pero añaden los operadores «posiblemente» y «necesariamente». Muchos lógicos se opusieron a estos nuevos desarrollos, la *Filosofía de la lógica* de Quine, publicada en 1970 (Quine, 1981) es representativa de esta actitud de rechazo. Pero a partir de los 80's se empieza a incubar la idea de que no existe una lógica formal que elucide la noción de consecuencia lógica informal, sino que hay muchas lógicas que permiten reflejarla en distintos niveles, siendo todas útiles dependiendo de los contextos. Esta idea se plasmaría en el nuevo paradigma en filosofía de la lógica iniciado por el trabajo de John Etchemendy en los 90's (Etchemendy, 1990), que llega a incluir en la lógica modalidades no oracionales, como los sistemas lógicos diagramáticos. Ambos episodios representan el triunfo de la tolerancia y la diversidad en cuanto a desarrollos en ciencias formales, elementos necesarios para poder aprehender la complejidad del mundo.

VII. Bibliografía

- Albenda Solís, C. y Sanabria Hernández, J. (2004), *Geometría no euclidiana*, Costa Rica, Cartago.
- Aristóteles (1973), *Obras*, Madrid, Aguilar.
- Barret, R. (2001), «El postulado de Euclides», en *Galileo*, 2^o época, N^o 24.
- Beltrami, E. (1868a), «Saggio di interpretazione della geometria non-euclidea», en *Giornale di Matematiche*, VI, pp. 285-315.

- _____ (1868b), «Teoría fundamental de los espacios de curvatura constante», en *Annali. Di Mat.*, ser. II, 2, pp. 232-255.
- Bolyai, J. (1955 [1832]), *The Science Absolute of Space*, Nueva York, Dover.
- Bonola, R. (1955), *Non-Euclidean Geometry*, Nueva York, Dover.
- Colerus, E. (1949 [1943]), *Historia de la Matemática*, Buenos Aires, Progreso y Cultura.
- Coxeter, H. S. M. (1998), *Non-euclidean geometry*, Washington, The Mathematical Association of America.
- Datri, E. (1999), *Geometría y realidad física. De Euclides a Riemann*, Buenos Aires, Eudeba.
- Etchemendy, J. (1990), *The concept of logical consequence*, Cambridge, Harvard University Press.
- Euclides (1991), *Elementos*, Madrid, Gredos.
- Eves, H. (1985), *Estudio de las geometrías*, México, UTEHA.
- Gödel, K. (2006 [1931]), *Sobre proposiciones formalmente indecidibles de los Principia Mathematica y sistemas afines*, Oviedo, KRK Ediciones.
- Gray, J. (2007), *Worlds Out of Nothing*, Londres, Springer Undergraduate Mathematics Series.
- Greenberg, M. J. (1974), *Euclidean and Non-Euclidean Geometries: Development and History*, Nueva York, W. H. Freeman and Company.
- Hartshorne, R. (2000), *Geometry: Euclid and beyond*, Londres, Springer Undergraduate Texts in Mathematics.
- Hernández Paricio, L. J. (2003), *Sobre los principios fundamentales de la geometría. Intentos de demostración del quinto postulado*, disponible en <<http://www.xtec.es/~jdomen28/aarticle2.htm>>.
- Hilbert, D. (1950 [1899]), *Foundations of Geometry*, Chicago, The Open Court Publishing Company.
- Hormigón, M. (1991), *Las matemáticas en el siglo XIX*, Madrid, Akal.
- Klein, F. (1871), «Über die sogenannte Nicht-Euklidische Geometrie», en *Math. Ann. Bd.*, IV, pp. 573-625.
- Kline, M. (1972), *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, Nueva York, Oxford University Press.
- Levi, B. (2001), *Leyendo a Euclides*, Buenos Aires, Libros del Zorzal.
- Lobachevsky, N. I. (2007 [1840]), *Geometrical Researches on the Theory of Parallels*, Nueva Cork, Cosimo.
- Pasch, M. (1882), *Vorlesungen über neueren Geometrie*, Leipzig, Teubner.
- Playfair, J. (1860 [1795]), *Elements of Geometry: containing the first six books of Euclid with a suplement on the Quadrature of the Circle and the Geometry of Solids by John Playfair*, Philadelphia, J.B. Lippincott & Co.
- Poincaré, H. (1905), *Science and Hypothesis*, Nueva York, The Walter Scott Publishing Co.
- Proclus de Lycie (1948), *Les Commentaires sur le premier Livre des Elements D'euclide*, París, Abel Blanchard.
- Quine, W. v. O. (1981 [1970]), *Filosofía de la lógica*, Madrid, Alianza.
- Rey Pastor, J. y Babini, J. (2000), *Historia de la matemática*, Barcelona, Gedisa. 2 v.
- Ribnikov, K. (1987), *Historia de las matemáticas*, Moscú, Mir.
- Riemann, B. (1859), «On the Hypotheses which lie at the Bases of Geometry», en *Nature*, v. VIII, N° 183 (pp. 14-17), 184 (pp. 36-37).
- Rodríguez, P. (2007), *Las geometrías no euclidianas*, Montevideo, CEBA.
- Ruiz, A. (2004), *Geometrías no euclidianas*, disponible en <<http://www.cimm.ucr.ac.cr/aruz/Libros/No%20euclidianas/>>.
- Santaló, L. (1966), *Geometrías no euclidianas*, Buenos Aires, Eudeba.
- Saccheri, G. (1920 [1733]), *Euclides Vindicatus*, Chicago/Londres, The Open Court Publishing Company.
- Taimina, D. y Henderson, D. (1998), «Experiencing Geometry», en *Nordic Mathematics Education Conference Proceedings*, Kristiansand, Norway, Norma-98.
- Torreti, R. (2007), «Nineteenth century geometry», en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, disponible en <<http://plato.stanford.edu/entries/geometry-19th/>>.
- Waldo Dunnington, G. (2004 [1955]), *Carl Friedrich Gauss. Titan of Science*, Washington, The Mathematical Association of America.

Leonardo Moledo, Nicolás Olszevicki, Esteban Magnani

14. Einstein y la reinvencción de la Física⁸

*Si mi teoría resulta cierta, los alemanes dirán que soy un alemán
y los franceses que soy un alemán que debió huir de su patria;
si mi teoría resulta falsa, los franceses dirán que soy un alemán
y los alemanes dirán que soy un judío.*
Albert Einstein

I. Einstein y la física

I.a. La física a fines del siglo XIX

Cuando todavía faltaban tres décadas para entrar en el siglo XX, el impresionante edificio de la ciencia newtoniana alcanzó una nueva culminación: en 1864 James Maxwell (1831-1879) exhibió una formidable síntesis. De un saque y con un puñado de ecuaciones, resumió dos siglos y medio de experimentación y logró explicar *todos* los fenómenos eléctricos y magnéticos conocidos hasta entonces, mostrando, de paso, que electricidad y magnetismo no eran sino dos caras de una misma moneda. Fue una hazaña grandiosa, a la manera de Newton; de pronto, una región entera de la física y del conocimiento se estructuraba matemáticamente, como había previsto y querido Galileo.

Claro que tuvo sus colofones increíbles, porque hete aquí que operando con las ecuaciones y combinándolas, Maxwell obtuvo una ecuación idéntica a la que describía el desplazamiento mecánico de las ondas. Fiel y leal a la idea de que el libro de la naturaleza está escrito con caracteres matemáticos (y que, además, traduce a la naturaleza *real*), concluyó que si en el electromagnetismo aparecía la ecuación de las ondas, entonces *tenían* que existir ondas electromagnéticas. Fue una predicción genial: nueve años después de su muerte en 1888, Heinrich Hertz (1857-1894) logró emitir una señal y recibirla pocos metros más allá dentro de su laboratorio. Era la primera transmisión humana de una onda electromagnética

8 El siguiente capítulo toma como base textos ya publicados en Moledo por Rudelli (1996), Moledo (2008, 2010) y Moledo; Magnani (2008).

en la historia. Ya estaban allí en germen la radio, la televisión y las señales enviadas por las naves que exploran los límites del Sistema Solar.

Maxwell tuvo una segunda intuición genial: sugirió que la luz *también* era una onda electromagnética, esto es, campos eléctricos y magnéticos que vibraban y se perseguían en el éter, esa sustancia invisible, inodora, insípida, perfectamente porosa, totalmente elástica cuando hacía falta y por completo rígida si era necesario, y que, casi como artículo de fe, llenaba uniformemente el universo desde los tiempos de Aristóteles.

El electromagnetismo abría una interesante posibilidad. La física tradicional (de Aristóteles) establecía una distinción decisiva entre el movimiento y el reposo: lo que se movía, se movía, y lo que estaba quieto, estaba quieto⁹. El movimiento era algo absoluto. Galileo rechazó esa afirmación: el movimiento no es algo absoluto que *hacen* los móviles, sino que es simplemente una *relación* entre ellos: lo que está en reposo para alguien, se está moviendo para otro observador, y por lo tanto, es indistinguible del reposo: si viajamos en un barco, por ejemplo, los objetos del barco nos parecerán en reposo. Ni que hablar en un avión, aunque Galileo no podía saberlo.

El principio de relatividad de Galileo, piedra de toque de la ciencia moderna y perfectamente establecido desde el siglo XVII, base también de los *Principia* de Newton, dejaba bien en claro que el movimiento rectilíneo y uniforme era siempre relativo y que ningún experimento mecánico permitía detectarlo: nada de lo que ocurre dentro de un avión lanzado a velocidad crucero demuestra que se está moviendo. A pesar de que, visto desde afuera, el primer sorbo de café que toma un pasajero y el segundo están separados por muchos kilómetros, el pasajero encuentra que ni su taza ni él se han movido. En un sistema en movimiento rectilíneo y uniforme (es decir, con velocidad constante), todo ocurre de la misma manera que si estuviera en reposo¹⁰.

Newton aceptaba el principio, desde ya, y relegaba el concepto de «reposo absoluto» para el espacio en su conjunto. El «espacio mismo», estaba en «reposo absoluto», aunque advertía que ningún experimento mecánico detecta el movimiento rectilíneo y uniforme respecto a ese espacio absoluto inmóvil (las ecuaciones newtonianas no distinguen entre reposo y movimiento rectilíneo y uniforme). No había manera de demostrar, por caso, el movimiento de la Tierra mediante un experimento mecánico, del mismo modo que es imposible demostrar, dentro de un avión, que se está moviendo. La mecánica era taxativa.

Pero las ecuaciones de Maxwell también eran taxativas. Ellas sí distinguían entre reposo y movimiento y predecían que el comportamiento de un rayo de luz debía ser diferente según el sistema (sea que estuviera en reposo o en movimiento). Esto es: después de todo, *había* una manera de medir el movimiento absoluto de la Tierra a través del espacio absoluto. Ningún experimento mecánico podía detectarlo, pero un experimento electromagnético sí tenía que poder hacerlo.

Justamente es eso lo que se propusieron Albert Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923).

9 Véase en este mismo volumen el artículo de Elena Díez de la Cortina Montemayor, «Ciencia y método en Aristóteles» (*comps.*).

10 Véase en este mismo volumen los artículos de Godfrey Guillaumin, «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*).

I.b. Michelson, Morley y el derrumbe del éter

Puesto que el espacio estaba lleno uniformemente de éter, la Tierra, al atravesar ese invisible océano en reposo, debía recibir una corriente en sentido contrario como la que recibe un barco a medida que avanza o el viento que entra por la ventanilla de un auto que corre por la autopista. Entonces, si se envía un rayo de luz en sentido contrario a la corriente de éter, el «viento de éter» lo retrasará (de la misma manera que la corriente de un río es capaz de retrasar una barca) y el retraso debía poder predecirse mediante las ecuaciones de Maxwell. Medir el «retraso de éter» de un rayo de luz debía ser lo mismo que medir el movimiento absoluto de la Tierra a través del espacio inmóvil.

Michelson imaginó para ello un experimento que utilizaba pulsos de luz. Envío un único rayo de luz dividido en dos, uno paralelo y otro perpendicular al movimiento de la Tierra; ambos rayos se reflejaban en espejos y volvían. Los experimentadores calculaban que, dado que el rayo perpendicular no era afectado por el viento de éter, los rayos llegarían ligeramente desfasados al punto de partida, donde se registraría una interferencia. El aparato era muy sensible: alcanzaba con que el viento de éter tuviera una velocidad de al menos 3 Km. /s respecto del laboratorio, muy inferior a la de la Tierra (30 Km. por segundo —alrededor de cien mil Km. por hora—). No había manera de que se escapara.

Y, sin embargo, no se detectó ningún arrastre de éter. Los rayos se reflejaron y volvieron juntos. Michelson repitió el experimento una y otra vez, pero el rayo de luz no parecía conmoverse ni siquiera mínimamente por el hecho de que hubiera una corriente de éter en contra.

La situación era grave, ya que se había producido un choque evidente entre la empiria y la teoría; entre el electromagnetismo que predecía un arrastre de éter, y la experimentación, que no lo encontraba. Uno de esos choques que se arreglan con emparches que no convencen a nadie, mientras crecen el malestar y el desasosiego. La física entraba en un atolladero y en una zona de inestabilidad.

El experimento de Michelson y Morley, además de poner en entredicho una teoría maravillosa como el electromagnetismo, causó sorpresa, una enorme sorpresa. Y para percibir la magnitud, vale la pena intentar la analogía, tan distante de la metáfora, que alimenta a la poesía o a la narración, que estructura la vida humana y la historia. La analogía tiene contactos —tenues y distinguidos— con la alegoría (esa derivación dudosa del arte) y el panfleto (ese producto tantas veces necesario de la literatura).

Un automóvil se detiene a cargar nafta en una estación de servicio y en un día perfectamente calmo; ni una brizna de hierba se conmueve, ni una brisa turba el enorme océano de aire en reposo que rodea al pacífico mundo de los viajeros, que por la radio escuchan, quietados, un coral del infinito e inagotable Juan Sebastián Bach. Terminada la faena, el auto arranca y alcanza la nada prudente velocidad de ciento cincuenta kilómetros por hora en la autopista.

Naturalmente, dentro del automóvil, no habrá experimento mecánico alguno que demuestre el movimiento una vez que se alcance una velocidad estable y los objetos de adentro del automóvil permanecen (para los viajeros) en absoluto reposo; el libro sobre las rodillas, la moneda que se tira al aire y se recoge, mientras atraviesan el océano de aire en reposo que los rodea.

Pero todos saben que apenas intenten un experimento electromagnético, esto es, un experimento que se desarrolle *en el aire* que se desplaza a ciento cincuenta km/h. hacia

atrás, podrán darse cuenta de que el coche está en movimiento: basta sacar una mano por la ventanilla y comprobar cómo el viento la golpea.

Pero hete aquí que al sacar la mano por la ventanilla en ese mundo electromagnético, no se siente ninguna corriente de aire: el aire está tan en reposo como cuando el auto se encontraba detenido en la estación de servicio. Y si se abren las ventanillas, no habrá corriente alguna que haga volar los papeles del interior, o que modifique las cosas, o que haga que el sonido se propague en el aire dentro del coche de una manera diferente. Y lo mismo ocurre con todos los autos que circulan por la autopista: sin importar la velocidad a la que se muevan, o que estén detenidos al costado, quien saque una mano por la ventanilla o la abra, encontrará que el aire externo está en reposo.

Para Michelson y Morley y el electromagnetismo de entonces, la Tierra era el automóvil que recorría a toda velocidad un mar de éter en reposo; y cuando los dos físicos sacaron la mano con sus aparatos, encontraron que el éter estaba tan en reposo como si la Tierra estuviera quieta, por lo cual era incapaz de modificar el comportamiento de un rayo de luz.

Nadie debe inquietarse por que se encontrara el asunto extraño, incomprensible y desconcertante: efectivamente, parecía urgente encontrar alguna solución.

Dos físicos, Lorentz y Fitzgerald, cada uno por su cuenta, sugirieron una solución. Era rara, pero era una solución. Imaginaron que, con el movimiento, las distancias y el tiempo se modifican, y aceptando esas extrañas propiedades del tiempo y el espacio, y haciendo los cálculos apropiados, se entendía por qué el experimento de Michelson-Morley no había revelado ningún retraso en el rayo de luz. Al moverse la Tierra respecto del éter, las distancias y los tiempos se modifican de tal manera que el rayo llega a la cita con puntualidad y sin registrar retraso alguno. Pero la explicación tenía un punto flojo: ¿por qué se van a contraer los cuerpos con el movimiento? ¿Si no hay ninguna razón para que lo hagan! En realidad, era una solución de compromiso, una transacción *ad hoc*, que dejaba a salvo el éter, el electromagnetismo, el rayo de luz que no se retrasaba y la predicción de que se retrasaría. Arreglaba las cosas, pero al costo de un dolor de cabeza. Por primera vez se habían tocado el espacio y el tiempo, esos dioses que reinaban desde la época de Newton, y que parecían intocables. Era chapucero, pero el daño estaba hecho.

A fines del siglo XIX, como decíamos al principio, Occidente en general se aproximaba lenta pero firmemente a una seria crisis, no solamente en la física sino también a nivel político y cultural: la paz armada y la competencia capitalista entre las potencias europeas desembocarían en la guerra del '14 y el ascenso del socialismo y el movimiento obrero en las revoluciones rusas; la pintura se desprendía de la forma, enfilaba hacia el cubismo y, más allá, la abstracción; la música ensayaba disonancias; la literatura iniciaba el camino que la apartaría del naturalismo y desembocaría en el *fluir* de la conciencia de Proust, Woolf y Joyce; y las matemáticas sufrían los rigores de la teoría de conjuntos, que sacudirían la filosofía y que rematarían en el Círculo de Viena y en el positivismo lógico.

La física, que en el siglo XIX se jactaba de poder explicar todo lo existente, por su parte, estaba en un brete bastante serio. Ya contamos los problemas que había traído el electromagnetismo de Maxwell, que había terminado por llenar al universo vacío de Newton con éter (esa dudosa y repugnante sustancia aristotélica que luego se derrumbaría por la experiencia de Michelson y Morley). Pero no era el único frente de tormenta: hacia fines del siglo XIX, se había profundizado la investigación en el terreno del átomo; primero los rayos X y luego la radiactividad ofrecían avalanchas de datos sin una teoría comprensiva. En el año 1900, Max Planck había propuesto una explicación del fenómeno de la radiación del

cuerpo negro (un problema heredado del siglo XIX) que contenía una hipótesis novedosa y sobre todo herética (cuyos alcances el mismo Planck estaba lejos de imaginar). Planck suponía que la energía era emitida de manera discreta, en paquetes, o cuantos de energía, es decir, rompiendo el baluarte de la continuidad que ostentaba hasta entonces el concepto de energía¹¹. Eso, en 1900.

En 1903 ingresó en la oficina de patentes de Berna como perito de tercera clase, un muchacho de 24 años y de nombre Albert Einstein (1879-1955). Había nacido en Ulm y tenía dos años cuando Michelson iniciaba su seguidilla de experimentos sobre el éter y la luz. Estaba terminando su doctorado en física y se dedicaba a reflexionar sobre las cuestiones que preocupaban a los físicos de aquel entonces: el éter, el movimiento absoluto, las propuestas de Planck, el movimiento browniano. No había sido, hasta el momento, un estudiante especialmente destacado, pero sin embargo fue, al decir de sus jefes, un buen empleado, que en los intersticios del trabajo se dedicó a pensar en la física del momento. Así son las cosas.

Desde la cómoda perspectiva que da el tiempo, parecería que se preparaba para el año 1905, crucial en la historia de la ciencia del siglo XX.

1.c. El *annus mirabilis*

Ese *annus mirabilis*, Einstein publicó cinco trabajos en los *Annalen der Physik* (Einstein, 2005a). El primero, recibido por la revista el 18 de marzo de 1905, tomaba la teoría recientemente formulada por Max Planck (1858-1947), sobre los cuantos de energía (que, como ya hemos visto, sostenía que la energía no se emitía de manera continua sino discreta) y lo extendía a la luz. Sobre ese trabajo descansa toda la mecánica cuántica y toda la física atómica de la primera mitad del siglo XX y fue *este* trabajo el que le valió el Premio Nobel que habría de recibir en 1921.

El segundo (fines de abril) se llamaba «Una nueva determinación sobre las dimensiones moleculares» y era su disertación doctoral sobre la determinación de la cantidad de moléculas de azúcar en un cierto volumen de agua y el tamaño de las moléculas.

El tercero (principios de mayo) enfrentaba problemas que eran una herencia del siglo XIX: el movimiento browniano. Einstein lo cerraba de una vez por todas y predecía, entre otras cosas, que el movimiento errático de las partículas suspendidas en el agua se debía al golpeteo de miles de moléculas (de agua) y debía poder observarse en un microscopio. Para muchos fue *este* trabajo el que convenció a todo el mundo de la existencia efectiva de átomos y moléculas, un tema que se discutía desde los tiempos de Dalton.

El cuarto (fin de junio) abordaba el problema planteado por el experimento de Michelson y Morley, aunque sus autores no son citados para nada en el trabajo, y tenía un título en apariencia abstruso: «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», pero en la historia y la ciencia, quedaría con un nombre mucho más sonoro y elocuente: Teoría de la Relatividad.

En su trabajo, Einstein enfrentaba los problemas del movimiento absoluto, el electromagnetismo y sus derivados con una solución original y una visión del mundo radicalmente distinta a la que había reinado hasta entonces.

11 Véase en este mismo volumen el artículo de Pablo Rodríguez, «Los inicios de la Física Cuántica y el problema de su interpretación» (*comps.*).

I.d. La Teoría de la Relatividad Especial

Durante esos años de preparación, Einstein había reflexionado cuidadosamente sobre los conceptos corrientes de espacio y tiempo y había llegado a la conclusión de que era necesario revisarlos.

Ahora: reformar las ideas sobre el espacio y el tiempo era iniciar una revolución conceptual (de la misma manera que revisar las ideas de espacio y tiempo medievales había llevado a la construcción de la ciencia moderna). El espacio físico y el tiempo matemático newtonianos presuponían que existían intervalos espaciales, lapsos temporales, masas y energías idénticos para todos los observadores («objetivos», si se quiere): existía un reloj que daba la hora universal; un segundo era un segundo y un metro era un metro, en cualquier lugar y momento del universo. El espacio, por su parte, estaba uniformemente lleno de éter inmóvil, en reposo absoluto, y *dentro* del espacio sucedían los fenómenos.

Espacio, tiempo, masa y energía por un lado, previos a los fenómenos, que eran independientes de ellos: era éste el escenario epistemológico y metafísico que había permitido construir el magnífico edificio de la física y dar cuenta de todos los eventos conocidos (aunque, a decir verdad, no de la falta de «arrastré de éter» en el experimento de Michelson y Morley). Tampoco, en realidad, de un desconcertante comportamiento del planeta Mercurio: su perihelio —el punto de su órbita más cercano al Sol— se desplazaba 42 segundos de arco por siglo, un desplazamiento que no surgía de las ecuaciones de Newton. Durante un tiempo se especuló con la existencia de un planeta —al que incluso se puso nombre, Vulcano— entre Mercurio y el Sol, que con su gravitación era el responsable del movimiento del perihelio, pero nunca se lo encontró. De cualquier manera, eran fenómenos laterales.

Einstein barre este plácido y hasta cierto punto seguro paisaje tan bien establecido y al que dos siglos de funcionamiento no habían logrado desgastar. Rompe con la idea de un tiempo único y un espacio único: no hay un reloj idéntico para todos los observadores, que serán incapaces de ponerse de acuerdo sobre la marcha de los relojes, las duraciones de tiempo y las distancias: cada observador tendrá su reloj y su regla de medir y no valen más unas que otras. El espacio y el tiempo empiezan a estar atados a los fenómenos y a depender de ellos.

Sólo habrán de coincidir en una cosa los observadores: el valor de la velocidad de la luz en el vacío, idéntico para todos. «Introduciremos (un) postulado, a saber, que la luz se propaga siempre en el espacio vacío con una velocidad que es independiente del cuerpo emisor» (Einstein, 2005a).

La luz siempre viaja a la misma velocidad en el vacío y así la miden todos los observadores, independientemente de sus diferentes sistemas de referencia inerciales (en movimiento relativo y uniforme). Era mucho decir: si se piensa que si alguien va corriendo a doscientos mil km/s al lado de un rayo de luz que se mueve a 300 mil km/s, no lo ve moverse a cien mil (como ocurriría en un marco newtoniano), sino a 300 mil. Y en el improbable caso de que alguien pudiera correr a la misma velocidad de la luz, no la vería quieta, sino moviéndose ¡también a 300 mil km/s!

Pero el principio de constancia de la velocidad de la luz implica abandonar la idea de un tiempo único. Imaginemos, dice Einstein que hay un tren en marcha a muy altas velocidades y un observador situado en el medio de un vagón lanza dos rayos de luz simultáneos hacia las puntas del vagón, provistas de células fotoeléctricas; verá que ambas se abren al mismo tiempo.

Un observador fuera del tren, en cambio, verá una cosa muy distinta. Puesto que la velocidad de la luz *no* es modificada por el movimiento del tren (como sí lo sería en el sistema newtoniano) verá que la puerta trasera se acerca al rayo y la delantera se aleja, y por lo tanto, para él la trasera se abrirá antes y la delantera después.

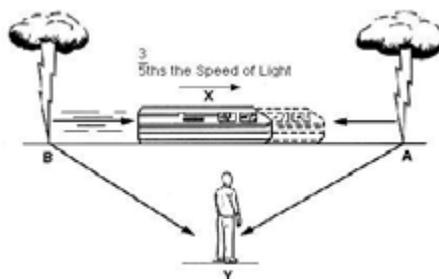


Figura 1.

Esto es: lo que para el observador en el tren es simultáneo, para un observador externo no lo es. Pero no es que un «tiempo» sea más verdadero que el otro. Razonamientos similares llevan a la conclusión de que, para quien mira desde afuera, los intervalos de tiempo son más largos dentro del tren y las distancias más cortas. En su trabajo de 1905, Einstein extiende el principio de relatividad a toda la física:

los infructuosos intentos de detectar un movimiento respecto al éter lumínico, llevan a la conjetura de que ni los fenómenos de la mecánica ni los de la electrodinámica (el electromagnetismo) tienen propiedades que correspondan al concepto de reposo absoluto... Elevaremos esta conjetura (cuyo contenido será denominado en adelante «el principio de relatividad») al estatus de un postulado. (Einstein, 2005a)

Es decir, *ningún* experimento, ni mecánico, ni electromagnético, ni óptico (ni de ningún tipo) permite distinguir entre el reposo y el movimiento (rectilíneo y uniforme). Es decir, Einstein incorpora el electromagnetismo al principio de Galileo. Las leyes de la física (y no sólo las de la mecánica) son idénticas y tienen la misma formulación en todos los sistemas de referencia. Lo cual vale para las ecuaciones de Maxwell y para toda otra ley. Por eso el experimento de Michelson y Morley no había detectado ningún viento de éter, ni retraso en los rayos de luz: el principio de relatividad lo prohibía.

En cierta forma, la Teoría de la Relatividad establece que los movimientos son relativos, pero las leyes (y la velocidad de la luz en el vacío) son absolutas. Es casi una teoría del absoluto más que una teoría de lo relativo. Lo que ocurre es que el postulado de invariancia de la velocidad de la luz transforma en relativas otras magnitudes: los intervalos de tiempo, los intervalos espaciales y la masa. El espacio y el tiempo se mezclan en un continuo espacio temporal de cuatro dimensiones, en el que el valor de metros y segundos depende de los sistemas de referencia.

Piénsese en la obra de demolición de este muchacho: ha destruido el espacio y el tiempo absolutos de Newton, ha extendido los principios de la relatividad a todos los fenómenos y ha establecido —eso sí— la velocidad de la luz como absoluta e idéntica para todos los observadores y como la velocidad tope a la que se puede mover cualquier objeto material o que transporte información.

I.e. $E=MC^2$

En septiembre de ese mismo año, Einstein presentó un nuevo trabajo (el quinto de esa gloriosa seguidilla) donde aborda el problema de la materia y la energía en el marco de la relatividad, «¿La inercia de un cuerpo depende de su contenido de energía?» (Einstein, 2005a). Del mismo modo que el espacio y el tiempo se combinan en un continuo espacio-tiempo; lo que percibimos como materia o como energía son distintos aspectos de un mismo fenómeno, de un continuo de materia y energía, y su equivalencia está dada por la famosa fórmula:

$$e = mc^2$$

Cuando estalla una bomba atómica, parte de la masa de los átomos de uranio que se fisionan se transforma en energía, en la muchísima energía que se esconde en un poquito de materia: si un kilo de masa (aproximadamente un litro de agua) se transformara *por completo* en energía, alcanzaría para mantener encendidas diez bombitas de cien vatios durante *un millón de años*.

Así, la teoría especial de la relatividad modifica la ontología del mundo newtoniano que presentaba un escenario: el tiempo absoluto y matemático fluyendo sobre el espacio absolutamente inmóvil y *dentro* de ese escenario, la materia y la energía, como fenómenos diferenciados. Para la Teoría de la Relatividad, la masa no es sino una forma más de la energía. Einstein destruyó el espacio y el tiempo absolutos y también la separación entre materia y energía. La revolución relativista es una revolución ontológica, ya que cambia la clase de objetos que existen en el mundo y que son pasibles de reflexión científica. Era un nuevo sacudón, probablemente sólo comparable al que había producido Newton 200 años antes.

¿Y el éter? Su sentencia de muerte fue pronunciada tajantemente por Albert Einstein en «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento»: «La introducción de un éter lumínico se mostrará superflua, puesto que la idea que se va a introducir aquí no requiere de un espacio en reposo absoluto dotado de propiedades especiales.» (Einstein, 2005a).

Después de haber trabajado esforzadamente durante dos mil años, llenando el espacio y manteniéndose inmóvil (en reposo absoluto) siendo soporte de todo aquello que se desconocía, el éter fue relegado al desván de las sustancias que nunca existieron.

Salvo por un puñado de físicos, la Teoría de la Relatividad no fue aceptada de inmediato. Era demasiado audaz, demasiado imaginativa, rompía demasiado con conceptos bien establecidos, en especial con la sacralidad del tiempo y el espacio, esas intuiciones puras del entendimiento que Newton había elevado al más alto sitio: el espacio inmóvil como marco general y escenario global dentro del cual suceden los fenómenos, y donde una distancia siempre es la misma distancia. Por otro lado, en ese espacio transcurría también un tiempo absoluto, matemático y universal; tanto el espacio como el tiempo eran entidades independientes de los fenómenos y resultaba inconcebible que las cosas fueran de otra manera. Es ahí donde la Teoría de la Relatividad introduce una ruptura metafísica: según Einstein, el espacio y el tiempo se amalgaman en algo distinto, el «espacio-tiempo», que depende de los observadores: dos sucesos que son simultáneos para uno de ellos, puede no serlo para el otro, y lo mismo ocurre con las duraciones y longitudes: un segundo no necesariamente dura lo mismo para dos observadores diferentes. El reloj que da la hora para todo el universo ha dejado de existir. Situación que se agudizará en 1915 con la Teoría General de la Relatividad (básicamente una teoría de la gravitación), donde la geometría misma del espacio-tiempo

depende de la estructura de los fenómenos, en especial de la distribución de la masa y la energía, capaz de curvar el espacio y hacer que el tiempo modifique su transcurrir.

El lugar del absoluto, a partir de 1905, retrocede una vez más (como lo venía haciendo desde los tiempos de Copérnico) y se refugia en dos recovecos. Uno, la velocidad de la luz, que a diferencia de los segundos y los metros es exactamente la misma para todos los observadores, y el otro, las leyes de la naturaleza que también tienen exactamente la misma forma para todos los observadores.

Pero la Relatividad Especial de 1905 no tenía correlato experimental posible (ya que los efectos relativistas sólo son medibles a velocidades muy altas), y no pasaba de ser una apuesta teórica, aunque hoy en día la dilatación temporal ya se ha medido y comprobado experimentalmente en laboratorios y ciclotrones.

I.f. La Teoría de la Relatividad General

La Teoría de la Gravitación Universal de Newton tenía un único inconveniente: la acción a distancia. La fuerza de gravedad actuaba de manera instantánea, atravesando el vacío. Emanaba del Sol, de la Tierra o de cualquier objeto, y aferraba los cuerpos sin intermediarios. ¿Cómo era posible? Los cartesianos no podían aceptar tal cosa y Leibniz se quejó de que en la construcción de una ciencia mecánica se introdujera lo que él llamaba contrabando metafísico (Leibniz, 1946). La Relatividad Especial, por su parte, estaba restringida a los movimientos rectilíneos y uniformes. A partir de su publicación, Einstein se dedicó a trabajar para extender el principio de relatividad a todos los movimientos (acelerados, rotatorios) y a los campos gravitatorios. La gravitación era todo un problema para la relatividad especial, ya que la imposición de la velocidad de la luz como velocidad tope chocaba con la idea de la gravitación newtoniana que actuaba de manera instantánea (es decir, con velocidad infinita), en una flagrante violación del principio de relatividad.

Necesitó diez años. Diez años de tentativas y fracasos. Recién en 1916 publicó la Teoría de la Relatividad General, bastante más compleja que la Teoría Especial, que extiende el principio de relatividad a *todos* los sistemas de referencia. Y en la que, además, se formula una nueva teoría de la gravitación (Einstein, 2005b).

La gravitación newtoniana era una fuerza que emanaba de los cuerpos y se propagaba instantáneamente; la gravitación que surge de la Teoría General es una deformación del espacio y el tiempo por efecto de las masas: el Sol, por ejemplo, curva y modifica el espacio y el tiempo a su alrededor, de la misma forma que una piedra situada en el centro curvaría un mantel sostenido sólo desde las puntas, haciendo que todo objeto caiga hacia la hondonada central como si fuera atraído por una fuerza que emanara de ella.

Si, de repente, apareciera una masa de la nada, en la teoría newtoniana también aparecería una fuerza de gravedad que, instantáneamente llegaría hasta los confines del universo; según la Teoría General, al surgir una masa se altera la geometría del espacio tiempo, se modifican las distancias y los intervalos de tiempo alrededor de esa masa y las modificaciones se expanden con la velocidad de la luz.

Las masas alteran el espacio y el transcurrir del tiempo: los segundos se vuelven más largos en presencia de un campo gravitatorio; un reloj en la superficie del Sol marcha más despacio que en la Tierra, y en el borde de un agujero negro se detendría.

Otra vez era mucho decir. Y, para colmo, todo esto todavía tenía que ser comprobado.

l.g. El eclipse

Tal como había ocurrido con Newton y el cometa Halley, fue un fenómeno celeste el que terminó por darle la razón a Einstein. Hacia 1916, ambas Teorías de la Relatividad (tanto la general como la especial) eran «teoría pura», no proponían ningún experimento que pudiera comprobar empíricamente lo que estaba diciendo, más allá de que solucionaran los problemas derivados del experimento de Michelson-Morley y el del perihelio de Mercurio. Al fin y al cabo, los efectos relativistas sólo se perciben a velocidades muy próximas a la de la luz, que en aquella época era por completo imposible de alcanzar experimentalmente. Un coche que corre a doscientos kilómetros por hora se «contrae» menos de una milésima de milímetro. Para que la longitud de un cuerpo se reduzca a la mitad, debe moverse a nada más y nada menos que... ¡262 mil kilómetros por segundo!

Al final de su trabajo sobre la masa y la energía de 1905, Einstein señalaba: «No hay que descartar la posibilidad de poner a prueba esta teoría utilizando cuerpos cuyo contenido en energía es variable en alto grado (por ejemplo, sales de radio)» (Einstein, 2005a).

Esperaba que se pudiera detectar la variación de masa que tenía que acompañar a la emisión radiactiva, también fuera del rango experimental por ese entonces. También proponía la verificación experimental de la relatividad general. Puesto que las masas modifican la curvatura del espacio-tiempo, y el espacio se curva alrededor del Sol, la luz debe seguir trayectorias curvilíneas

El rayo de luz de una estrella que pasa junto al Sol debe sufrir una desviación de 0,83 segundos de arco, y la distancia angular de la estrella respecto del Sol debe estar aumentada en esta cantidad.

Puesto que las estrellas fijas en regiones del cielo próximas al Sol son visibles durante los eclipses totales de Sol, esta consecuencia de la teoría puede compararse con lo observado en la experiencia (Einstein, 2005a).

Así, la Teoría General hace una predicción importante: si las masas modifican el espacio y el tiempo, las rectas que pasan cerca de grandes masas tienen que curvarse y los objetos deberían verse desplazados.

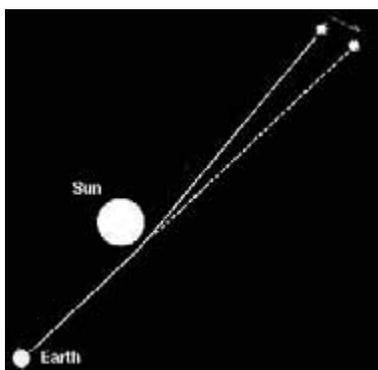


Figura 2. Relativistic light path bend (<www.astro.physics.sc.edu>)

Es lo que debería ocurrir con la luz proveniente de estrellas cercanas al Sol, pero no se podían observar bien justamente porque el Sol impedía que se vieran. Ahora bien: durante un eclipse, esto tenía que ser posible. Se aprovechó, por lo tanto, el eclipse total del 29 de mayo de 1919; dos expediciones británicas fotografiaron las estrellas próximas al Sol durante el eclipse desde una isla al oeste de África y desde Brasil.

El 6 de noviembre, en Londres se anunció que las observaciones confirmaban la predicción de Einstein. Al día siguiente, el *Times de Londres* lo publica en primera plana: «Revolución en la ciencia. Nueva teoría del universo. Las ideas de Newton destronadas». El 10 de noviembre se publican titulares en el *New York Times*: «La luz se curva. Triunfa la teoría de Einstein». De la noche a la mañana Einstein se convirtió en una celebridad mundial.

Curiosamente fue la Teoría de la Relatividad General la que pasó la primera prueba empírica en 1919, cuando durante el eclipse se pudo comprobar que la masa del Sol efectivamente curvaba los rayos de luz (es decir, curvaba las líneas rectas), y que el Sol no era un actor pasivo que actuaba dentro del espacio, sino que intervenía en la estructura del espacio-tiempo.

Pero hay algo más: las dos teorías, la especial y la general, le permitieron a Einstein imaginar un modelo global del universo: en contraposición al cosmos newtoniano infinito y abierto, imaginó un universo finito y cerrado sobre sí mismo. Finalmente, la cosa no resultó ser así, pero fue la primera reformulación a fondo desde la revolución científica del siglo XVII.

Y todo había empezado en 1905. Verdaderamente, se trató de un año milagroso. Como un mago, Einstein sacó de la galera al siglo XX.

l.h. ¿Fue un cambio de paradigma?

El estudio y la resolución de las ecuaciones de la Relatividad General muy pronto mostraron que daban cuenta del misterioso movimiento del perihelio de Mercurio, que se convertía así en una prueba más. Desde entonces, las confirmaciones han sido múltiples: el alargamiento de los intervalos de tiempo y el aumento de las masas se han verificado experimentalmente; la transformación de la masa en energía, en las bombas atómicas y las centrales nucleares; el desvío de la luz por galaxias en el curioso fenómeno de las «lentes gravitatorias».

La introducción de la relatividad también permitió establecer mejores modelos del átomo; la concepción relativista del mundo hizo pie en el fondo de la física (y de la filosofía).

La Teoría de la Relatividad, a pesar de no concordar con la mecánica newtoniana, no implica una ruptura tan grande como a veces suele creerse; se puede perfectamente entender como un refinamiento, como si Einstein le hubiera sacado un decimal más a la realidad.

De hecho, para velocidades bajas (típicas del mundo corrientes, y aún de los viajes a la Luna) no son necesarias las correcciones relativistas, que solo aparecen cuando las velocidades se aproximan a la de la luz (como ocurre en los grandes aceleradores de partículas, por ejemplo). Con Newton, se puede llegar a la Luna sin problemas.

Einstein fue, probablemente, el científico más importante del siglo XX y se convirtió prácticamente en el arquetipo del científico y del genio. La Teoría de la Relatividad es mucho más que una teoría: es una verdadera cosmovisión. El mundo de la física sintió el impacto: era la época de los grandes descubrimientos y la revolución relativista complementaba la otra revolución que recién empezaba: el descubrimiento del microcosmos atómico y nuclear.

La obra de Einstein está en la base misma de la física y de la ideología de nuestro tiempo. Fue la fórmula de Einstein sobre la equivalencia de la masa y la energía la que inspiró a Lise Meitner (1878-1968) para descifrar el misterio de la fisión del uranio. Fue el efecto fotoeléctrico descrito por Einstein en 1905 el que puso en marcha las ruedas de la mecánica cuántica. Y fue la Teoría de la Relatividad General de 1915 la que explicó la forma global del universo y permitió descubrir y en muchos casos prever fenómenos como la fuga de las galaxias, la expansión del universo, las lentes gravitatorias y los agujeros negros.

Y todo esto ocurría en las agitadas primeras dos décadas del agitado siglo XX. En una Europa en pie de guerra, que habría de vivir los horrores del nazismo (que, por su condición de judío, obligaron a Einstein a emigrar a Estados Unidos) el estalinismo y de las bombas atómicas, Einstein no se limitó a producir su revolución física (lo cual, dicho sea de paso, no habría sido poca cosa) sino que reflexionó e intervino sobre los problemas más acuciantes de la época.

II. Einstein, la política y la guerra

II.a. El programa nuclear alemán y la intervención de Einstein

Una mañana de julio de 1939, los físicos húngaros Leo Szilard y Edward Wigner salieron de su casa de Nueva York rumbo a Long Island, donde Albert Einstein estaba pasando sus vacaciones en una pequeña cabaña prestada y navegando las aguas del estrecho en un barquito de vela.

En 1938, y en base a los experimentos de Otto Hahn en Berlín, Lise Meitner había llegado a la conclusión de que el átomo de uranio se fisionaba, liberando una gran cantidad de energía, en forma de dos o tres neutrones que salían disparados a toda velocidad. Como enseguida se percataron los físicos, esos neutrones voladizos podían fisionar a su vez otros átomos de uranio, que liberarían neutrones y fisionarían otros nuevos, produciendo una reacción en cadena cuya consecuencia sería la liberación de enormes cantidades de energía.

Szilard (1898-1964), que era judío y había debido escapar de la barbarie nazi —como muchos otros— y que investigaba desde la Universidad de Columbia, pensaba no sólo en términos de reacciones en cadena: la liberación de energía por medio de la fisión nuclear también podía utilizarse para fabricar bombas. Y en ese caso, serían bombas nuevas, de un poder y una capacidad destructiva desconocida hasta entonces en la historia de la humanidad. Y sabía que si él podía pensar en eso, los físicos alemanes también. Un arma de ese tipo en manos del gobierno nazi significaría el fin.

El problema era, entonces, cómo llamar la atención del gobierno norteamericano (y del inglés) para adelantarse al programa nuclear alemán, aunque más no fuera para preservar las fuentes de uranio que —ya se podía estar seguro— era el material fisionable por excelencia y por lo tanto el combustible perfecto para una bomba atómica. Szilard empezó a conspirar para conseguir que las minas de uranio, situadas en el entonces Congo Belga —hoy Zaire— quedaran fuera del alcance de los alemanes. En realidad, se trataba de conseguir que los belgas no vendieran uranio a los nazis. «¿A través de qué canales», se preguntaba Szilard, «podríamos aproximarnos al gobierno belga?» Y ahí —por sugerencia de Edward Wigner— se le ocurrió recurrir a Einstein, a quien conocía desde sus tiempos en Berlín.

Ahora, Einstein no sólo era el físico de más renombre en el mundo entero, sino que era amigo personal de la Reina Madre de Bélgica, a quien había conocido durante una visita a Bruselas.

La Reina Elizabeth, madre de Leopoldo III de Bélgica, era un personaje muy particular. Había sido esposa de Alberto I, un rey muy popular porque en la Primera Guerra había luchado en el frente y luego liberalizado la política belga, instituyendo, entre otras cosas, el sufragio universal. Cuando murió en un accidente de alpinismo, ascendió al trono su hijo Leopoldo, de carácter bastante distinto, por cierto. Durante la Segunda Guerra Mundial, se rindió a los alemanes casi inmediatamente, cosa que la población nunca le perdonó, hasta el

punto que cuando volvió del exilio cuatro o cinco años más tarde, hubo motines populares que lo obligaron a abdicar en favor de su hijo Balduino.

Pero la Reina Elizabeth, de origen alemán, y descendiente de una rama menor de la casa de Baviera, era una persona curiosamente ilustrada, siempre rodeada por intelectuales y científicos, dedicada a las artes, y que instituyó los concursos musicales «Reina Elizabeth». Se explica por lo tanto su amistad con Einstein, a quien había conocido durante uno de los congresos Solvay. Desde entonces, el físico y la reina habían intercambiado numerosas cartas.

Y así fue como una mañana de julio de 1939, Szilard y Wigner salieron de Nueva York en busca del gran físico.

Curiosamente, Einstein no estaba muy al tanto de los últimos adelantos en física nuclear y Szilard debió explicárselos: que las reacciones en cadena, que los neutrones rápidos y lentos, que esto, lo otro y lo de más allá. Einstein oyó hablar —seguramente por primera vez— de la posibilidad de una reacción en cadena y de la liberación de grandes cantidades de energía.

Como lo había probado reiteradas veces sin duda, Einstein pensaba rápido, e inmediatamente se puso en tema (al fin y al cabo, la liberación de energía nuclear se producía según su propia fórmula $e=mc^2$). Reacciones en cadena, bombas, uranio, los alemanes: enseguida accedió a escribir una carta al embajador de Bélgica en Washington advirtiéndole sobre las minas de uranio congoleesas. También delineó, junto con Wigner y Szilard, un borrador, donde se informaba del asunto al Departamento de Estado norteamericano.

Ya de vuelta en Nueva York, Szilard empezó a pensar que necesitaba algún canal más directo con el gobierno norteamericano y a través de un conocido común se puso en contacto con Alexander Sachs, cabeza de una corporación bancaria de Wall Street, que tenía acceso directo a Franklin Delano Roosevelt, presidente de los Estados Unidos. Sachs, que estaba familiarizado con el asunto del uranio a partir de los informes públicos y periodísticos, sugirió olvidarse del embajador de Bélgica y las minas de uranio congoleesas, ir derecho al meollo del asunto y dirigir la carta de Einstein directamente al Presidente. Él —Sachs— se encargaría de llevársela.

Una mañana de agosto, Leo Szilard —esta vez con Edward Teller— salió nuevamente de su casa en Nueva York rumbo a Long Island, donde Einstein estaba pasando sus vacaciones en una pequeña cabaña prestada y navegando las aguas del estrecho en un barquito de vela.

Allí se escribiría el borrador de la carta en la que Einstein advertía a Roosevelt:

El trabajo reciente hecho por E. Fermi y L. Szilard (. . .) me conduce a creer que el elemento uranio puede transformarse en una nueva e importante fuente de energía en el futuro próximo. . .)

Este nuevo fenómeno podría conducir a la construcción de bombas y es concebible —aunque más incierto— que puedan fabricarse bombas extremadamente poderosas de un nuevo tipo. Una sola bomba de esta clase, llevada por un barco (sic) y detonada en un puerto podría perfectamente destruir el puerto entero junto con parte del territorio circundante. Sin embargo, esas bombas podrían ser muy pesadas para transportar por aire...

Tengo entendido que Alemania ha suspendido la venta de uranio de las minas checoslovacas que ha ocupado. Esta acción, probablemente debe ser entendida en el sentido de que el hijo del Viceministro de Relaciones Exteriores alemán, von Weizacker, fue asignado al instituto Kaiser Guillermo en Berlín, donde algunos de los trabajos norteamericanos sobre el uranio están siendo reproducidos (Albert Einstein (en Sánchez Ron, 1999).

La versión final de la carta tardó un poco. Le agregaron un memorándum (escrito por Szilard) con todos los detalles técnicos que Einstein, por razones obvias, no incluía. Alexander Sachs gestionó de inmediato una entrevista con Roosevelt. Y entonces, el primero de setiembre, Hitler invadió Polonia y estalló la Segunda Guerra Mundial.

Sachs no logró ver a Roosevelt hasta octubre: el 11 habló con él, pero ni la carta de Einstein, ni el agregado de Szilard, ni el informe verbal del propio Sachs tuvieron el efecto que el trío húngaro (Szilard, Wigner y Teller) y Sachs habían esperado. Todo lo que se logró fue conformar una Comisión Asesora sobre «el problema del uranio», lo mismo que los alemanes ya habían hecho seis meses antes. La carrera por la bomba había comenzado, pero con mucha burocracia y poco ímpetu: la carta de Einstein fue apenas un débil disparo de largada. Hay que tener en cuenta que los Estados Unidos no estaban todavía en guerra; era perfectamente natural que la bomba atómica interesara más a las potencias directamente involucradas: Francia, y, sobre todo, Inglaterra.

En realidad, aquella fue sólo la primera intervención de Einstein en el problema nuclear. Más tarde —el 7 de marzo de 1940— enviaría una segunda carta a Roosevelt para insistir y urgir la fabricación de la bomba nuclear. Y aún después, una tercera carta para pedir que la bomba no se arrojara sobre Hiroshima (Einstein, 1997).

Si se lo piensa fríamente, había buenas razones para temer que los alemanes fabricaran una bomba atómica, razones tanto históricas como científicas. Por empezar, la propia fisión del uranio se había producido por primera vez en un laboratorio alemán. Antes de la dispersión de científicos provocada por los nazis, Alemania era uno de los grandes centros de la física teórica, y aunque muchos se habían ido, quedaba un equipo de primera línea: Heisenberg, Otto Hahn, von Weizsäcker y Max von Laue, entre muchos otros. En realidad, los físicos de Alemania y los del campo aliado eran más o menos lo mismo: habían participado juntos de los años dorados, habían integrado los mismos equipos (como Lise Meitner y Otto Hahn), eran discípulos unos de otros (como Heisenberg de Bohr). Idéntica formación, idéntica información. ¿Por qué no habrían de planear y proyectar las mismas cosas? ¿Por qué no habrían de pensar en una bomba, si era una idea que prácticamente a todo el mundo se le había ocurrido apenas se descubrió la fisión?

Este era el razonamiento de Szilard. Y además, los alemanes sabían del programa inglés, y en Inglaterra sabían que los alemanes sabían. A pesar de que ya se empezaban a tomar las primeras precauciones, el asunto distaba de ser secreto: bastaba con leer el trabajo de Bohr y Wheeler (1939) «Los mecanismos de la fisión nuclear», publicado en la *Physical Review*. Y aunque fuera secreto —y algunas cosas empezaban a serlo— lo mismo que hacían unos, lo podían hacer los otros. Los físicos alemanes estaban en igual situación que sus colegas de Inglaterra y los Estados Unidos para comprender las consecuencias de la fisión y las posibilidades de construir una bomba. También tendrían las mismas dificultades, desde ya. Este era un razonamiento elemental. La verdad es que estaban dadas todas las condiciones para alarmarse. Nadie podía decir que Szilard —por lo menos en esto— fuera un paranoico; efectivamente, en setiembre de 1939, la Oficina de Guerra alemana convocó a una conferencia en Berlín, a la que asistió la primera plana de la física nuclear, donde se analizó el estado de la cuestión, se examinaron las probabilidades de fabricar un arma basada en la fisión y algunos de sus principales problemas: la separación de los isótopos del uranio —que Hahn puntualizó como de una dificultad extrema— y el uso de un moderador, que todos pensaban que tenía que ser agua pesada. En una segunda conferencia, desarrollada en setiembre, se delineó un Plan Preparatorio para explotar las consecuencias de la fisión nuclear. La dirección de

la investigación teórica estaría a cargo de Heisenberg. Los físicos se repartieron las tareas inmediatas: intentar la separación de los uranios (uranio 235 y uranio 238) y estudiar y ajustar el valor de las constantes nucleares fundamentales. Nada tiene esto de sorprendente, y no tiene nada de sorprendente que algunos de los físicos fuera de Alemania se asustaran.

Y eso que en 1939 nadie estaba demasiado seguro de que un arma atómica fuera realmente posible, aunque todos la tenían *in mente*. Szilard creía firmemente que sí y Joliot, en Francia, especulaba con el asunto. En Alemania, Weizsäcker lo había discutido con Otto Hahn. Pero otros dudaban. Frisch, por ejemplo, acababa de publicar un trabajo señalando la imposibilidad de obtener una reacción en cadena (Frisch; Meitner, 1939). El mismísimo Bohr, hasta bastante después, creyó que las armas nucleares eran imposibles.

Era 1939 y se iniciaba 1940; como una máquina difícil de detener, Alemania avanzaba sobre Europa, sembrando el terror y la destrucción.

También avanzaba en el camino de la bomba. Para los científicos alemanes, el primer paso era construir un reactor, y en eso estaban. El 6 de diciembre de 1939, Heisenberg envió sus primeras conclusiones a la Oficina de Guerra: el método más seguro para producir un reactor, era enriquecer el uranio 238, aumentando la proporción de uranio 235. Cuanto mayor fuera la proporción de uranio 235, menor tendría que ser el tamaño del reactor. El enriquecimiento, además, era también la única forma de producir explosivos de varios órdenes de magnitud más poderosos que los mayores explosivos conocidos hasta el momento. Era necesario, naturalmente, conseguir un moderador adecuado: «tal vez agua pesada». Había otra alternativa, según puntualizaba Heisenberg: «grafito muy puro» (en Rose, 1998).

Al mismo tiempo, en Hamburgo se experimentaba con la separación de los uranios y se avanzaba en el otro punto crítico: el moderador. Los alemanes trataron de conseguir agua pesada, pero... ¿de dónde sacarla? La única fuente disponible era la fábrica Norsk Hydro, en Noruega, a la que ofrecieron comprarle 300 litros. Cuando Norsk Hydro —que era propiedad de capitales franceses— quiso saber para qué necesitaba Alemania semejante cantidad, no se le dieron explicaciones. Norsk Hydro rehusó venderla y —de paso— avisó a los aliados.

Nada de lo que se hacía en las otras potencias involucradas —o que estarían involucradas en la guerra— podía compararse. En la Unión Soviética, dos físicos del equipo de Igor Kurchatov, reportaban a la *Physical Review*, en junio de 1940, que habían observado una rara y espontánea fisión del uranio (Flerov; Petrzhak, 1940). En Japón, Takeo Yasuda, director del Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Aeronáutica, encargaba un informe sobre las posibles utilidades de la fisión nuclear, asunto que había seguido con interés desde su anuncio en 1939. Pero esos intentos japoneses y rusos no pasaban de balbuceos de laboratorio. No así los alemanes. En abril de 1940, el ejército nazi invadió Noruega, y la fábrica de agua pesada de Norsk Hydro cayó en sus manos.

Los físicos aliados estaban —o por lo menos tenían elementos para estar— al tanto. En los primeros meses de 1940, el danés Peter Deybe, premio Nobel de química 1936, que había dirigido un instituto de física en Berlín y debió dejarlo al ascender los nazis, visitó Columbia. Deybe habló con Fermi, y le contó que se había armado el grupo militar para trabajar en el Instituto Kaiser Guillermo.

Después, estaban las advertencias de Szilard. Mientras trabajaba en Chicago, avisó haber escuchado que el físico G. Dessauer había llegado de Alemania a Suiza con una advertencia sobre el programa nuclear nazi. Además hubo un mensaje de Houtermans, un físico alemán

brillante, que había sido amigo de Otto Frisch y que —fiel a sus convicciones comunistas— en 1933 emigró a la Unión Soviética, donde la pasó bastante mal.

En julio de 1940, los alemanes, comenzaron a construir un laboratorio en terrenos del Instituto Kaiser Guillermo, en Berlín, que estuvo terminado en octubre y se denominó Virus Haus, donde enseguida empezó la búsqueda de un moderador adecuado. En 1941, Houtermans escribió un informe donde trataba la cuestión de una reacción en cadena rápida, la masa crítica, el uranio 235, la separación de los uranios y el elemento 94 —que más tarde se llamaría plutonio— (en Irving, 1967) y discutió sus ideas sobre el asunto con Heisenberg (el informe de Houtermans sobre el plutonio probablemente detuvo el programa de separación de los uranios).

Además, se sabía que los alemanes acumulaban uranio, y nadie olvidaba el intento de compra de agua pesada a Noruega. No era paranoia. En realidad, al comenzar la guerra, los físicos alemanes estaban muy a la par de sus colegas británicos y norteamericanos. Pero cometieron un error fatal (midieron mal la sección eficaz del carbono) que los alejó del camino hacia la bomba.

Los aliados no lo sabían. Pero lo que sí sabían era que —más allá de las dificultades teóricas— construir una bomba antes del fin de la guerra requería un esfuerzo nacional, algo así como acumular una masa crítica de científicos que trabajaran a marchas forzadas y con buena voluntad para los Estados Unidos, como ya había dicho Fermi a Deybe, era necesario evitar la dispersión, concentrar dinero y materia gris. Fue exactamente lo que hicieron.

La carta enviada por Einstein a Roosevelt no surtió el efecto esperado: la decisión de comenzar seriamente, con apoyo gubernamental, el trabajo en la construcción de un arma atómica, se atascaba una y otra vez en meandros burocráticos. Alexander Sachs, asesor de Roosevelt, el mismo que alcanzó al presidente la primera carta de Einstein, se desesperaba por convencerlo. Un día, le relató la siguiente historia:

Durante las guerras napoleónicas, un joven inventor norteamericano se acercó al Emperador Francés y le ofreció construir una flota de barcos de vapor, con la ayuda de los cuales podría, independientemente del mal tiempo, invadir Inglaterra. «¿Barcos sin velas?» A Napoleón le pareció tan disparatado, que no hizo caso de la propuesta de Fulton, que así se llamaba el joven inventor. En la opinión del historiador inglés Lord Acton, éste es un ejemplo de cómo Inglaterra se salvó por la cortedad de miras de un adversario. Roosevelt permaneció un instante en silencio, y luego llamó a su asistente, el General «Pa» Watson: «Pa, esto exige acción» (en De Groot, 2004).

La anécdota es divertida pero las anécdotas son construcciones *a posteriori* y rara vez los hechos que las inspiran ponen en marcha la historia. Por supuesto, esta no fue la excepción. La única respuesta a la escena anterior fue débil: la creación de un Comité Asesor sobre el Uranio. El paso siguiente se dio recién en junio de 1940, con la creación del National Defense Research Committee (NDRC), impulsado por Vannevar Bush, que se ocupó de involucrar a los principales científicos en el Comité del Uranio, una de las dependencias del nuevo NDRC. Pero aún no parecía haber esperanzas de obtener fondos gubernamentales para la «acción». Solo en julio de ese año, al recibirse los informes de los progresos del desarrollo atómico británico, el interés norteamericano creció.

Además, estaban las advertencias sobre el desarrollo atómico alemán. Todo indicaba que hacía falta apurarse.

En julio de 1941, un memorándum de la Comisión, basándose en el trabajo desarrollado en Inglaterra, declaraba que parecía «muy probable que la bomba atómica pudiera ser

construída antes del fin de la guerra». El 28 de junio, también por iniciativa de Bush, se constituyó un nuevo comité: la Office of Scientific Research and Development (OSRD).

Pero la decisión final fue tomada por Roosevelt recién el 9 de octubre de 1941: ese día resolvió, finalmente, usar la enorme masa de recursos que hacían falta para construir *el arma más poderosa que jamás existió*. Era muy oportuno: un mes y medio más tarde, el 7 de diciembre, los japoneses bombardeaban Pearl Harbor, y los Estados Unidos entraron en la guerra.

Como es natural, la guerra aceleró todo. En los EE.UU. el control fue depositado en manos de un Comité Militar, compuesto por tres miembros de las fuerzas armadas (el General Styers, el Almirante Purnell y el General Leslie Groves) y solamente dos científicos profesionales: Vannevar Bush y James Conant. El proyecto empezó a denominarse DSM (Desarrollo de Materiales Sustitutos) o, más familiarmente, Proyecto Manhattan, por una oficina, precisamente en Manhattan, donde se tomaron las primeras decisiones fundamentales.

El Proyecto Manhattan fue una vasta y compleja organización, que involucró alrededor de 150 mil personas, que costó alrededor de dos mil millones de dólares de la época (que obviamente son muchísimo más que dos mil millones de ahora), que construyó una verdadera «ciudad atómica» en Los Alamos (Nuevo México), y que estaba decidida a fabricar, en tres años, la bomba atómica. Se impuso un estricto sistema de censura (los residentes de Los Alamos, por ejemplo, no podían enviar ni recibir cartas que no pasaran por las manos del censor, ni hablar de su trabajo a sus esposas, ni a nadie). En principio, la mayoría de los que integraban el proyecto ignoraba el fin del mismo, aunque es de suponer que el rumor, siempre más poderoso que la censura, hiciera de las suyas en esa ciudad que se levantó en medio del desierto, y a cuyo mando científico se puso, en julio de 1943 a un físico llamado Robert Oppenheimer. Bajo su dirección, Los Alamos (y el resto de los laboratorios del Proyecto) trabajaron con un ritmo sostenido: el 16 de julio de 1945 la bomba estaba lista para ser probada.

En la primavera de 1945, un grupo especial dentro del proyecto Manhattan se dedicó a elegir un blanco para el primer lanzamiento: las ciudades que se designaron como posibles blancos fueron Hiroshima, Kokura, Nigata, Nagasaki y Kyoto, la ciudad japonesa de los templos. Finalmente, Kyoto se tachó de la lista, pero las otras fueron cuidadosamente mantenidas aparte de los bombardeos. Se entiende: el lanzamiento de la bomba atómica, la prueba de la nueva arma, debía hacerse sobre una ciudad intacta.

Hiroshima —cuenta Tomás Eloy Martínez— era como una mano, con seis flacos dedos de agua y estaba situada al centro del golfo de Setoi, entre dos poblaciones menores, Otake y Kure. Hacia 1594, los adivinos del príncipe Mori Terumoto aplicaron la quiromancia para desentrañar el porvenir de la aldea, poblada entonces por ciento veinte familias de pescadores: le presagiaron una vida larga y sin zozobras (Eloy Martínez, 1979).

El 30 de junio de 1945 los habitantes eran poco más de doscientos cuarenta y cinco mil. Alemania ya se había rendido, y Japón —la única de las potencias fascistas aún en guerra— penosamente se retiraba de los territorios ocupados; los aliados habían recuperado las Filipinas, y se combatía tenazmente en Okinawa. La aviación japonesa estaba destruida y la economía del Japón estaba en ruinas. Muchas ciudades japonesas —como Tokio—, habían sido fuertemente bombardeadas.

Pero sobre Hiroshima no había caído bomba alguna, o tan pocas, que parecían haber sido arrojadas por error.

En realidad, la suerte estaba echada, y Japón no tenía ninguna posibilidad; los altos estratos de gobierno lo sabían. Los rusos, además, aunque formalmente neutrales, preparaban la invasión a Manchuria: dos millones y medio de soldados soviéticos se agitaban en la frontera china. El gobierno japonés inició un discreto movimiento para que el gobierno ruso actuara como mediador ante los aliados y pidiera la paz. Pero en la oferta japonesa no figuraban las palabras «rendición incondicional», que exigían las potencias occidentales. El partido militarista, por su parte, presionaba al Emperador Hirohito para que siguiera la lucha.

Minutos antes de las tres de la mañana del 6 de agosto de 1945, el Enola Gay, bombardero B-29 de la Fuerza Aérea norteamericana, despegó de la base situada en Tinian, en las islas Marianas. Estaba ligeramente sobrepasado en peso: a bordo llevaba a «Little Boy», una de las tres bombas atómicas fabricadas por los Estados Unidos. Era un artefacto de más de cuatro toneladas —el avión estaba tan sobrecargado que a duras penas pudo levantar vuelo—, tres metros y medio de largo y unos setenta y cinco centímetros de diámetro. Había sido transportada desde los Estados Unidos a Tinian por partes —en un acorazado pesado y varios aviones— y recién en pleno vuelo se agregaron los explosivos que empujarían una parte del uranio sobre la otra para desencadenar la explosión.

A las 8.40 el Enola Gay se acercó a Hiroshima, volando a unos cinco mil metros de altura; ningún avión japonés trató de interceptarlo ni recibió fuego antiaéreo. Poco después de las nueve, el Enola Gay dejó caer la bomba e inmediatamente se alejó para escapar del fuerte impacto convectivo de la explosión. Cuarenta y tres segundos más tarde, la bomba atómica explotó, a seiscientos metros de altura sobre el hospital Shima, con una potencia equivalente a 12500 toneladas de TNT.

«Era temprano, la mañana parecía quieta, cálida y bella», comienza el diario de Michihiko Hachiya, médico del hospital de Comunicaciones de Hiroshima (Hachiya, 2005).

Yo me había levantado de una silla para hablar por teléfono —contó el señor Michiyoshi Nakushina, que era un comerciante en saké en 1945—. La casa quedó llena de un fuego amarillo y el fuego se volvió después azul, y el azul se hizo rojo hasta que la ciudad tan clara y sin nubes esa mañana, se hundió de pronto en una noche sucia... Cuando miré hacia el cielo —recuerda una chica que tenía 5 años aquel 6 de agosto— vi un estallido de luz blanca y el verde de las plantas, envuelto en esa luz, las hacía parecer hojas secas (en Eloy Martínez, 1979)

Pero acompañando a ese estallido de luz, hubo un estallido de calor; la temperatura en las inmediaciones de la explosión se elevó de tal manera, que una enorme lengua de fuego envolvió a la ciudad: los pájaros, los insectos y las personas situadas cerca del epicentro de la explosión se carbonizaron en el acto.

En sólo un instante, la ciudad entera se convirtió en un montón de ruinas. A los 30 minutos de la explosión se inició el incendio con una tormenta de fuego que alcanzó una velocidad de 18 metros por segundo en dos o tres horas. Entre las 11 de la mañana y las tres de la tarde un violento torbellino avanzó desde el centro de la ciudad hacia la parte norte hasta última hora de la tarde. En un radio de dos kilómetros de la explosión todo había quedado destruido por el estallido y en un radio de trece kilómetros, todo lo que había fue arrasado por la tormenta de fuego. Entre las 9 de la mañana y las 4 de la tarde empezó a caer una lluvia negra con materiales radiactivos.

El número de víctimas fue aterrador. Fueron afectadas directamente 350 mil personas, entre la población estable y la transitoria, entre la que había prisioneros coreanos llevados para el trabajo obligatorio en Japón. Para el 31 de diciembre habían muerto 140 mil personas, ya fuera a causa de radiación o de la onda de calor de tres a cuatro mil grados en el

centro de la explosión y 570 grados a un kilómetro de distancia, que produjo quemaduras gravísimas. Quienes estaban bajo el punto de la explosión quedaron reducidos a cenizas instantáneamente. Ese día en Hiroshima hacía calor y la gente estaba vestida con ropas ligeras, por lo cual la explosión actuó sobre la piel desnuda.

Los que fueron lesionados por las radiaciones sufrieron depresión de la médula ósea, falta de glóbulos blancos, desprendimiento de cabellos, náuseas, vómitos, aunque los testimonios son confusos, ya que los moribundos muchas veces no estaban en condiciones de describir sus síntomas.

La situación empeoró aún más porque la mayoría de los establecimientos hospitalarios estaban cerca del centro de la ciudad y fueron arrasados por el estallido. Mucha gente pereció en el caos generado, y en las filas de gente que huía del avance de las lenguas de fuego buscando desesperadamente refugio en el agua. De 76 mil edificios que había en Hiroshima, setenta mil fueron dañados (48 mil por completo).

No hay estimaciones exactas de la cantidad de muertes, dado que muchas se produjeron después, debido a efectos secundarios de la radiación. La tasa de muerte por la explosión fue del 54 por ciento; hacia fines de 1945, la cantidad de muertos se estimó en ciento cuarenta mil. A los cinco años, las muertes debidas a los efectos secundarios de la bomba —principalmente leucemia— podían estimarse en doscientos mil. Sin contar los heridos, quemados y mutilados y los que más tarde fueron afectados por distintos tipos de cáncer. Cerca del epicentro, en algunas paredes que se conservaron en pie, quedaron registradas las sombras de las personas que fueron evaporadas por el calor —varios millones de grados— de la explosión.

El gobierno japonés no reaccionó inmediatamente: la destrucción de Hiroshima había sido tan completa que las noticias tardaron un día entero en llegar al Palacio Imperial y al Alto Mando. Nuevamente se reanudó la lucha de fracciones; mientras el emperador quería la rendición, el partido militar no se tomaba muy en serio la nueva arma y proponía una resistencia prolongada. El 9 de agosto, Fat Man, una segunda bomba atómica —esta vez de plutonio— estalló sobre Nagasaki matando a setenta mil personas.

Ante lo cual el emperador Hirohito tomó su decisión independientemente de los comandos militares, y a través de Suiza, hizo una oferta de paz aceptando los términos de la declaración de Postdam: esto es, rendición incondicional. La Segunda Guerra Mundial había terminado.

Detrás, quedaban las ruinas humeantes del desastre, los campos de concentración, las cámaras de gas, las ciudades en ruinas, los pueblos desarticulados, las economías europeas destruidas, las masacres de Manchuria e Hiroshima.

En el desierto de Nuevo México, la explosión de Trinity (la primera explosión nuclear experimental) y el hongo nuclear de malvada belleza, podía considerarse un triunfo del intelecto humano: «física grandiosa», como había dicho Fermi alguna vez. La destrucción de Hiroshima, las personas quemadas y vagabundeando aterrorizadas con su piel a cuestras, las pieles ennegrecidas, eran ya otra cosa muy distinta. Para el imaginario colectivo, desde el fondo de la materia, el Mal había irrumpido en este mundo.

III. Finale

La actividad científica de Einstein fue escasa luego de la formulación de la Teoría de la Relatividad General. Se podría decir que, en realidad, en tiempos de intensa agitación

bélica, donde se estaba definiendo el mapa y el futuro del mundo, Einstein se limitó a intervenir políticamente enviando sus famosas tres cartas. Lo cierto es que, a partir de la Relatividad General, Einstein había tomado, en el campo de la física, un camino sin salida: la teoría del campo unificado que pretendía, justamente, unificar la mecánica, la gravitación y el electromagnetismo. Aunque en ese momento podía parecer razonable, más tarde se probó que no lo era, en especial porque se descubrieron otras dos fuerzas de la naturaleza (la nuclear fuerte y la débil). Otro de los puntos que destacan la labor de Einstein post-Relatividad general fue su polémica con Bohr sobre la mecánica cuántica y el principio de incertidumbre (en los cuales Einstein nunca creyó del todo y contra los cuales ideó experimentos mentales que, una y otra vez, eran refutados por Bohr desde lo que se llamó la «interpretación de Copenhagen» de la mecánica cuántica). Esta última prescindía de la naturaleza de los fenómenos cuánticos y ponía el acento en el éxito del modelo explicativo (que, verdaderamente, describía los fenómenos atómicos a la perfección). De esa discusión se desprende la famosa frase einsteniana de que «Dios no juega a los dados» y la sugerencia de Bohr: «Einstein: deja de decirle a Dios lo que hacer (con sus dados)» (en Hoffmann, 1985).

En el campo político, Einstein siguió proclamando su pacifismo en medio de la Guerra Fría. Se ha vuelto ya célebre su premonitoria frase: «No sé con qué se peleará la Tercera Guerra Mundial, pero sé que la cuarta se hará con palos y piedras». Entre otras cosas, también rechazó el ofrecimiento que se le hizo de ser presidente del recién fundado Estado de Israel.

La salud de Einstein se fue deteriorando hacia el año 1950. Murió pacíficamente el 18 de abril de 1955, en Princeton.

IV. Bibliografía

- Bohr, N. y Wheeler, J. A. (1939), «The mechanism of nuclear fission», en *Physical Review*, 56, 5, pp. 426-450.
- Boudenot, J. C. (2005), *Comment Einstein a changé le monde*, París, EDP Sciences.
- De Groot, G. (2004), *The bomb: a life*, Londres, Jonathan Cape.
- Clark, R. (1971), *Einstein: The Life and Times*, Nueva York, The world publishing company.
- Einstein, A. (1971), *El significado de la relatividad*, Madrid, Espasa Calpe.
- _____ (2005a), *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*, Princeton, Princeton University Press.
- _____ (1997), *Letters to President Franklin Delano Roosevelt*, disponible en <<http://hypertextbook.com/world/einstein.shtml>> Consulta 08/10/2010.
- _____ (2005b), *Relativity. The special and general theory*, Nueva York, Pi Press.
- _____ (2004), *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, Madrid, Nívola Libros.
- Einstein, A. e Infeld, L. (1958), *La física, aventura del pensamiento*, Buenos Aires, Losada.
- Eloy Martínez, T. (1979) *Lugar común la muerte*, Caracas, Monte Ávila.
- Flerov, G. N. y Petrzhak, K. A. (1940), «Spontaneous fission of uranium», en *Physical Review*, 58, p. 89.
- Frisch, O. R. y Meitner, L. (1939), «Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction», en *Nature*, 143, 11, pp. 239-240.
- Geymonat, L. (1998), *Historia de la filosofía y de la Ciencia*, Barcelona, Crítica.

- Hachiya, M. (2005), *Diario de Hiroshima*, Madrid, Turner.
- Hawking, S. (1992), *Breve historia del tiempo*, México, Planeta.
- Hoffmann, B. (1985), *Einstein*, Barcelona, Salvat.
- Irving, D. (1967), *The German Atomic Bomb*, Nueva York, Simon and Schuster.
- Leibniz, G. W. (1946), *Teodicea: Ensayos sobre la bondad de Dios, la libertad del hombre y el origen del mal*, Buenos Aires, Claridad.
- Moledo, L. (2010), *De las tortugas a las estrellas*, Buenos Aires, AZ.
- _____ (2008), *Los mitos de la ciencia*, Buenos Aires, Planeta.
- Moledo, L. y Magnani, E. (2008), *Diez teorías que conmovieron al mundo*, Buenos Aires, Capital Intelectual.
- Moledo, L. y Rudelli, M. (1996), *Dioses y demonios en el átomo*, Buenos Aires, Sudamericana.
- Rose, P. L. (1998), *Heisenberg and the Nazi atomic bomb project: a study in German culture*, Los Ángeles, University of California Press.
- Sagan, C. (1982), *Cosmos*, Barcelona, Planeta.
- Sánchez Ron, J. M. (1999), *Como al león por sus garras. Antología personal de momentos estelares de la ciencia*, Madrid, Debate.

15. Los inicios de la Física Cuántica y el problema de su interpretación¹

I. Introducción

El adjetivo «cuántico» se asocia muchas veces con ideas referentes a una enorme complejidad matemática y a extraños fenómenos que ocurren al interior de los átomos. Se tiene la sensación de que no es una teoría física más, sino que representa un auténtico quiebre en nuestra forma de ver la realidad. Las consecuencias de la mecánica cuántica son generalmente contrarias a nuestra intuición pues contrastan con las nociones derivadas de nuestra experiencia macroscópica de la naturaleza. No en vano hubo que esperar más de un cuarto de siglo para que su formulación matemática fuera completa y aun hoy no hay acuerdo respecto de su interpretación filosófica. Un largo y complejo camino debió ser transitado por una gran cantidad de científicos —hecho relativamente extraño, pues las grandes teorías generalmente se asocian a un solo nombre— que sentaron las bases para una nueva comprensión de la naturaleza y de nuestra relación con ella.

La mecánica cuántica es una teoría física que surgió en el primer tercio del siglo XX como un formalismo matemático que brindaba una explicación de los fenómenos relacionados con la materia y la radiación en el dominio de los átomos, sus núcleos y partículas elementales constituyentes. El disparador histórico sería un complejo formado por diversos descubrimientos, observaciones e innovaciones teóricas, que acusaban la incapacidad de la física clásica para explicar ciertos fenómenos atómicos. Muchas nociones clásicas fueron conmovidas por una considerable cantidad de inquietantes enigmas, cuya solución condujo a un replanteamiento de los fundamentos de la física.

II. Surgimiento histórico de la Física Cuántica

El surgimiento histórico de la teoría cuántica se ubica en las dos primeras décadas del siglo XX, en la tercera queda plasmada en un formalismo matemático que, sufriendo algunas alteraciones, ha permanecido hasta nuestros días. Hacia fines del siglo XIX la comunidad de

1 Una versión preliminar y abreviada del presente artículo fue incluida en Rodríguez (2007).

físicos creía haber alcanzado una elucidación definitiva de la materia en la mecánica newtoniana² mientras que los procesos de radiación energética eran exitosamente explicados por la teoría electromagnética de Maxwell. La materia era concebida como compuesta por pequeños corpúsculos o partículas, cuyas propiedades —expresadas mediante magnitudes físicas interrelacionadas por las leyes de Newton— explican los movimientos de los cuerpos³. Por otra parte, Maxwell había formulado entre 1861 y 1864 una serie de ecuaciones que unificaban tres campos que hasta entonces estaban separados: electricidad, magnetismo y óptica. Según esta teoría, las radiaciones lumínicas o electromagnéticas en general (luz visible, rayos ultravioleta, rayos infrarrojos, etcétera) consistían en ondas electromagnéticas que se desplazaban a la velocidad de la luz. En resumen, en los fundamentos de la física de fines del siglo XIX se hallaba la creencia compartida de que la materia estaba compuesta por *partículas* y las radiaciones por *ondas* electromagnéticas.

II.a. La introducción de los cuantos

En la segunda mitad del siglo XIX muchos físicos trabajaban ciertos problemas referentes a los procesos de emisión y absorción de energía por la materia, otorgando especial importancia a la radiación emitida por un cuerpo caliente. La termodinámica era una de las ramas de la física que ocupó un lugar central en este proceso, especialmente la relación entre las leyes de la mecánica y la segunda ley de la termodinámica (reformulada como ley de entropía). Uno de los físicos que enfrentó el complejo problema de la distribución de energía en el espectro de la radiación térmica fue el alemán Max Planck.

La radiación térmica es emitida por un cuerpo cuando el calor producido por el movimiento oscilante de sus partículas constituyentes se convierte en radiación electromagnética. Es el caso, por ejemplo, de la radiación de un calefactor doméstico o de la luz emitida por una lámpara. La composición espectral —la forma en que la intensidad⁴ de la radiación depende de la frecuencia⁵ de la onda— de la radiación térmica depende en general de la temperatura absoluta y de la naturaleza del cuerpo emisor. Sin embargo, en el caso de la así llamada *radiación de equilibrio* —aquella en la que el cuerpo emite la misma cantidad de radiación que absorbe— la composición espectral no depende de las características del cuerpo sino únicamente de la temperatura del mismo. Tal es el caso del *cuerpo negro*⁶, un objeto ideal que se caracteriza por absorber toda la energía que incide sobre él (ninguna es reflejada o lo atravesada), y a su vez, emitir toda la radiación incidente desde el interior, manteniendo el equilibrio térmico. Si bien no existen cuerpos negros perfectos en la naturaleza, es posible realizar una simulación manejable en el laboratorio mediante una cámara con paredes impermeables al calor con una pequeña abertura en uno de sus lados. El estudio del espectro de frecuencias de su radiación y su relación con la temperatura se transformó en un problema crucial para la física

2 Presentada inicialmente por Isaac Newton a finales del siglo XVII, siendo posteriormente reformulada por Joseph Louis Lagrange en 1788 y William Hamilton en 1833.

3 Véase en este volumen el artículo de Andrés Terra, «Destejiendo el arco iris: una introducción a la ciencia newtoniana» (*comps.*).

4 La intensidad de una onda es el cuadrado de la amplitud de onda, que es el valor máximo que puede adoptar la misma.

5 La frecuencia es la velocidad de la onda dividida por su longitud. Esta representa el tamaño de la onda (la distancia entre dos valles o dos crestas), y es inversamente proporcional a la frecuencia.

6 El primer físico en utilizar la denominación «cuerpo negro» fue Gustav Kirchhoff en 1862.

de fines del siglo XIX. La imposibilidad de explicar el fenómeno apelando a las leyes clásicas se transformó en lo que llegó a ser conocido como el *problema de la radiación del cuerpo negro*.

Dada una temperatura es posible medir la energía que sale por la cavidad para cada frecuencia de la radiación electromagnética. De esa forma se obtienen experimentalmente gráficas que manifiestan un aumento de la intensidad con la longitud de onda hasta un valor máximo y, a continuación, disminuye al incrementarse la longitud de onda. Además, al aumentar la temperatura, el máximo aparece a una longitud de onda menor. El problema consistía justamente en obtener la repartición de energía correcta en el espectro de emisión del cuerpo negro mediante una fórmula derivada de las teorías clásicas del electromagnetismo y la termodinámica.

En 1894 el físico alemán Wilhelm Wien presenta una *ley de desplazamiento*, que muestra que es posible deducir la distribución espectral para cualquier temperatura a partir de la distribución para una temperatura dada (Wien, 1894).

$$E_{\lambda} = \lambda^{-5} \varphi(\lambda T)$$

(Siendo E_{λ} la emisión de radiación por intervalo de longitud de onda y $\varphi(\lambda T)$ una función de la longitud de onda y la temperatura). El máximo de emisión se desplaza hacia longitudes de onda más cortas a medida que aumenta la temperatura absoluta. Esta relación inversa entre la temperatura y la longitud de onda para los picos de energía es una de las más importantes consecuencias de la ley de distribución de Wien:

$$\lambda_{\max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{m}^{\circ} \text{K}$$

pues logra explicar los picos de intensidad a diferentes temperaturas y su relación con la longitud de onda, en acuerdo con las mediciones realizadas en la época. Sin embargo, mientras la ley de Wien parecía confirmada para longitudes de onda cortas, los nuevos experimentos realizados en 1900 por Otto Lummer y Ernst Pringsheim, así como más adelante en el mismo año por Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum, pusieron al descubierto desviaciones considerables para las longitudes de onda largas.

En la misma época Lord Rayleigh dedujo de la mecánica clásica aplicada a los osciladores del cuerpo negro una ley capaz de explicar los resultados para longitudes de onda largas (Rayleigh, 1900):

$$E_{\lambda} = \frac{8\pi k T}{c^3 \lambda^4}$$

El problema es que esta distribución hace que la energía aumente proporcionalmente respecto de la frecuencia, vaticinando que el cuerpo debería tener una emisión masiva de energía a longitudes de onda cortas. Este absurdo, que se contradecía con todos los experimentos realizados en la época, fue conocido posteriormente como *catástrofe ultravioleta*⁸, y sin embargo se derivaba de los principios más sólidos de la física clásica. Según el electromagnetismo el cuerpo negro debería emitir una cantidad de energía que tiende al infinito más allá de la zona ultravioleta del espectro. Sin embargo, en las gráficas experimentales la

7 Esta ley fue publicada en 1905 y corregida ese mismo año por James Jeans (razón por la cual es conocida como Ley de Rayleigh-Jeans), hecho que presta argumentos a aquellos que desestiman la importancia histórica de la misma para el surgimiento de la teoría cuántica.

8 Descubierta por Rubens y Curlbaum en el experimento anteriormente mencionado; el término fue acuñado 1911 por Paul Ehrenfest.

densidad de energía permanece siempre finita, y de hecho, tiende a cero para frecuencias de onda muy altas.

Planck había realizado una serie de intentos de derivar la ley de Wien sobre la base de la segunda ley de la termodinámica, pero enterado de los experimentos de Rubens y Curlbaum, debió modificarla para la región de bajas frecuencias de forma tal de representar el resultado matemáticamente. Ya en 1900 Planck crea un método para calcular la probabilidad de una determinada distribución de energía, basándose en la teoría cinética de los gases de Ludwig Boltzmann. De esta manera obtiene una nueva ley de distribución presentada ante la Sociedad Física Alemana en 19 de octubre del mismo año⁹:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

La distribución espectral se aproximaba a la ley de Wien en altas frecuencias de onda y a la vez coincidía con el espectro obtenido experimentalmente más allá de la región infrarroja. Tanto Rubens como Lummer y Pringsheim poco después, reconocieron la adecuación experimental de la ley de Planck.

La fórmula hace uso esencial de dos constantes universales: la primera de ellas es la llamada constante de Boltzmann (k), la segunda constante (h) sería conocida como constante cuántica o constante de Planck, cuyo valor es:

$$h = 6,6260693 \times 10^{-34} \text{ joules -segundo}$$

Según afirmaría posteriormente, *en un acto de desesperación*¹⁰, el 7 de octubre de 1900, consigue interpretar la constante h como un «cuanto elemental de acción» y presenta sus resultados a la Sociedad Alemana de Física el 14 de diciembre de 1900 (Planck, 1900a), fecha señalada como el nacimiento de la teoría cuántica. Planck advirtió que solo podía obtener el acuerdo con el análisis espectral si consideraba la energía emitida por los átomos del cuerpo negro como una variable discreta, y no como la variable continua de la física clásica. Este fenómeno se llamó cuantización y esos pequeños paquetes de energía se llamaron *cuantos* (del latín «quantum», plural «quanta», que significa «cantidad»). De esto se sigue que un cuanto es el límite inferior de intercambio de energía por debajo del cual ya no hay posible energía a intercambiar. Además, no existen estados intermedios como medio cuanto o un cuarto de cuanto, solo pueden existir un cuanto y sus múltiplos enteros. El cuanto denota tanto el valor mínimo energético como la mínima variación posible del mismo. La hipótesis de la cuantización le permitió a Planck descubrir la fórmula que define cual es el valor energético de un cuanto:

$$\epsilon = h\nu$$

Este valor resulta de multiplicar la frecuencia de onda (ν) por la constante de Planck. Los niveles de energía permitidos se llaman estados cuánticos:

$$\epsilon = n h\nu$$

siendo n un número natural denominado *número cuántico*. De esta forma, logra explicar el espectro de emisión de un cuerpo negro, ajustándose perfectamente a los resultados experimentales, pero a un precio que se revelaría demasiado alto. La consecuencia más

9 Su comentario a la ley fue publicado como «Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung» (1900), en *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, Vol. 2, pp. 202-204, y traducido al inglés en D. Ter Haar (1967: 79).

10 En una carta no publicada a R.W. Wood, ver Jammer (1966).

asombrosa de su descubrimiento es que las radiaciones electromagnéticas, que según la teoría clásica de Maxwell consistían en ondas, estaban conformadas en realidad por minúsculos paquetes discretos de energía. Esta idea de atribuir a la radiación una estructura corpuscular era algo insólito para la física de fines del siglo XIX, era tan revolucionaria que no podía incorporarse al esquema de la física tradicional. El propio Planck, un gran conservador, consideró en los primeros años que su solución no era más que un simple artificio matemático cuya única función era resolver un problema teórico. En especial, negaba que el cuanto tuviera alguna significación física, aunque muy pronto debió aceptarlo a partir de las aplicaciones de su hipótesis, realizadas por otros investigadores.

La subestimación manifestada por el propio Planck respecto de su propio descubrimiento, considerando el cuanto como una cantidad ficticia, ha generado cierta polémica respecto de su título de fundador de la teoría cuántica. Esto hace que algunos historiadores de la ciencia le nieguen tal título prefiriendo atribuírselo a Einstein (Kuhn, 1978). Lo cierto es que si bien la comunidad aceptó rápidamente la fórmula de Planck, no hubo indicios de que se tomara conciencia del quiebre que representaba el cuanto de acción respecto de la física clásica. Incluso después de que Lorentz demostrara en 1910 que la física clásica derivaba necesariamente en la ley de Rayleigh, varios físicos persistirían en el intento de evitar la conclusión de Rayleigh sin abandonar la mecánica clásica.

II.b. Los cuantos de luz

El año 1905 es celebrado por la comunidad física como el «Annus Mirabilis», principalmente a causa de la creación de la teoría de la relatividad de la mano del gran físico alemán Albert Einstein¹¹. Sin embargo, unos meses antes de su famoso artículo sobre la relatividad, publica otro llamado «Un punto de vista heurístico acerca de la creación y transformación de la luz» (Einstein, 1905), presentando ideas tan revolucionarias que fueron resistidas durante años. En este artículo Einstein manifiesta la existencia de una profunda discrepancia entre la teoría ondulatoria de Maxwell y ciertos procesos físicos que involucran la creación y transformación de la luz. Si bien la teoría ondulatoria ha sido enormemente exitosa en la explicación de fenómenos como la difracción, la reflexión, la refracción, interferencia, etcétera, Einstein señala que hay tres fenómenos que parecen contradecirla: el efecto fotoeléctrico, la fotoluminiscencia y la ionización de gases por luz ultravioleta. Su explicación teórica parece exigir, según la novedosa visión de Einstein, la hipótesis de que la energía de la luz se distribuye discontinuamente en el espacio en *cuantos de luz*¹².

Considero que las observaciones sobre la «radiación del cuerpo negro», la fotoluminiscencia, la producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros fenómenos que involucran la creación y conversión de luz pueden entenderse mejor bajo la asunción de que la energía de la luz se distribuye discontinuamente en el espacio. Según la asunción considerada aquí, cuando un rayo de luz es propagado, la energía no se distribuye continuamente sobre un volumen cada vez mayor, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía, localizados en el espacio, que se mueven sin estar divididos y que pueden ser absorbidos o emitidos únicamente como un todo (Einstein, 1905: 92).¹³

11 Véase en este mismo volumen el artículo de Leonardo Moledo, Nicolás Olszewicki y Esteban Magnani, «Einstein y la reinención de la Física» (comps.).

12 Estos «cuantos de luz» serían conocidos como «fotones» a partir del artículo de G. N. Lewis, «The conservation of photons» (1926).

13 Traducción propia.

Los experimentos de interferencia y difracción de la luz, los principales sustentos de la teoría ondulatoria, se realizan con una enorme cantidad de «cuantos de luz», lo que impediría que se registren manifestaciones individuales. Pero si en vez de atender a la propagación de la luz nos preocupamos por la forma en que es emitida o absorbida, debemos aceptar que son procesos «cuánticos».

Veamos el poder explicativo de la hipótesis de Einstein aplicada al problema del efecto fotoeléctrico, descubierto por Hertz en 1887 cuando observó que la radiación ultravioleta facilita una descarga eléctrica entre dos electrodos. En los años siguientes las investigaciones de Joseph Thomson y Philipp Lenard pusieron de manifiesto que la luz ultravioleta incidente provoca la emisión de electrones. En general, el fenómeno denominado «efecto fotoeléctrico» consiste en la emisión de electrones por un material cuando es sometido a una radiación electromagnética, usualmente luz visible o ultravioleta.

Los experimentos realizados por Lenard (1902) y Ladenburg (1903) ofrecían una caracterización del efecto que resultaba incompatible con la teoría de Maxwell. En primer lugar, según la teoría electromagnética clásica la energía de la onda es proporcional a su intensidad, por lo que la energía cinética de los electrones emitidos debería aumentar con la intensidad del haz. Sin embargo, los experimentos muestran que el aumento de intensidad solo provocaba un mayor número de electrones emitidos pero no un incremento en su energía. La teoría ondulatoria predice también que el efecto se debería producir para cualquier frecuencia, mientras la luz tenga suficiente intensidad como para suministrar la energía necesaria a los electrones. Lenard muestra que para cada superficie hay una frecuencia mínima por debajo de la cual no se produce emisión de electrones por más intensa que sea la radiación. Finalmente, es el aumento en la frecuencia de la radiación incidente la que produce un incremento en la energía de los electrones.

Basado en estos resultados, Einstein supuso que la energía de cada cuanto de luz debe estar relacionada con su frecuencia de acuerdo con $E = hv$. De este modo, cada cuanto de luz incidente es absorbido por un electrón, que así adquiere la energía necesaria para poder escapar por el cátodo. De acuerdo con la teoría de Einstein, la intensidad de la luz es proporcional al número de fotones del haz incidente, lo que explica que una mayor intensidad redunde en un aumento del número de electrones y no de su energía. Y como la energía de cada cuanto de luz incidente es hv , cada proceso individual de emisión es independiente de la intensidad, siendo proporcional únicamente a la frecuencia de la radiación. Entre 1914 y 1916 Robert Millikan (1916) llevó a cabo la demostración experimental de la hipótesis de Einstein, confirmando sin lugar a dudas la existencia de los cuantos de luz. Logra asimismo obtener un valor muy preciso de la constante de Planck, en concordancia con el obtenido por el propio Planck, pero a partir de una teoría completamente distinta:

$$h = 6,57 \times 10^{-27}$$

La introducción de la discontinuidad cuántica por parte de Planck se ceñía a los procesos de intercambio de energía por la materia, el trabajo de Einstein la extiende a la radiación electromagnética misma. En este sentido representaba una notable confirmación y ampliación de la hipótesis cuántica, pero en cierto sentido constituye un quiebre más radical con la teoría clásica. Los cuantos de luz einstenianos tienen existencia como entidades independientes de los procesos de emisión o absorción de energía. Para Planck esto era inaceptable, porque llevaba prácticamente al abandono de la teoría de Maxwell y al regreso a la disputa entre la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria en la época de Newton y Huygens. La introducción de los

cuantos de luz implicaba sostener que de alguna manera las ondas luminosas poseen un estado corpuscular. Einstein sabía perfectamente que la teoría de Maxwell no podía abandonarse, pero tenía una firme convicción de que la existencia de los cuantos de luz era necesaria cuando consideramos valores instantáneos de las funciones continuas clásicas.

Esta especie de contradicción entre fenómenos ondulatorios y corpusculares aparece ya en los albores de la teoría cuántica como un elemento esencial de la nueva física. Aparece en primer plano lo que sería más tarde conocido como la *dualidad onda-partícula*: ciertas propiedades de los sistemas físicos solo pueden explicarse atribuyendo a la luz una naturaleza ondulatoria, por ejemplo, los fenómenos de interferencia y difracción, pero efectos como el fotoeléctrico hacían necesaria la hipótesis corpuscular. El problema es que las diferencias entre ondas y partículas son muy grandes como para tolerar esta inconsistencia. Mientras que una partícula ocupa un lugar en el espacio y tiene masa, una onda se extiende en el espacio y tiene masa nula. Además, aquellas son discretas y estas son continuas. ¿Sería posible que la luz consistiera en ambas cosas?

En una comunicación a la Academia Alemana de 1909 sobre «El desarrollo de nuestras concepciones sobre la naturaleza y constitución de la radiación», Einstein presenta a los fotones como singularidades rodeadas por campos de fuerzas que producirían un campo ondulatorio similar al de la teoría de Maxwell (Einstein, 1909). La intención de Einstein era mostrar que las propiedades cuánticas y ondulatorias, ambas presentes en la fórmula de Planck, podían hacerse compatibles.

Sin embargo, la comunidad física no estaba aún preparada para enfrentarse a semejante paradoja, siendo el propio Planck uno de los más fervorosos opositores a la nueva teoría de Einstein. En la presentación que hace de Einstein como nuevo miembro de la Academia Prusiana de ciencias en 1913 afirma:

En suma, puede decirse que de los grandes problemas en que es tan rica la física moderna, difícilmente exista uno al que Einstein no haya hecho una contribución notable. Que alguna vez errara el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo en su hipótesis de los quanta de luz, no puede esgrimirse realmente demasiado en su contra, porque no es posible introducir ideas de verdad nuevas, ni aun en las ciencias más exactas, sin correr a veces algún riesgo (en Navarro Veguillas, 2004: 44).

II.c. Modelos primitivos del átomo

Tendrían que pasar algunos años más para que las innovaciones de Planck y Einstein lleguen a plasmarse en un modelo atómico cuántico. Pero para dar cuenta de este nuevo paso debemos retroceder un poco en el tiempo para mencionar algunos modelos atómicos previos.

El concepto de átomo como partícula indivisible que compone la materia ya fue postulado por la escuela atomista griega de Leucipo y Demócrito en el siglo V a. c. La hipótesis atómica, duramente criticada por Platón y Aristóteles, fue abandonada durante el auge del cristianismo, reflatando en el renacimiento y siendo puesta a prueba a partir de los trabajos de Galileo sobre el vacío en el siglo XVII¹⁴. Algunas décadas después Robert Boyle, como conclusión de sus experimentos sobre la elasticidad del aire de 1662, afirmaba que toda materia estaba constituida por partículas sólidas cuyas disposiciones daban a los materiales sus diferentes propiedades. La concepción del átomo subyacente a la mecánica newtoniana sigue la misma línea. Pero sería recién en el siglo XIX que se acumularía evidencia experi-

14 Véase en este mismo volumen los artículos de Pablo Melogno, «Astronomía y Física en Platón», y Godfrey Guillaumin, «Galileo Galilei. Evidencia experimental matemáticamente analizada en la Filosofía Natural de principios del siglo XVII» (*comps.*).

mental de que la materia está compuesta por átomos. La hipótesis atómica alcanzaría gran auge con los trabajos de los químicos, como Proust y Dalton, para quien la materia macroscópica estaba formada por átomos correspondientes al elemento del que estaba compuesta. Finalmente, la teoría cinética de los gases, que los imagina compuestos de un gran número de moléculas en rápido movimiento, la fortalecería aun más.

Sin embargo, en 1897 la hipótesis atómica sufre una conmoción. El físico británico Joseph John Thomson descubre que los átomos eran en realidad divisibles y de hecho estaban compuestos por corpúsculos portadores de cargas eléctricas negativas, llamados más adelante electrones (Thomson, 1897). Thomson había investigado en esos años la naturaleza de los rayos catódicos, descubiertos en 1858 por Julius Plucker, y había comprobado que se desviaban al ser expuestos a un campo eléctrico. Por el sentido de la desviación pudo deducir que debía ser causada por partículas portadoras de carga negativa, conocidas posteriormente como *electrones*. La relación carga/masa calculada por Thomson para tales partículas le señaló que debían ser mucho más livianas que el átomo de hidrógeno. Posteriormente, Thomson y otros demostrarían que todas las sustancias químicas contienen electrones, considerados de allí en más como un componente universal de la materia.

A partir de su gran descubrimiento, Thomson (1904) concibió en 1903 un nuevo modelo del átomo, como una esfera positivamente cargada de unos 10^{-8} cms de radio que contiene electrones esparcidos por la misma, como pasas en un pastel. Por ello fue conocido como «modelo del pudín». Para que la carga eléctrica neta en el centro del átomo fuera nula, era necesario suponer que los electrones estaban uniformemente distribuidos. De aquí el carácter estático del modelo, que se revelará incapaz de explicar los espectros de radiación electromagnética.

El físico neocelandés Ernest Rutherford venía estudiando las diversas radiaciones —clasificadas por él mismo como alfa, beta y gamma— desde comienzos del siglo XX. En 1907 logra probar que las así llamadas «partículas alfa» (aquellas con menor poder de penetración en la materia) eran en realidad átomos de helio doblemente ionizados (dos protones y dos neutrones despojados su corteza electrónica). A partir de entonces realiza importantes avances teóricos, al tiempo que sus alumnos y colaboradores Hans Geiger y Ernest Marsden llevan a cabo importantes experimentos respecto del fenómeno de la dispersión de partículas α por átomos de diversos materiales. La teoría de Thomson predecía que los ángulos de dispersión de las partículas α al impactar un átomo debían ser pequeños, ya que los electrones estaban uniformemente distribuidos y su efecto es despreciable por tener mucho menos masa que las partículas α . Sin embargo, los experimentos realizados por Geiger y Marsden (1910) entre 1909 y 1910 (para medir los ángulos de desviación de un haz de partículas α que atraviesa una hoja muy delgada de oro), arrojan resultados difíciles de conciliar con el modelo del pudín. Si bien la mayoría de las partículas α sufren dispersiones menores, una pequeña fracción es impactada con ángulos mayores, llegando incluso a más de 90° ¹⁵. Esto ponía claramente de manifiesto que debía existir un campo eléctrico muy intenso en el centro del átomo —llamado carga central por Rutherford— responsable de la desviación registrada. La distribución uniforme del modelo de Thomson resultaría una descripción demasiado estática para poder dar cuenta de este tipo de fenómenos.

Intentando salvar estas dificultades Rutherford desarrolla en 1911 un nuevo modelo atómico, suponiendo que el átomo posee un *núcleo* diminuto en su centro, que concentra la

15 $1/20000$ impactan la lámina de oro con desviaciones de 90° , mientras que $1/8000$ lo hace en el caso de la lámina de platino; ver Rutherford (1911).

carga positiva y casi toda la masa del átomo en un punto. Esta era la hipótesis más simple, ya que la fracción de partículas dispersadas con ángulos grandes es proporcional a la carga central y al peso atómico (Rutherford, 1911). Por su parte, los electrones no se distribuyen uniformemente sino que giran alrededor del núcleo al estilo de un sistema solar en miniatura (pero gobernado por fuerzas electromagnéticas), siendo por ello conocido como «modelo planetario del átomo». Los rayos alfa se desviaban al intentar atravesar el centro del átomo porque se topaban con su núcleo (aún se desconocía la estructura interna del mismo) positivamente cargado. Por otra parte, el modelo pretendía que el movimiento planetario de los electrones conservara el equilibrio eléctrico del átomo. El núcleo porta una carga positiva igual a Ze , alrededor del cual giran Z electrones, de forma tal que sus movimientos equilibran la atracción del núcleo. Una de las importantes consecuencias de esta innovación es que las características de los enlaces químicos de los elementos pasan a estar determinadas, no por su peso atómico, sino por el número de electrones de sus átomos.

Si bien el modelo de Rutherford logró explicar los experimentos de dispersión de partículas α , no estaba libre de inconvenientes, el más acuciante de los cuales se relaciona con las bases de la teoría electromagnética. Los electrones, al girar alrededor del núcleo, están sometidos a una aceleración continua que según las leyes de Maxwell debería ocasionar una radiación de energía electromagnética. Esto haría que pierdan energía y caigan en espiral hacia el núcleo destruyendo la materia en muy poco tiempo. Así, el modelo de Rutherford era incapaz de explicar el rasgo más saliente de los átomos: su enorme estabilidad. El problema es que contiene como únicas constantes la carga y la masa del electrón, y con ellas no es posible formar una longitud característica para el radio de su órbita. Era necesaria una nueva constante.

II.d. El modelo de Bohr y la teoría cuántica antigua

En 1913 el joven físico danés Niels Bohr —que trabajaba con Rutherford en Manchester— tuvo la intuición de que el problema requería la introducción de elementos ajenos a la física clásica. Por entonces ya resultaba evidente la imposibilidad de brindar estabilidad al modelo de Rutherford siguiendo los principios de la electrodinámica clásica. Por otra parte, no había forma de obtener una longitud que pueda interpretarse como el radio de un átomo utilizando los únicos parámetros constantes del modelo de Rutherford: masas (m) y cargas (e) de las partículas. Sin embargo, la introducción del cuanto de Planck permitía formar una expresión como h^2/me^2 , que terminaría dando el radio atómico de magnitud correcta. De este modo, Bohr decide aplicar las ideas que Planck había desarrollado para solucionar el problema del cuerpo negro al modelo de Rutherford buscando una teoría que explique coherentemente la constitución de los átomos así como las leyes de los espectros atómicos descubiertas a fines del siglo XIX por Balmer y Rydberg entre otros.

De su trabajo se desprende un nuevo modelo atómico, que es presentado en una trilogía de artículos bajo el nombre *Sobre la constitución de los átomos y las moléculas* (Bohr, 1913). Como primera medida, intenta avanzar lo más posible con la ayuda de la física clásica, suponiendo que un átomo consiste en Z electrones con carga $-e$ que describen órbitas circulares alrededor de un núcleo de carga Ze , bajo la influencia de la atracción coulombiana del mismo. Esto le permite llegar a ciertas expresiones que manifiestan la dependencia de la frecuencia de revolución del electrón alrededor del núcleo (ω) y del eje mayor de de su órbita ($2a$) respecto de la cantidad de energía necesaria para que el electrón escape de la atracción del núcleo (W). Llegado a este punto, introduce una serie de postulados que

alejaron su modelo de toda posible reconciliación con la física clásica, y representarán el comienzo de la así llamada *Teoría Cuántica Antigua*.

En primer lugar, asume que el átomo no emite ni absorbe energía de forma continua, como asume la electrodinámica clásica, sino que lo hace a través de saltos discontinuos entre lo que llamó *estados estacionarios*¹⁶. Estos corresponden a configuraciones del sistema atómico en las cuales los electrones permanecen en órbitas estables y por lo tanto no irradian ni absorben energía, a pesar de ser acelerados constantemente. De esta manera, Bohr «ignora» la contradicción del modelo de Rutherford con el electromagnetismo mediante el simple expediente de postular que esa característica de la teoría clásica no vale para el electrón cuando se encuentra en un estado estacionario. En segundo término, supone que los estados estacionarios son definidos por aquellas configuraciones de las órbitas electrónicas que respetan el siguiente principio: el momento angular¹⁷ del electrón debe ser igual a $nh/2\pi$ (siendo n un entero conocido como «número cuántico principal»). Al hacer constante el momento angular se tiene como consecuencia una cuantización de las órbitas posibles, cuyo radio solo puede aumentar o disminuir mediante saltos discontinuos. Las distintas variaciones de W producen distintos valores permitidos para w y a (estados estacionarios), lo cual le permite a Bohr calcular el radio de la órbita del electrón en el átomo del hidrógeno

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{m \cdot e^2} = 0.529 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

que se denomina radio de Bohr. En tercer lugar, supone que el equilibrio dinámico de los sistemas en estados estacionarios es gobernado por las leyes ordinarias de la mecánica, mientras que tales leyes no valen para el pasaje entre diferentes estados estacionarios. Cuando esto ocurre, un electrón pasa de una órbita permitida de energía E_i a otra de energía E_f y se emite un fotón cuya frecuencia es

$$\nu = \left(\frac{E_i - E_f}{h} \right)$$

De esta forma, el salto de un electrón de un nivel cuántico a otro implica la emisión o absorción de un fotón, cuya energía corresponde a la diferencia de energía entre ambas órbitas. La transición de un electrón desde un nivel cuántico a otro más bajo (de una órbita exterior a otra más interior) producirá la emisión de un cuanto de luz con carga energética $h\nu$. Y a la inversa, si un cuanto de luz es absorbido por el electrón entonces subirá un nivel, pudiendo escapar del átomo si absorbe la energía suficiente. Así, cuando el átomo emite (o absorbe) radiación, el electrón pasa a una órbita de menor (o mayor) energía, y la diferencia entre ambas órbitas se corresponderá con una línea del espectro de emisión (o absorción). De esta forma, la cuantificación del momento angular implica la cuantificación de la energía total del átomo. Finalmente, Bohr define el *estado permanente* de un sistema atómico como aquel cuya formación implica la emisión de la mayor cantidad de energía, representando el estado normal del átomo, al que tenderá a regresar después de cualquier interacción

¹⁶ Bohr justifica esta denominación señalando que serían como «lugares de espera» entre las diferentes emisiones de energía.

¹⁷ El momento angular de la revolución de un electrón alrededor del núcleo es una magnitud física que resulta de multiplicar el producto de la masa y la velocidad del electrón por el radio de su órbita.

El gran éxito explicativo del modelo de Bohr radicó en la posibilidad de deducir del mismo las leyes sobre las líneas espectrales pero sobre todo en la exitosa predicción de nuevas series, que serían verificadas en los años subsiguientes por Lyman (1914, Brackett (1922) y Pfund (1924). La recepción de la nueva teoría fue muy favorable en la comunidad física, siendo calificada por Einstein como un «enorme logro» y «uno de los mayores descubrimientos» de la física (Jammer, 1974: 86). Sin embargo, la principal significación del aporte realizado por Bohr fue que, al contrario de Planck y Einstein, no intentó salvar el abismo entre física clásica y cuántica, sino que se concentró en buscar un sistema atómico cuántico que resultara coherente en si mismo y adecuado para explicar los resultados experimentales.

Experimentos realizados durante 1914 por Frank y Hertz demuestran la cuantización del átomo representando un éxito espectacular del modelo de Bohr (Frank; Hertz, 1914). Sin embargo, el propósito original que Bohr se atribuye de brindar una teoría general de átomos y moléculas permanece inacabado, pues únicamente las líneas espectrales del átomo de hidrógeno pudieron ser explicadas (y solo parcialmente); todos sus esfuerzos por extender la teoría a sistemas con más de un electrón terminaron en el fracaso. De todos modos, el camino quedaba marcado para futuras correcciones y mejoramientos del modelo: debían imponerse *condiciones cuánticas* para seleccionar los *movimientos permitidos* de los electrones sobre la base de los movimientos posibles, determinados mediante la mecánica clásica, mientras que las transiciones entre movimientos permitidos debían tratarse mediante la ecuación de Bohr sobre la frecuencia. La elaboración de esta síntesis entre la física clásica y la cuántica realizada entre los años 1914 y 1925 por parte de varios físicos entre los que se destaca el alemán Arnold Sommerfeld, es conocida como *Teoría Cuántica Antigua*.

En 1916 Sommerfeld presenta el primer gran logro de la Teoría Cuántica Antigua mediante la introducción de una regla de cuantificación¹⁸ que vale para cualquier sistema periódico. Al tener como casos especiales las cuantizaciones de Planck (de la energía del oscilador) y Bohr (del momento angular), otorga a la teoría cuántica un grado de generalidad más elevado y amplía su dominio de aplicaciones. A continuación, trabaja el concepto de órbitas elípticas para los electrones¹⁹, y guiado por las series de Balmer, se da cuenta de que exigen la introducción de un *segundo número cuántico*, llamado secundario o azimutal. Este indica el momento angular del electrón en la órbita (en unidades de $h/2\pi$) determinado así los subniveles de energía en cada nivel cuántico y la forma de la órbita. Para un valor fijo del número cuántico principal n , el número cuántico azimutal k puede tomar los valores $0, 1, 2, \dots, n - 1$. Esto quiere decir que para cada valor del n existen distintas órbitas permitidas que difieren por el valor de k , la que corresponde a $k = n$ es la órbita circular de Bohr, las demás son elípticas (Sommerfeld, 1916a).

No pudiendo obtener diferencias energéticas en un mismo nivel cuántico, Sommerfeld realizó un tratamiento relativístico del problema²⁰, que le permitió obtener subniveles energéticos diferenciados por k . De este modo, el número cuántico principal define el nivel principal de energía de la órbita mientras que el número cuántico azimutal define los subni-

18 Esta afirma que toda coordenada q que varía periódicamente en el tiempo satisface la condición de que la fase integral es un múltiplo entero del cuanto de acción: $\int p_k dq_k = n_k h$, siendo p_k el momento correspondiente a la coordenada q_k , y n_k un entero no negativo.

19 Posibilidad tomada en cuenta por Bohr al comienzo de su trilogía de 1913 pero luego descartada para tratar únicamente con órbitas circulares determinadas por un único número cuántico: n .

20 Para ello introduce la influencia de la masa relativística, ignorada por Bohr al postular que el electrón se mueve a una velocidad pequeña respecto de la velocidad de la luz.

veles energéticos dentro de aquel nivel. El resultado fue la explicación teórico-cuántica de la *estructura fina de las líneas del hidrógeno*, es decir de los detalles más sutiles de las líneas espectrales, ignorados por el modelo de Bohr. En el modelo de Sommerfeld la primera órbita circular permanece intacta, mientras que a la segunda órbita circular se añaden tres órbitas elípticas, a la tercera órbita circular se añaden ocho elípticas, y así sucesivamente.

Una de las primeras aplicaciones exitosas del modelo de Sommerfeld, fue la explicación del efecto Stark, consistente en la fragmentación de las líneas espectrales a causa de la acción de un campo eléctrico, cuando la física clásica pronostica que el movimiento del electrón no debería verse afectado. En 1916 Epstein (1916) y Schwarzschild (1916) imponen una cuantización del ángulo azimutal respecto de la dirección del campo y logran obtener un excelente acuerdo con las mediciones realizadas por el propio Stark. Más tarde en ese mismo año Debye (1916) y Sommerfeld (1916b) logran explicar el efecto Zeeman, análogo al efecto Stark, pero referido a un campo magnético, que como mostrara Zeeman en 1896 produce un ensanchamiento de las líneas espectrales. Para ello deben introducir un tercer número cuántico, llamado *número magnético*, como indicador de las posibles orientaciones en el espacio que puede adoptar la órbita del electrón cuando éste es sometido a un campo magnético externo. Sus valores permitidos son: $-k, \dots, 0, \dots, +k$. El importante experimento realizado por Stern y Gerlach en 1921 confirma completamente esta teoría magnética de Debye y Sommerfeld.

El modelo de Sommerfeld pudo explicar los espectros de átomos complejos y sus interacciones químicas, pero fracasó todo intento de describir las transiciones de electrones entre los niveles energéticos o saltos cuánticos. El físico alemán Wolfgang Pauli, estudiante de Sommerfeld, desarrolla entre 1922 y 1924 una crítica a la teoría magnética de su antiguo profesor, atribuyendo el cambio de energía en un campo magnético únicamente al electrón de valencia. En 1924 Stoner encuentra la expresión que da el número de electrones en cada nivel de energía completo: $2n^2$, siendo n el número cuántico principal; por tanto la cantidad de electrones por niveles cuánticos sería: 2, 8, 18, 32, 50, etcétera (Stoner, 1924). Apoyado en este logro, Pauli observa que para explicar la estructura de niveles cuánticos del átomo es necesario asumir que no puede haber dos electrones con todos sus números cuánticos iguales, es decir, en el mismo estado cuántico. Cuando un nivel queda «ocupado» los electrones deben ir ocupando sucesivas capas siguiendo aquella máxima, que pasaría a ser conocida como «principio de exclusión de Pauli» (Pauli, 1925). Su aplicación cabal solo sería posible con la introducción de un cuarto número cuántico por parte de Goudsmit y Uhlenbeck a finales de 1925 llamado «espín». Para ello interpretaron el electrón como una esfera que podía rotar, y llamaron espín («giro» en inglés) al momento angular intrínseco del electrón, es decir, una cantidad constante que indica el sentido del giro del electrón en torno a su propio eje y la cantidad de veces que debe girar sobre sí mismo para volver a la posición inicial. El espín del electrón puede tomar sólo dos valores: $+1/2$ $h/2\pi$ y $-1/2$ $h/2\pi$ (Goudsmit; Uhlenbeck, 1925). En 1926 Thomas y Frenkel confirman la hipótesis del espín, que más tarde se ampliaría a todas las partículas subatómicas. Mediante el principio de exclusión y el espín es posible explicar la distribución de los electrones en el átomo. Por ejemplo, un átomo de helio tiene un nivel de energía con dos electrones ligados porque tienen espines opuestos²¹, mientras que en un átomo de litio, al tener tres electrones ligados, el tercero debe ocupar un segundo nivel energético. El oxígeno tiene 8 electrones, dos ocupan

21 El espín es el único número cuántico en que pueden diferir dos electrones que ocupan la misma órbita o nivel energético.

el primer nivel y 6 ocupan el segundo, pero como este tiene lugar para 8, acepta fácilmente su unión con dos átomos de hidrógeno, que aportan los dos electrones faltantes, formando una molécula de agua (Thomas, 1925/ Frenkel, 1926). De esta manera se explican las conexiones químicas y la estabilidad de la materia a gran escala.

II.e. El camino hacia la mecánica cuántica

La dualidad entre las concepciones corpuscular y ondulatoria de la radiación había surgido como un profundo problema conceptual a partir del trabajo de Einstein sobre los cuantos de luz. En los años siguientes al mismo la hipótesis cuántica logró cada vez más aplicaciones en el dominio de fenómenos considerados clásicamente ondulatorios. Sin embargo, el fenómeno de la dispersión óptica se resistía a entrar en los marcos de la nueva teoría cuántica y fue uno de los campos de investigación clave a comienzos de los 20's. En estos pocos años se llevaron a cabo una serie de avances conceptuales que pavimentarían el camino para el surgimiento de la mecánica cuántica moderna.

Entre los aportes fundamentales mencionamos algunos muy someramente. En 1921 Ladenburg reemplaza el átomo por un conjunto de osciladores armónicos cuyas frecuencias igualó con las frecuencias de absorción del átomo (Ladenburg, 1921). En enero de 1924 Slater presenta la idea de un campo virtual de radiación: cada átomo se comunica constantemente con los otros átomos (mientras esté en un estado estacionario) mediante un campo virtual que se origina en los osciladores armónicos, también virtuales. Las frecuencias de tales osciladores determinan la probabilidad de una cierta transición cuántica de un estado a otro (Slater, 1924). Slater presenta esta teoría a Bohr y su ayudante Kramers, y de la discusión resulta un artículo conjunto «The Quantum Theory of Radiation» (en Van Der Waerden, 1967). Si bien poco después se refutarían experimentalmente varias ideas del artículo, tuvo la importancia de renunciar deliberadamente a los fundamentos de la física clásica y ser el punto de partida de la teoría de la dispersión de Kramers. Este presenta la derivación completa de su famosa fórmula de la dispersión en julio de 1924, en «The Quantum Theory of Dispersión» (en Van Der Waerden, 1967), poco después de que Max Born presentara su artículo «Sobre la mecánica cuántica» («On Quantum Mechanics») ²², donde aplica la teoría clásica de la perturbación como caso general de los fenómenos de dispersión. El rasgo fundamental de la nueva mecánica tal como la concibe Born es que cada cantidad física depende de dos estados estacionarios y no de una órbita como en la mecánica clásica (en Van Der Waerden, 1967). El problema era encontrar las leyes de estas cantidades de transición. El físico alemán Werner Heisenberg había pasado el semestre de invierno 1924-1925 trabajando con Bohr y Kramers en Copenhague, donde presenta con este último «On the Dispersion of Radiation by Atoms», una derivación de la fórmula de Kramers sobre la dispersión usando los métodos de Born (en Van Der Waerden, 1967).

Una exposición aparte y más detallada merece la notable hipótesis presentada por el físico francés Louis de Broglie en su tesis doctoral de 1924 *Investigaciones sobre la teoría cuántica* respecto de la existencia de «ondas de materia». Lo extraño del planteo es que las partículas materiales, especialmente el electrón, nunca habían manifestado propiedades ondulatorias. Sin embargo, existía un indicio que lo apoyaba: las órbitas estables del electrón están caracterizadas por números enteros, una propiedad insólita para las partículas pero intrínseca a los fenómenos ondulatorios. De Broglie supone que de la misma manera que

22 Es la primera vez que esta expresión aparece con el sentido que le damos actualmente.

la radiación electromagnética consiste en partículas (cuantos de luz o fotones) cuyos movimientos vienen determinados por una onda luminosa, el electrón es guiado en sus movimientos por ciertas *ondas de materia*, a las que llamó «ondas-piloto» (de Broglie, 1925)²³. Basándose en la ecuación de Einstein para la frecuencia de la onda luminosa ($\nu = e/h$), de Broglie deriva el valor de la longitud de la onda piloto asociada a la partícula como $\lambda = h/p$. La importancia de este trabajo para la historia de la física cuántica radica en que las propiedades ondulatorias del electrón permiten identificar las razones físicas escondidas tras los misteriosos postulados de cuantificación de la Teoría Cuántica Antigua de Bohr-Sommerfeld. Los electrones ligados en órbitas estables tienen asociada una onda estacionaria, cuyas únicas trayectorias posibles son exactamente las órbitas permitidas por el modelo de Bohr. Y al reinterpretar la condición cuántica de la teoría de Bohr en términos de ondas de materia, relaciona el modelo cuántico de Bohr con el dualismo onda-partícula, presentándolo de la forma en que será formalizado por la mecánica cuántica²⁴.

II.f. La formulación matemática de la mecánica cuántica

Entre 1900 y 1925 los físicos habían descubierto fenómenos sorprendentes desde el punto de vista de la física clásica, todos los cuales giraban alrededor de la noción de cuanto. Sin embargo, Teoría Cuántica Antigua apelaba a principios de la mecánica y el electromagnetismo clásicos para definir magnitudes como las masas y cargas de partículas. La utilización de dos teorías incompatibles generaba enormes problemas, haciendo imperiosa la creación de un nuevo marco teórico.

A pesar de su resonancia y exitosas soluciones a varios problemas de la física atómica, la teoría cuántica (...) anterior a 1925, era, desde el punto de vista metodológico, una lamentable mezcla de hipótesis, principios, teoremas, y recetas computacionales más que una teoría lógicamente consistente. (Jammer, 1966: 108)

Entre 1925 y 1926 la situación va a cambiar drásticamente: se pasa de un conjunto de hipótesis y postulados a una formulación matemática manejable, que sería conocida como *mecánica cuántica*. Werner Heisenberg presenta el 29 de julio de 1925 la primera formulación consistente y autónoma de la mecánica cuántica en su histórico artículo fundacional «Reinterpretación teórico-cuántica de las relaciones cinemáticas y mecánicas» (en Van Der Waerden, 1967), escrito luego de un retiro a la isla de Helgoland por haber contraído la fiebre del heno.

Tanto en Göttingen como en Copenhagen se creía que la mecánica clásica ya no podía ser válida en el dominio atómico, y que la nueva mecánica debía considerar a las magnitudes físicas como dependientes de la transición entre estados estacionarios y no de una órbita clásica. Heisenberg identifica la falla de la teoría clásica en su utilización de magnitudes inobservables como eran en su consideración la posición y velocidad (o momento) del electrón. Su estrategia consiste en rechazar esas nociones clásicas y «... establecer las bases para la mecánica cuántica teórica fundada exclusivamente sobre relaciones entre cantidades que en principio

23 Como veremos más adelante, más que una entidad física, la onda piloto es una representación matemática de la partícula en el espacio-tiempo, cuya intensidad mide la probabilidad de encontrar al electrón en determinada posición en un momento dado. Lo que de Broglie no pudo determinar es la ecuación que rige la propagación de la onda piloto y por tanto el movimiento de la partícula, para ello debemos esperar el trabajo de Erwin Schrödinger.

24 Cabe señalar que la idea no tuvo gran impacto en el momento por lo audaz de la afirmación y la ausencia de pruebas experimentales, estas recién llegarían en 1927 de la mano de Joseph Davisson y Lester Germer, quienes muestran que los electrones sufren el fenómeno ondulatorio conocido como difracción.

son observables.» (en Van Der Waerden, 1967: 261). Para llevar a cabo este importante giro metodológico, Heisenberg elige como magnitudes básicas la frecuencia y la amplitud de la radiación emitida por el electrón, y desarrolla un cálculo para las mismas. El rasgo más impactante de su artículo es la representación de frecuencias y amplitudes mediante conjuntos de números complejos que corresponden a la transición de n a $n - \alpha$:

$$a(n, n - \alpha) e^{i\omega(n, n - \alpha)t}$$

Al considerar el producto de estos conjuntos, Heisenberg notó que la propiedad conmutativa de la multiplicación ya no era válida: $pq - qp \neq 0$. Las ecuaciones del movimiento que deduce a partir de estos supuestos contienen una determinación completa de frecuencias y amplitudes, así como de las probabilidades de transición, y alcanzan para explicar la interacción de los electrones en un átomo.

Max Born reconoció inmediatamente la importancia de la teoría de Heisenberg, pero le quitaba el sueño la extraña regla de multiplicación de los conjuntos de Heisenberg. Mediante una simplificación de la notación fue capaz de descubrir que tales conjuntos no eran más que las matrices del álgebra clásica, y por tanto aquella regla era simplemente la regla clásica de multiplicación de matrices²⁵. En colaboración con Pascual Jordan, quien había aprendido teoría de matrices con el matemático Courant, publican a finales de setiembre «Sobre la mecánica cuántica» (en Van Der Waerden, 1967), donde aparece la primera formulación rigurosa de la mecánica matricial. Born establece la *relación de conmutación* de la mecánica cuántica:

$$pq - qp = \left(\frac{h}{2\pi i}\right) \mathbf{1}$$

(siendo $\mathbf{1}$ la matriz unitaria)

Posteriormente, Jordan presenta una demostración que establece que las matrices deben ser diagonales, es decir, sus elementos no diagonales valen cero; los valores diagonales son $h/2\pi i$. Esta es la condición cuántica de Born y Jordan, quienes reconocen su carácter axiomático dentro de la teoría.

Luego de un receso Born y Jordan reanudan su trabajo en Göttingen y mediante correspondencia con Heisenberg, quien se hallaba en Copenhague, elaboran «Sobre la mecánica cuántica II» (en Van der Waerden, 1967), publicado a mediados de noviembre de 1925. Más allá de la presentación de la mecánica matricial y varias aplicaciones, este artículo indica un método para resolver las ecuaciones del movimiento que reemplazan a las de Newton mediante matrices diagonales, y predecir las propiedades de las líneas espectrales de la energía emitida por los electrones. El éxito de la mecánica matricial radicó en que permitía deducir los resultados ya conocidos de física cuántica, pero partiendo de principios generales autónomos y válidos para cualquier sistema.

Con la excepción de Bohr, la recepción por parte de la comunidad física fue en general fría, lo que se explica por dos motivos. La formulación Heisenberg-Born-Jordan era fuertemente abstracta, en ese entonces las matrices eran algo exótico para los físicos teóricos, acostumbrados a las matemáticas más familiares de las ecuaciones diferenciales. Por otra parte, la referencia de la teoría pasa de átomos conteniendo electrones que se mueven en órbitas

25 Las matrices ya habían sido usadas —aunque lateralmente— en física, pero es la primera vez que su producto juega un rol esencial, introduciendo la no conmutatividad: pq puede ser distinto de qp .

alrededor del núcleo, a frecuencias y amplitudes de la radiación emitida por el electrón al saltar de un nivel de energía a otro. Así se niega cierta imagen intuitiva del fenómeno físico, hecho que incomodaba a muchos científicos que sentían un ataque a la noción de «trayectoria» del electrón. La imagen visual simple de la realidad material que se deduce de la vieja mecánica newtoniana (planetas que orbitan el Sol o movimiento de las bolas de billar) no tiene analogía en la mecánica cuántica matricial. Cuando en enero de 1926 Pauli presenta una derivación del espectro del hidrógeno utilizando la teoría de Heisenberg, la mayoría de los físicos se convencen de que la mecánica matricial era correcta. Pero muchos de ellos, significativamente Einstein, dudaban del trasfondo conceptual y saludarían la aparición de una nueva versión de la mecánica cuántica.

Entre los que no estaban conformes se hallaba el físico austríaco Erwin Schrödinger, quien en una serie de cuatro artículos presentados en el primer semestre de 1926 bajo el nombre *Cuantización como un problema de autovalores* (Schrödinger, 1928), presenta una mecánica ondulatoria. Su fuente de inspiración fue la teoría de las ondas piloto desarrollada por de Broglie para el movimiento de electrones libres. Schrödinger consideró el caso de partículas sometidas a campos de fuerzas y buscó una ecuación que expresara el movimiento de las ondas asociadas a tales partículas. Siguiendo a de Broglie consideró a la materia como ondas propagadas por espacios abstractos multidimensionales. A partir de las ecuaciones de Planck, Einstein y de Broglie —y estableciendo ciertas condiciones— logró deducir la famosa ecuación de onda que presentaría en enero de 1926. La forma clásica de esta ecuación es:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(x,t) + V(x)\psi(x,t) = i\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}$$

y se consideró que representa en la mecánica cuántica un papel análogo al de las leyes de Newton en la mecánica clásica. Al igual que estas, explica la evolución temporal de un sistema físico en el intervalo comprendido entre dos mediciones. La expresión « $\psi(x,t)$ » se conoce como la *función de onda*, y representa las posibles soluciones a las ecuaciones, es decir, una forma de describir el estado físico de un sistema de partículas. De esta manera, en lugar de utilizar órbitas para describir el interior de un átomo, se utilizaron las funciones correspondientes a varios tipos de ondas que pueden existir en el espacio que rodea los núcleos atómicos. El verdadero proceso mecánico es representado apropiadamente por la propagación de ondas en el espacio, y no por el movimiento de partículas. Por otra parte, al ser una ecuación continua proporciona soluciones para todos los puntos del espacio, pero las condiciones cuánticas (especialmente el principio de exclusión de Pauli) restringen la cantidad de soluciones permitidas, coincidiendo con los valores del modelo de Bohr para el átomo de hidrógeno.

La restauración de la continuidad por parte de la mecánica de Schrödinger al concebir las transiciones cuánticas más como un intercambio de energía que como un salto de electrones fue bien recibida por muchos físicos. La formulación de Schrödinger utilizaba ecuaciones en derivadas parciales, más familiares para los físicos que las matriciales, y portadoras de una imagen clásica de los sistemas físicos. Por eso recibió mucho mejor acogida por los partidarios de la continuidad como Planck, Einstein, Sommerfeld y otros. Las escuelas de Copenhague y Göttingen fueron mucho más reservadas, especialmente por el descubrimiento —realizado por el propio Schrödinger— de la equivalencia matemática de

su mecánica con la matricial²⁶. Heisenberg criticó las pretensiones de Schrödinger, notando que al usar un espacio de configuración con más de tres dimensiones e incluir la cantidad imaginaria i , su evidencia intuitiva era muy cuestionable. De todos modos, la mecánica ondulatoria acabaría por imponerse debido a la mayor simplicidad de su manipulación simbólica. Los partidarios de la discontinuidad como Bohr, Heisenberg y Born acabarían pasándose al bando contrario para elaborar desde dentro una interpretación física que resultaría incompatible con las ideas originales de Schrödinger.

Pero volviendo al desarrollo formal de la teoría, es imperativo referirse al importante trabajo desarrollado por el brillante físico Paul Dirac, iniciado incluso antes del surgimiento de la mecánica ondulatoria. Su novedoso enfoque consistía en formular un álgebra puramente abstracta de las variables cuánticas —a las que llamó «números- q »— definiendo tradicionalmente las operaciones algebraicas pero excluyendo la propiedad conmutativa de la multiplicación. Estos números- q carecían de interpretación física, se definían mediante las propiedades algebraicas derivadas de sus relaciones. Este «álgebra cuántica» representaría una versión más general de la mecánica cuántica (por contener ambas como casos particulares) y permitía una mayor flexibilidad teórica a la hora de estudiar nuevas situaciones²⁷. Dirac y Jordan desarrollan este enfoque en la teoría de las transformaciones, confluyendo finalmente en la axiomatización realizada por el matemático húngaro John Von Neumann en su obra *Fundamentos matemáticos de la teoría cuántica*, basándose en la teoría de los operadores lineales sobre espacios de Hilbert (Von Neumann, 1955). A partir de la década de los 30's los avances de la mecánica cuántica basados en ese formalismo crecen vertiginosamente, apareciendo nuevas ramas como la electrodinámica y la cromodinámica cuánticas. También se descubren gran cantidad de partículas, entre las que jugaron un rol esencial los «quarks», cuya teorización da lugar al así llamado «modelo estándar de partículas». Más recientemente aparecen las teorías de cuerdas y supercuerdas, así como la teoría M como intentos de construir una teoría que unifique la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad general.

II.g. Max Born y la interpretación probabilística

La mecánica ondulatoria obtuvo una mayor aceptación que sus competidoras incluso entre físicos de Göttingen como Born, no así la interpretación que hace Schrödinger de la función de onda. Ya en sus artículos fundacionales la describe como una distribución continua de electricidad en el espacio real, explicando las partículas como grupos de ondas. Pronto se hizo evidente que esto no era sostenible, pues en sistemas polielectrónicos, ψ es una función en un espacio multidimensional abstracto, y por tanto no puede ser causa eficiente de la radiación. Además había abundante evidencia experimental acerca de la naturaleza corpuscular del electrón, lo que convenció a Born de abandonar la interpretación ondulatoria e intentar asociar ψ con la presencia de partículas. Su inspiración es el tratamiento de Einstein acerca de la relación entre el campo de ondas electromagnéticas y los cuantos de luz. Según Einstein, el campo electromagnético guía los cuantos de luz determinando la probabilidad

26 Incluso antes de publicar la tercera comunicación en mayo de 1926, en un pequeño artículo llamado «Sobre la relación entre la mecánica cuántica de Heisenberg, Born, y Jordan, y la de Schrödinger» demuestra parcialmente lo que llama una «identidad formal» entre ambas teorías, aunque jamás creyó que existiera una identidad física subyacente.

27 Por razones de espacio no podemos extendernos más sobre el notable trabajo de Dirac, para una exposición detallada consultar Darrigol (1992).

de su presencia mediante su intensidad²⁸. En una serie de artículos²⁹ de 1926 Born establece una analogía entre el campo electromagnético y la función de onda para establecer una *interpretación probabilística* de la mecánica ondulatoria. Así como la intensidad de las ondas de luz eran una medida de la probabilidad de los cuantos de luz, $|\psi|^2$ establece la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado representado por ψ .

El campo ondulatorio descrito por la ecuación de Schrödinger sería en realidad un campo de probabilidad, y las ondas asociadas ya no eran las clásicas tridimensionales, sino que se asocian con partículas en un espacio multidimensional abstracto. En esta interpretación, la mecánica ondulatoria no puede establecer con certeza el estado posterior de un sistema atómico, sino únicamente la probabilidad de diversos estados, por ejemplo, de encontrar un electrón en diversos puntos de la cámara de niebla. En aquellas regiones del espacio en que ψ es nula, es imposible hallar a la partícula, pero para las restantes poseemos diversas probabilidades de encontrarla.

La introducción de la probabilidad en la teoría física no era algo nuevo, ya a finales del siglo XIX la teoría cinética del calor presenta leyes estadísticas para conocer el comportamiento medio de las moléculas. Esto era necesario porque es imposible —e inútil— seguir el movimiento de cada una de las moléculas de un gas para poder predecir el comportamiento del conjunto. Este concepto de probabilidad —el mismo que Einstein tenía en mente— es una afirmación acerca de *nuestro grado de conocimiento*, cubriendo la ignorancia causada por la ausencia de un mecanismo de medición perfecto. Por ejemplo, decimos que la probabilidad de que salga 1 en una tirada de dados es $1/6$ porque desconocemos todas las variables físicas que intervienen en la tirada, de lo contrario poseeríamos la certeza de qué número saldrá. Al relacionar la densidad de probabilidad con la función de onda, Born hace de aquel concepto algo más que una ficción matemática, ya que evoluciona en el tiempo y se propaga en el espacio. Esta indeterminación cuántica es intrínseca a los sistemas físicos y ya no eliminable mediante el perfeccionamiento de las técnicas de medición. Por lo tanto, un electrón existiría en una superposición de entidades cuánticas perdiendo la propiedad de localización, lo que deja a la noción de trayectoria de una partícula en una oscuridad total. El proceso de transición de un estado de ubicación difusa a un estado exactamente localizado vía observación experimental fue llamado «colapso del estado».

La interpretación de Born tuvo una aceptación inmediata en la comunidad³⁰ y fue incorporada por Dirac en el formalismo de la mecánica cuántica transformacional. Por su parte, Schrödinger la rechazó enfáticamente, siendo seguido por de Broglie y su teoría de la doble solución, junto a la insistencia de Einstein respecto de la necesidad de volver al concepto clásico de probabilidad. El corazón de la discusión era el presunto abandono —implícito en la postura de Born— del determinismo causal, uno de los mayores principios articuladores de la física clásica. Como lo expresa la famosa ficción de Laplace, una inteligencia divina que conociera los valores de todas variables físicas del universo en un momento dado, mediante la aplicación de las leyes naturales, podría deducir tanto el pasado como el futuro del universo. Born afirma que esta ficción es más un ídolo que un ideal (Born, 1984), porque

28 Esta determina la «densidad de probabilidad» de aparición del fotón.

29 El principal es «On the Quantum Mechanics of Collisions», del 24 de julio de 1926 (en Wheeler; Zurek, 1983).

30 Una razón importante fue la derivación que hace Wentzel de la fórmula clásica de Rutherford aplicando la teoría de Born, pero el elemento decisivo sería la aparición de las relaciones de incertidumbre.

el concepto de ondas de probabilidad implica la imposibilidad de predecir con certeza el estado futuro de un sistema.

II.h. Las relaciones de incertidumbre de Heisenberg

Pero la situación se tornará aún más complicada para el determinista causal con el descubrimiento en 1927 de un principio revolucionario: el de incertidumbre. Su forjador, Werner Heisenberg, venía estudiando desde fines de 1926 la forma de lograr una interpretación física de la mecánica cuántica en sus fundamentos para dar cuenta de la raíz del conflicto que dividía la comunidad de físicos en aquel entonces. Observó que términos clásicos como «posición», «velocidad», «órbita» o «trayectoria», seguían jugando un rol importante en la interpretación física, aunque la propia mecánica cuántica había surgido de su rechazo. Al operar con espacios abstractos multidimensionales y utilizar cantidades no conmutativas, la mecánica cuántica hace imposible mantener nociones como «la trayectoria de una partícula». Sin embargo, la solución no consiste en sustituir tales conceptos por otros nuevos³¹, sino en limitar su rango de aplicabilidad, mostrando las limitaciones a que eran sometidos en el nuevo esquema matemático. Para comienzos de 1927 Heisenberg ya había obtenido importantes resultados y los envía a Pauli, quién aprueba sus ideas y lo anima a desarrollarlas en un artículo. Aceptado también por Bohr, no sin sugerir algunas modificaciones, Heisenberg publica el artículo bajo el nombre «El contenido físico de la cinemática y mecánica cuánticas» (en Wheeler; Zurek, 1983), en marzo de 1927.

Los términos clásicos —afirma Heisenberg— solo poseen significado cuando podemos especificar los experimentos que permiten medir la magnitud que representan³². Es decir, un término como «posición» de un electrón solo adquiere sentido si indicamos cómo podemos medirla mediante, digamos, un microscopio. El problema es que para registrar la posición del electrón debemos bombardearlo con al menos un fotón, lo que produce un cambio discontinuo e impredecible en el momento de la partícula. Si utilizamos una longitud de onda suficientemente corta podremos definir con bastante precisión la posición del electrón, pero entonces interferimos en gran medida su momento. Si por el contrario utilizamos longitudes de onda largas podremos determinar el momento pero la partícula sufrirá una colisión tan fuerte que nos imposibilitará conocer su posición con exactitud.

La mecánica clásica presupone que es posible asignar valores simultáneos a todas las cantidades físicas, en la mecánica cuántica el principio de incertidumbre niega tal posibilidad. Según Heisenberg «Dos cantidades conjugadas canónicamente solo pueden determinarse simultáneamente con una indeterminación característica» (en Wheeler; Zurek, 1983: 62)³³. Se refiere a pares de cantidades que cumplen las relaciones de conmutación establecidas en la mecánica matricial, como posición y momento, o energía y tiempo. «Cuanto más precisamente se determina la posición, menos precisamente se conoce el momento, y viceversa.» (en Wheeler; Zurek, 1983: 64). Nótese que el principio no prohíbe realizar mediciones simultáneas de posición y momento, sino hacerlo con grado de precisión arbitrario. Expresado matemáticamente:

$$\Delta x \Delta p \sim h$$

31 Véase más adelante la posición de Bohr y Heisenberg sobre la importancia de los conceptos clásicos respecto de la posibilidad representacional de una teoría.

32 Recuérdese que la limitación a lo observable y medible representó un pilar fundamental del enfoque adoptado por el propio Heisenberg cuando desarrolla la mecánica matricial.

33 Traducción propia.

siendo Δx la precisión con que se determina la posición, y Δp la precisión con que se determina el momento, las cuales dependen, como vimos, de la longitud de onda de la luz utilizada. Una formulación más exacta fue dada posteriormente:

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$$

Vemos como al reducirse una incertidumbre automáticamente aumenta, y no es posible que ninguna de ellas sea cero.

Ahora bien, estas limitaciones impuestas sobre conceptos como «posición» y «momento» se extienden a nociones tan importantes como «órbita» o «trayectoria», es decir, una serie de puntos en el espacio que el electrón toma sucesivamente como posiciones. El problema es que para medir una trayectoria como una órbita atómica es necesario iluminar al electrón y un solo fotón alcanza para expulsarlo completamente de la misma. Como solo se puede determinar un punto de la órbita, esta noción pierde su significado en mecánica cuántica. Lo que queda después de la colisión es una función de probabilidad sobre futuras posiciones posibles.

Heisenberg concluye su artículo con una demostración del principio a partir de la teoría transformacional de Dirac-Jordan y su ejemplificación mediante una serie de experimentos mentales. Sus consecuencias, solo comprendidas en el momento por Pauli y Bohr, eran revolucionarias respecto de los principios básicos de la física clásica. En primer lugar, la ley de causalidad recibe un nuevo golpe: «lo que está mal con la formulación estricta de la ley de causalidad, ‘cuando conocemos el presente con precisión, podemos predecir el futuro’, no es la conclusión sino la asunción.» (en Wheeler; Zurek, 1983: 83). No solo las ondas de probabilidad limitan las capacidades predictivas a la mera estadística sino que es en principio imposible conocer completamente el estado presente de un sistema. Y Heisenberg traslada inmediatamente el énfasis de «lo que puede conocerse» a «lo que realmente ocurre», es decir, de lo epistémico a lo ontológico: las cantidades no están simultáneamente bien definidas. «Afirmar que detrás del mundo estadístico percibido hay un mundo «real» en el que vale la causalidad carece de sentido, la física debe describir únicamente la correlación entre observaciones.» (en Wheeler; Zurek, 1983: 83). Por lo tanto, la medición no solamente da significado a una magnitud física sino que de alguna manera «crea» un valor particular para la misma. Esta violación de la transitividad clásica entre el sistema físico, el aparato de medición y el observador humano, es uno de los rasgos más característicos de la mecánica cuántica, y es conocido como «el problema de la medición», lo que nos introduce al problema, ya filosófico, de la interpretación de la mecánica cuántica.

III. El debate Einstein-Bohr

Podemos distinguir en las teorías físicas dos grandes partes, el *formalismo*, que es la parte propiamente matemática de la misma, y la *interpretación*, una empresa más bien filosófica, de clarificación de presupuestos y consecuencias que podemos identificar en el formalismo. La interpretación está conformada por los conceptos que dan significado físico a los símbolos matemáticos de la teoría y la imagen de la naturaleza que nos ofrece tal conglomerado conceptual. La mecánica cuántica tiene un formalismo perfectamente definido con un asombroso éxito predictivo. Es evidente que si la teoría cuántica es tan exacta en sus pronósticos debe tener un fuerte asidero en ciertas características esenciales de la naturaleza. Sin embargo, no existe una explicación universalmente aceptada respecto de cuáles son esas características, sino solo

diferentes interpretaciones, todas ellas más o menos consistentes con el formalismo cuántico. Las diferencias se encuentran en las diversas imágenes de la naturaleza que cada interpretación nos brinda, es decir, en un nivel más filosófico que científico.

III.a. La interpretación de Copenhagen

Se denomina *interpretación de Copenhagen* al primer intento general por comprender el nuevo mundo atómico representado por la mecánica cuántica, originado en aquella ciudad danesa bajo la égida de Bohr. A pesar de que Born, Heisenberg, Pauli y otros realizaron importantes contribuciones a la misma y suscribían un acuerdo en puntos fundamentales, tenían asimismo diferencias marcadas y jamás asumieron tal denominación para sus ideas³⁴.

Hasta entrados los años veinte Bohr se mostró muy reacio a aceptar la idea de cuantos de luz introducida por Einstein, cuando finalmente lo hace en 1925, la dualidad onda-partícula pasa a jugar un rol fundamental en su interpretación de la teoría. A finales de 1926 y comienzos de 1927 logró asociar sus ideas sobre la dualidad con el *postulado cuántico*, y comprendió que ninguna reinterpretación de la concepción tradicional salvaría el problema, sino que se necesitaba un nuevo instrumento lógico, al que llamó *complementariedad*. El descubrimiento de las relaciones de incertidumbre fue recibido por Bohr como una confirmación de la consistencia de su interpretación con la teoría. El 16 de setiembre de 1927 presenta sus nuevas ideas en el Congreso de Como, donde se reunieron los físicos más importantes del momento para celebrar el centenario de la muerte de Alessandro Volta³⁵.

Bohr anuncia que la mecánica cuántica no solo ha aumentado nuestro conocimiento del mundo físico sino que nos obliga a realizar una revisión de los fundamentos de la descripción de los fenómenos naturales. El problema reside en que los conceptos utilizados por la física clásica para interpretar la actividad experimental, tienen una validez restringida en física cuántica. Y empeora si tomamos en cuenta que «yace en la naturaleza de la observación física que toda experiencia debe ser expresada en términos de conceptos clásicos.»³⁶. Al igual que Kant³⁷, presupone que existe una estructura conceptual como condición necesaria de la posibilidad de una descripción objetiva de la experiencia y de una comunicación significativa de la misma. La diferencia es que su origen es empírico: conceptos clásicos como posición, tiempo o energía son un refinamiento de la descripción precientífica, inevitable a la hora de interpretar la práctica experimental.

Por lo tanto, no nos enfrentamos a un cambio conceptual —como afirmarían Kuhn (1971) y Feyerabend (1981)—, pues considerar a la luz como una tercera entidad que se

34 Según una investigación de Howard (en Faye, 2008), fue Heisenberg quien en 1955 acuñó la expresión «interpretación de Copenhagen» incluyendo las opiniones de Bohr dentro de su propia concepción y haciendo de todo un solo paquete. A pesar las diferencias entre Heisenberg y Bohr, mantenemos la denominación clásica para hacer una exposición de los puntos sustanciales de acuerdo, especialmente aquellos que fueron criticados por sus rivales (otra causa de la popularidad de la denominación). Para el debate actual véase Faye (2008).

35 Los únicos invitados que estuvieron ausentes fueron Einstein y Ehrenfest; la exposición de Bohr se titula «El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica» (Bohr, 1984, 6: 113).

36 Bohr (1984, 6: 208). Esta es la versión final del principio de correspondencia, que originalmente expresaba una analogía entre la física clásica y la cuántica en el límite de los grandes números cuánticos y funcionó como un importante principio heurístico en la Teoría Cuántica Antigua. Despojada de su significación empírica, el principio pasa a limitarse a un mapeo formal entre ambas teorías, jugando un importante rol semántico mediante la tesis de la indispensabilidad de los conceptos clásicos.

37 En Register (1997) se encuentra un detallado análisis de la influencia kantiana sobre el pensamiento de Bohr.

manifiesta unas veces como onda y otras como partícula hace a nuestra descripción incoherente. Es más bien la concepción clásica de explicación lo que debe revisarse a la luz del elemento de discontinuidad expresado en el postulado cuántico.

La esencia de la teoría puede expresarse mediante el postulado de que todo proceso atómico abierto a observación directa involucra un elemento esencial de discontinuidad o más bien individualidad, completamente ajeno a las ideas clásicas y simbolizado por el cuanto de acción de Planck. (Bohr, 1984, 6: 114)

El modo clásico de descripción, caracterizado por una descripción espaciotemporal y causal de los fenómenos, se basa en la idea de que su interacción con los instrumentos de medición puede ser despreciada. Cuando aplicamos el postulado cuántico a la observación notamos que se introduce una perturbación esencial de los fenómenos.

«La afirmación de causalidad y la coordinación espaciotemporal, cuya unión caracteriza las teorías clásicas, deben verse como aspectos complementarios aunque excluyentes de la descripción de la experiencia» (Bohr, 1984, 6: 114). Podemos definir el estado de un sistema determinando la energía y momento de sus partes constituyentes, lo que nos permitiría realizar una predicción causal estricta mediante el principio de conservación de aquellas cantidades, si el sistema es cerrado. Pero esto elimina la posibilidad de toda observación, porque esta implica perturbaciones que hacen imposible toda definición del sistema. Y como la descripción espacio-temporal presupone la observación, queda excluida por la afirmación de causalidad. «Cualquier conclusión basada en la conservación de la energía y el momento en la conducta dinámica, implica renunciar a su curso en el espacio y el tiempo» (Bohr, 1984, 6: 209). Si, por el contrario, queremos ubicar espaciotemporalmente una partícula debemos observarla (es decir, someterla a interacciones físicas), lo que implica un intercambio de momento y energía con los instrumentos, que quiebra la cadena causal determinando una descripción estadística.

Esta es la primera aparición de la noción de *complementariedad*, y se usa para caracterizar la relación entre dos modos de descripción clásicos cuando se aplican a fenómenos cuánticos: el *espacio-temporal* y el *causal*. Si bien las dos representaciones son excluyentes, debemos reconocerlas como complementarias, porque *son ambas necesarias para poder ofrecer una explicación exhaustiva de los fenómenos*. En su exposición, Bohr señala que esta situación se manifestó primeramente en el dualismo onda-partícula, interpretado no como un dilema entre dos teorías rivales sino como aspectos complementarios del mismo fenómeno (Bohr, 1984, 6: 114). Esto se transparenta en fórmulas cuánticas como $E = h\nu$ y $P = h\lambda$, que relacionan conceptos ondulatorios (ν , λ) y corpusculares (E , P). Y lo mismo puede afirmarse de las partículas materiales y las ondas asociadas por de Broglie.

Las relaciones de incertidumbre no son más que una expresión matemática que manifiesta una aplicación de la complementariedad a los vectores espaciotemporales y de energía-momento. La derivación de Bohr, muestra que son una consecuencia inevitable del análisis de los conceptos empleados para describir la observación a la luz del postulado cuántico. Nos muestran el precio que debemos pagar por considerar simultáneamente dos cantidades complementarias. Resumiendo: el postulado cuántico implica una discontinuidad esencial que engendra la complementariedad entre las descripciones espaciotemporal y causal, posee la dualidad onda-partícula como base ontológica y las relaciones de incertidumbre manifiestan sus implicaciones operacionales (Jammer, 1974).

Tanto para determinar la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz, como la posición y el momento de una partícula material se requieren arreglos experimentales excluyentes,

que impiden que podamos tener una imagen unificada. Por lo tanto, debemos *abandonar el empeño por obtener una representación pictórica o visual de los procesos atómicos independiente de nuestras observaciones*. Sin embargo, esto no implica que Bohr sea un subjetivista, porque la dependencia de la observación jamás justifica la posible influencia de elementos estrictamente subjetivos del observador. Tampoco era un positivista ni un instrumentalista despreocupado por la «realidad física» representada por la teoría. Por el contrario, es justamente el conocimiento detallado de la estructura interna de los átomos (su discontinuidad), cuya realidad jamás es puesta en duda, lo que ha permitido conocer la limitación natural del modo clásico de descripción, y no algún principio filosófico fundamental (Folse, 1985). La complementariedad, lejos de borrar la distinción sujeto-objeto, representa la única forma de mantener la objetividad de la descripción cuántica, al mostrar los límites en la aplicación de los conceptos clásicos.

Heisenberg suscribe la misma concepción semántica y epistemológica que Bohr, pero centrada en la noción de *teoría cerrada*³⁸. Al igual que Bohr, considera que la física cuántica no ataca la validez de la física clásica sino que únicamente restringe su aplicabilidad. Sin embargo, ya a partir de los años 30's y más explícitamente a partir de los 50's, Heisenberg se distancia de Bohr respecto del enfoque *ontológico*. En este sentido, considera que la teoría cuántica no adolece de ningún tipo de contradicción, sino que representa perfectamente la estructura más profunda del mundo físico. Esta apreciación se vincula con la interpretación realista de las teorías científicas, que Heisenberg suscribe en general (ver Hickey, 2005). En Heisenberg (1959) se afirma que si llegase a utilizarse la expresión *cosa en sí* en física atómica debería referirse a una estructura matemática que se deduce indirectamente de la experiencia. De aquí se deriva su crítica al materialismo, cuya ontología —afirma Heisenberg— se basa en la ilusión de que la directa realidad del mundo que nos rodea puede ser extrapolada al ámbito atómico. La función de probabilidad no representa una serie de acontecimientos en el tiempo, sino una tendencia hacia acontecimientos junto a nuestro conocimiento de ellos, un conjunto de sucesos posibles.

En este asunto, la física moderna toma partido contra el materialismo de Demócrito y a favor de Platón y los pitagóricos. [...] Las partículas elementales, en el Timeo de Platón, no son en definitiva sustancia sino formas matemáticas... Las únicas formas matemáticas conocidas en esa época eran los sólidos regulares o los triángulos que forman su superficie. No puede dudarse que en la moderna teoría cuántica las partículas elementales serán también finalmente formas matemáticas pero de naturaleza mucho más complicada (Heisenberg, 1959: 53).

Las formas matemáticas que representan a las partículas elementales son las soluciones de las leyes del movimiento. «El átomo de la física moderna solo puede ser simbolizado mediante una ecuación diferencial parcial en un espacio abstracto multidimensional» (Heisenberg, 1952: 31). De este modo la interpretación de Copenhague alejó a los físicos de las concepciones materialistas prevalecientes en el siglo XIX, acercándolos al idealismo. La noción de realidad objetiva parece tambalearse ante la imposibilidad en principio de preguntar por la existencia *en sí* de las partículas. El objeto de la ciencia no es la naturaleza en sí misma sino la naturaleza sometida a la interrogación de los hombres (Heisenberg, 1955).

38 Una teoría es cerrada si sus leyes son definitivamente verdaderas respecto del dominio experimental en el cual sus conceptos pueden aplicarse, tal status poseen la mecánica newtoniana, la mecánica estadística, la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad especial.

III.b. La crítica de Einstein

El enfrentamiento intelectual entre Bohr y Einstein es sin lugar a dudas uno de los más trascendentes de la historia de la ciencia, y se inicia cuando se encuentran por primera vez en 1920, época en la que Bohr aún no aceptaba la teoría de los cuantos de luz. Einstein, por el contrario, reconocía plenamente la dualidad onda-corpúsculo, pero consideraba plausible la posibilidad de combinar causalmente ambos aspectos. Con el surgimiento de la mecánica cuántica, Einstein manifiesta con mayor energía su oposición a la nueva tendencia discontinuista y acausal que la escuela de Copenhagen-Göttingen quería imponer. En carta a Born de 1924 afirma que si un electrón puede elegir el momento y dirección de su movimiento, hubiera preferido ser un zapatero o un empleado de casino antes que un físico (Folse, 1985). Ante la aparición de la interpretación probabilística de Born, vuelve a escribirle para negar que la mecánica cuántica sea el camino correcto: *Dios no juega a los dados con el universo*.

A partir del Congreso de Como y especialmente del Congreso de Solvay del mismo año, en el que si participaría Einstein, la comunidad física de la época reconoció la interpretación de Bohr como válida. En Solvay, Bohr expone su interpretación de la complementariedad con la esperanza de que cierta analogía de sabor positivista entre la complementariedad y la filosofía de Einstein pueda convencerlo. A pesar de su soledad, Einstein se resiste a los argumentos de Bohr, Heisenberg, Born, Dirac, etcétera, e inicia una serie de experimentos mentales destinados a demostrar que es posible proveer una especificación espaciotemporal exacta de un proceso individual junto con una explicación detallada de la transferencia de energía y momento. Supongamos que hacemos pasar una serie de fotones a través de una rendija para que luego impacten en una pantalla. Cuando un fotón atraviesa la rendija, el efecto de difracción hace que la función de onda asociada se expanda por toda la pantalla registradora. De acuerdo con la interpretación de Born, todo punto de la pantalla tiene cierta probabilidad de ser impactado. Y si asumimos que mientras que el objeto no impacta está virtualmente presente en toda la región de la función de onda, el colapso del paquete de ondas implicaría cierta acción a la distancia, lo que lleva a contradicción con la teoría de la relatividad. Bohr, apoyándose en las intervenciones de Heisenberg, Pauli y Dirac, se limita a afirmar que la función de onda no representa un curso de eventos en el espacio y tiempo, sino una mezcla de los eventos y nuestro conocimiento de ellos. Por lo tanto, el estado de cosas entre dos observaciones no puede describirse y los resultados de las observaciones nunca pueden objetivarse completamente (Bohr 1984, 6: 99).

El Congreso de Solvay 1927 termina con una victoria de Bohr, al conseguir defender la consistencia lógica de su interpretación, pero no convence a Einstein, quien en una carta a Schrödinger de 1928 la llama «la filosofía o religión tranquilizante de Heisenberg y Bohr.» (en Plotnitsky, 2009). A pesar de esto, sería la única interpretación aceptada en los siguientes 25 años, y para muchos físicos lo sigue siendo en la actualidad. En este sentido, la búsqueda de una teoría consistente de la mecánica de los átomos alcanzó su final en Solvay 1927 (Jammer, 1974).

En el Congreso de Solvay 1930, Einstein vuelve a atacar la validez de la mecánica cuántica, mediante un experimento mental que muestra la posibilidad de medir simultáneamente y con total exactitud dos cantidades complementarias, energía y tiempo, violando el principio de incertidumbre. Imaginemos una caja llena de radiación con una abertura operada por un reloj encerrado en la caja, que abre y cierra la tapa de abertura de modo de dejar salir solo un fotón en cada intervalo de tiempo. Pesando la caja en un campo gravitacional antes

y después de la emisión podría calcularse la energía del fotón mediante $E = mc^2$ con total exactitud y como ya conocíamos el tiempo en cual el fotón abandonó la caja, se demuestra la falsedad del principio de incertidumbre. Bohr no podía permitir un ataque de esta magnitud y luego de una noche de intensa búsqueda pudo volver a refutar a Einstein, mostrando que la medición del peso de la caja provoca un desplazamiento del campo gravitacional, lo que altera las mediciones realizadas por el reloj. El experimento mental de Einstein contradecía su propia teoría de la relatividad, por lo que el principio de incertidumbre permanece a salvo.

A partir de entonces Einstein abandonaría su serie de intentos de demostrar que la mecánica cuántica era una teoría incorrecta y comienza a trabajar en un nuevo argumento. Quizás la teoría sea correcta, es posible que logre aprehender parte de la realidad, pero sin dudas no es toda la verdad, por lo que es una teoría incompleta. Esto quiere decir que hay elementos de la realidad física que la teoría no ha logrado formalizar y que en caso de ser conocidos harían desaparecer las probabilidades e incertidumbres.

En mayo de 1935 Einstein, junto a dos jóvenes físicos, Boris Podolsky y Nathan Rosen, presenta el así llamado argumento EPR, con la intención de demostrar que la mecánica cuántica es incompleta (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935). La base del mismo es el realismo científico, la concepción de que existe un mundo conformado por objetos ordinarios con propiedades reales, independientes de toda observación. Los métodos estadísticos son útiles para manejar los resultados experimentales en el estudio de los fenómenos físicos, pero no proveen una descripción completa de los mismos. Aquel presupuesto es una imposición ontológica sobre la aceptabilidad de las teorías, y no es aceptable que una teoría, por mejor confirmada que resulte, nos obligue a modificarlo, como pretende Bohr.

La estructura del argumento EPR consta de cuatro presupuestos dos explícitos y dos implícitos:

1. *Criterio de realidad*: si es posible predecir con exactitud el valor de una cantidad física sin modificar el sistema, entonces existe un elemento de la realidad física en el sistema asociado a esa cantidad física.
2. *Criterio de completitud*: una teoría física es completa si posee una contraparte para todo elemento de la realidad física y permite calcular valores precisos para todos ellos.
3. *Asunción de separabilidad*: dos sistemas físicos que interactuaron en el pasado y luego se separaron lo suficiente, ya no pueden interactuar entre sí en el sentido de que ningún cambio en uno puede influir al otro. Si esto se cumple decimos que el sistema posee la propiedad de localidad, algo que Einstein da por sentado como evidente.
4. *Asunción de validez de la mecánica cuántica*: es una teoría cuyas consecuencias han sido exitosamente confirmadas por la experiencia.

La estrategia consiste en mostrar que si suponemos (1), las asunciones (3) y (4) nos permiten probar que pueden existir cantidades complementarias con valores reales simultáneos, y por lo tanto la mecánica cuántica no puede satisfacer (2). Y como (1), (3) y (4) son extremadamente plausibles, la conclusión es inevitable. Para demostrarlo utiliza el siguiente experimento mental: imaginemos un sistema compuesto por dos partículas que interactúan y luego se separan de modo que ya no pueden influirse mutuamente. Si medimos la posición de la primera partícula, (3) nos asegura que podemos predecir con exactitud la posición de la segunda pues no hay perturbación; y lo mismo puede decirse del momento. Aplicando (1) concluimos que tanto a la posición como al momento de la segunda partícula les corresponden elementos de la realidad física. Sin embargo, si (4) es correcto, entonces el principio de

incertidumbre nos inhibe de la posibilidad de determinar ambos valores simultáneamente y con total precisión. Por lo tanto, *existen elementos de la realidad física cuyos valores no pueden predecirse con exactitud mediante la mecánica cuántica*, por (2): esta no es una teoría completa.

Sin embargo, existen dos importantes posibilidades para escapar a la conclusión de Einstein: rechazar (1) o (3)¹. El primer camino implica negar realidad física independiente a los objetos cuánticos y será el transitado por Bohr en su respuesta a Einstein. El segundo parecería implicar que la información cuántica puede transmitirse a velocidades superiores a la de la luz, lo que se encuentra en franca oposición con la teoría de la relatividad.

Las repercusiones del artículo fueron importantes, por ejemplo, Schrödinger escribe un artículo llamado «La situación actual en mecánica cuántica»² completamente motivado por EPR, como él mismo reconoce. Allí introduce el concepto de *enmarañamiento cuántico* (*quantum entanglement*): cuando dos sistemas interactúan y luego se separan, la función de onda que describía el estado combinado no puede dividirse en factores que puedan asignarse individualmente a cada sistema, en este caso se produce un enmarañamiento en el conocimiento de ambos sistemas, que solo se quiebra mediante la medición de uno de ellos. Sin embargo, ataca la concepción de que las variables no medidas permanecen en un estado de *realidad difusa* hasta que se realiza la medición. Esto lo hace mediante un experimento mental que muestra el absurdo que se produce al trasladar ciertas características cuánticas al mundo macroscópico. Imaginemos un gato encerrado en una cámara junto a un contador que contiene una pequeña cantidad de sustancia radiactiva que tiene la misma probabilidad de decaer en una hora que de no hacerlo. Si lo hace entonces el contador rompe un recipiente de veneno que mata al gato, si no lo hace el gato permanece vivo. Si dejamos pasar una hora y abrimos la cámara, encontraremos al gato vivo o muerto, pero si es la observación lo que causa el colapso, entonces durante esa hora el gato estaba en un estado indefinido de vida-muerte, lo que va contra nuestra intuición de que un gato solo puede estar vivo o muerto, no en un misterioso estado intermedio. En la lectura de Einstein, podríamos afirmar que la lógica suposición de que el gato ya estaba vivo o muerto antes de abrirse la cámara, equivale a sostener que existen ciertas características relevantes del sistema físico que la mecánica cuántica no es capaz de capturar, justamente las que determinan el estado del animal. Y esto es equivalente a sostener que la mecánica cuántica es una teoría incompleta.

Pero el que se sentía obligado a responder al desafío de Einstein era sin dudas Bohr, quien el 13 de julio de 1935 presenta un artículo con el mismo nombre pero distinta respuesta que Einstein³. Allí afirma que la situación presentada por Einstein y sus asociados no tiene nada nuevo ni excepcional, sino que es inherente a cualquier fenómeno cuántico. El error del argumento EPR radica en una de sus premisas: el criterio de realidad; este presupuesto de la filosofía natural clásica ya no es sostenible en esos términos. El problema de la noción de *realidad física* manejada por Einstein es que contiene una *ambigüedad esencial* cuando se aplica a problemas cuánticos. Al medir la posición de la segunda partícula podemos conocer la posición de la primera pero perdemos la base para una aplicación no

1 Excluyo la posibilidad de negar (4) por ser altamente implausible y la de modificar la lógica (clásica) subyacente a la discusión, como lo hacen von Neumann y Birkhoff (1936: 823-843), introduciendo lógicas polivalentes en mecánica cuántica, por exceder el alcance de este trabajo.

2 «The Present Situation in Quantum Mechanics», en Wheeler y Zurek (1983).

3 «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered Complete?» Originalmente en *Physical Review* 48, 696-702 (en Bohr, 1984, 7: 131).

ambigua de la ley de conservación del momento al sistema entero, y en consecuencia, no podemos predecir el momento de la primera partícula. Y es justamente la exclusión mutua de los procedimientos experimentales que permiten medir posición y momento lo que permite definir de modo no ambiguo estas cantidades complementarias. La ambigüedad del criterio de realidad de EPR reside en la expresión *sin perturbar el sistema en ninguna medida*, pues en física cuántica el objeto a medir y el instrumento de medición forman una unidad no analizable. Por lo tanto —concluye Bohr— es el rasgo de *totalidad no analizable* el que salva la completitud de la mecánica cuántica. El error de Einstein consiste en no tomar en cuenta la diferencia entre combinar una partícula con un arreglo experimental y combinar la misma partícula con otro arreglo experimental. A pesar del éxito de la defensa, Einstein y otros físicos la ven como un refugio en el oscurantismo, y se comienzan a desarrollar las posibilidades interpretativas abiertas por la consideración de la incompletitud de la mecánica cuántica, es decir, las teorías de variables ocultas.

IV. Desarrollos posteriores

Pasada la guerra mundial comenzaron a articularse interpretaciones alternativas a la de Copenhagen, generando un verdadero mapa de concepciones que sobrepasa ampliamente las pretensiones del este trabajo. Entre ellas, se destaca la reaparición de teorías de variables ocultas, especialmente a partir del trabajo de David Bohm (1952).

El rasgo central que comparten este grupo de interpretaciones es la afirmación de la existencia de características relevantes en los sistemas físicos respecto de las cuales no existe ninguna forma de determinar experimentalmente su valor numérico. Suponen que ciertos parámetros desconocidos serían los responsables de las características estadísticas de la mecánica cuántica. El conocimiento del estado del sistema asociado al conocimiento del valor de las variables ocultas, determinaría unívocamente el valor que asumen todos los observables. Las probabilidades e incertidumbres cuánticas aparecen únicamente por nuestro desconocimiento de las variables ocultas.

Ya en 1926 Max Born había afirmado que quien no se sintiese satisfecho con su interpretación probabilística podía suponer que existen parámetros aun no introducidos en la teoría que determinen los sucesos individuales (Born, 1926). Cuando presenta su axiomatización de la mecánica cuántica en 1932, von Neumann demuestra la incompatibilidad de una explicación de variables ocultas con los principios fundamentales de la mecánica cuántica. Afirma, que no hay forma de convertir la descripción indeterminista de la física cuántica en una determinista a menos que la teoría sea falsa (von Neumann, 1955).

Haciendo caso omiso de tal demostración, Bohm introduce una clase de variable oculta que resulta compatible con la mecánica cuántica, porque no pretende introducirlas en su formalismo (como suponía von Neumann) sino que construía una nueva teoría, de la que se derivan las mismas predicciones. Al considerar la posición como una variable oculta, completa la descripción cuántica con tales parámetros y recupera la visión clásica del mundo. Las variables ocultas determinan con exactitud los resultados probables y su conocimiento permitiría la predicción de los valores resultantes de cualquier experimento con total certidumbre. Las probabilidades serían puramente epistemológicas, se deben exclusivamente a nuestra ignorancia respecto del valor de las variables ocultas. Al lanzar una moneda no podemos saber si saldrá cara o número, pero el resultado está determinado por las condiciones iniciales y las leyes de la física. De la misma manera, el espín del electrón está determinado por las condiciones iniciales, las leyes cuánticas y las variables ocultas. La gran diferencia es

que las propiedades que determinan el espín de un electrón o el camino que seguirá un fotón son incognoscibles en principio.

De esta forma, las teorías de las variables ocultas restauran la vieja imagen determinista de la naturaleza, pero al precio de reconocer que la naturaleza es, al menos en algunos aspectos, *incognoscible*. Por otra parte, son teorías que no tienen ninguna diferencia predictiva con la mecánica cuántica (aunque si un gran aumento en complejidad técnica), por lo cual no hay forma experimental de discernir sus méritos relativos, y en este sentido no sería una alternativa auténtica.

En 1964 el matemático John Bell publicó un importante artículo que mostraba que la afirmación de EPR implicaba una desigualdad que no era satisfecha por algunas correlaciones cuánticas y podía llegar a testearse experimentalmente. Para ello produjo un modelo de variables ocultas muy sencillo, que solo cubría la medición de cualquier componente del espín de una partícula de espín semientero (Bell, 1964). El *Teorema de Bell* afirma que una teoría de variables ocultas que sea local no puede reproducir todas las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica. La desigualdad que deriva debe ser satisfecha por toda teoría que sea a la vez realista y local. Por otro lado, la teoría cuántica no obedece la desigualdad de Bell y predice que será violada. Los modelos de variables ocultas como el de Bohm tenían la extraña consecuencia de que la conducta de una partícula dependía de las propiedades de todas las demás, sin importar lo alejadas que estén.

La situación era asombrosa, por primera vez profundos aspectos de la interpretación filosófica de la teoría cuántica podían ser testeados mediante la experimentación. Muchos experimentos se han realizado en las décadas siguientes, siendo el más famoso de ellos el dirigido por Alain Aspect en 1982. Los resultados son claros: la desigualdad es violada, hay total acuerdo con las predicciones de la teoría cuántica, por lo que el realismo local debe ser abandonado. La revelación de que la naturaleza posee la extraña cualidad de no localidad, proporcionaba un golpe mortal a la concepción de Einstein (Aspect; Dalibard; Roger, 1982). En su visión, el traspaso de información entre puntos muy alejados implicaba una especie de comunicación física más rápida que la velocidad de la luz.

Aunque no había previsto esta posibilidad, es compatible con la insistencia de Bohr en que las partículas separadas debían ser consideradas como aspectos de un único sistema. Debemos aceptar que las partículas no son reales hasta ser observadas o bien que existe una transferencia de información a velocidad superior a la de la luz. El problema es que esto entra en conflicto con la teoría de la relatividad de Einstein, que prohíbe transmisiones de información a velocidades superiores a la de la luz. Sin embargo, esta conexión a la distancia de las partículas no puede usarse para enviar mensajes y mucho menos materia, que es la principal prohibición de la relatividad.

Luego de casi un siglo de discusiones el problema de la interpretación de la mecánica cuántica aún está abierto. Parecería que el abandono del realismo simplificaría significativamente las dificultades pero muchos físicos y filósofos lo consideran indeseable. Seguramente el éxito de los intentos recientes por crear una teoría que unifique la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad —una teoría del todo, como la llaman los físicos— representaría un gran progreso para la comprensión de la imagen del mundo que nos brinda la física contemporánea.

V. Bibliografía

- Aspect, A.; Dalibard, J. y Roger, G. (1982), «Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers», en *Physical Review Letters*, v. 49, iss. 25, pp. 1804-1807.
- Bell, J. (1964), «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox», en *Physics* 1, 195.
- Bohm, D. (1952), «A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables», en *Physical Review*, 85, pp. 166-193.
- Bohr, N. (1913), «On the constitution of atoms and molecules». En *Philosophical Magazine*, 26, pp. 1-24, 476-502, 857-875.
- _____ (1984), *Collected Works*, Amsterdam, North Holland, 7 v.
- Born, M. (1926), «Quantenmechanik der Stobvorgänge», en *Zeitschrift für Physik*, 38, pp. 803-827.
- Brackett, F. (1922), «A new series of spectrum lines», en *Nature*, 109, 209.
- Clemente de la Torre, A. (1922), *Física cuántica para filo-sofos*, Buenos Aires, FCE.
- Darrigol, O. (1992), *From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, Berkeley, University of California Press.
- De Broglie, L. (1925), «Recherches sur la théorie des quanta», en *Annales de Physique* 3, pp. 22-128.
- Debye, P. (1916), «Quantenhypothese und Zeeman-Effekt», en *Göttinger Nachrichten*, pp. 142-153.
- Einstein, A. (1909), «Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung», en *Physikalische Zeitschrift*, v. 10, pp. 817-825.
- _____ (1905), «On a Heuristic Point of View about the Creation and Converion of Light», en Ter Haar (1967).
- Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. (1935), «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», en *Physical Review*, v. 47, pp. 770-780.
- Epstein, P. (1916), «Zur Theorie des Starkeffektes», en *Annalen der Physik*, 50, pp. 489-520.
- Faye, J. (2008), «Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics», en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, disponible en <<http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/>>.
- Feyerabend, P. (1981 [1975]), *Tratado contra el Método*, Madrid, Tecnos.
- Folse, H. (1985), *The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity*, Amsterdam, North Holland.
- Franck, J. y Hertz, G. (1914), «Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben», en *Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft*, 16, 457-467.
- Frenkel, J. (1926), «Die Elektrodynamik des rotierenden Elektrons», en *Zeitschrift für Physik*, 37, pp. 243-262.
- Geiger, H. y Mardsen, E. (1910), «The scattering of α -particles by matter», en *Proceedings of the Royal Society*, 83, pp. 492-504.
- Goudsmit, S. y Uhlenbeck, G. (1925), «Opmerking over de spectra van waterstof en helium», en *Physica*, 5, pp. 266-270.
- Heisenberg, W. (1952), *Philosophic problems of nuclear science*, Greenwich, Fawcett Publications.
- _____ (1959 [1958]), *Física y filosofía*, Buenos Aires, La Isla.
- _____ (1985 [1955]), *La imagen de la naturaleza en la física actual*, Buenos Aires, Orbis.
- Hickey, T. (2005), *History of the Twentieth-Century Philosophy of Science*, disponible en <<http://www.philsci.com/index.html>>.
- Jammer, M. (1966), *The conceptual development of quantum mechanics*, Nueva York, Mc Graw-Hill.
- _____ (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Nueva York, John Wiley and Sons.
- Kragh, H. (2000), «Max Planck, The Reluctant Revolutionary», en *Physics World*, diciembre, disponible en <<http://physicsworld.com/cws/article/print/373>>.
- Kuhn, T. (1978), *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Oxford, Oxford University Press.
- _____ (1971 [1962]), *La Estructura de las Revoluciones Científicas*, México, FCE.

- Ladenburg, E. (1903), «Untersuchungen über die entladende Wirkung des ultravioletten Lichtes auf negativ geladene Metallplatten im Vakuum», en *Annalen der Physik*, 12, pp. 558-578.
- Laplace, P. (1951 [1820]), *A Philosophical Essay on Probabilities*, Nueva York, Dover Publications.
- Lennard, P. (1902), «Über die lichtelectrische Wirkung», en *Annalen der Physik*, 8, 149-198.
- Lewis, G. N. (1926), «The conservation of photons», en *Nature*, 118, pp. 874-875.
- Lyman, T. (1914), «An extension of the spectrum in the extreme-violet», en *Physical Review*, 3, pp. 504-505.
- Millikan, R. (1916), «A direct photoelectric determination of Planck's h», en *Physical Review*, 7, pp. 355-388.
- Navarro Veguillas, L. (2004), «Einstein y los Comienzos de la Física Cuántica: de la Osadía al Desencanto», en *Investigación y Ciencia*, noviembre, pp. 38-49.
- Pauli, W. (1925), «Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren», en *Zeitschrift für Physik*, 31, pp. 765-785.
- Pfund, A. (1924), «The emission of nitrogen and hydrogen in the infrared», en *Journal of the Optical Society of America*, 9, pp. 193-196.
- Planck, M. (1900a), «Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung», en *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, v. 2, pp. 202-204.
- _____ (1900b), «Zur Theorie des Gesetzes der Energie verteilung im Normalspektrum», en *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, v. 2, pp. 237-245.
- _____ (1901), «On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum», en *Annalen der Physik*, v. 4, p. 553.
- Plotnitsky, A. (2009), *Epistemology and probability*, Nueva York, Springer.
- Polkinghorne, J. (2002), *Quantum Theory: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press.
- Popper, K. (1985), *Teoría cuántica y el cisma en Física*, Madrid, Tecnos.
- Rae, A. (1988), *Física cuántica: ¿ilusión o realidad?*, Madrid, Alianza.
- Rayleigh, L. (1900), «Remarks upon the law of complete radiation», en *Philosophical Magazine Series*, 5, V. 49, N° 301, pp. 539-540.
- Register, B. (1997), «Complementarity: Content, Context and Critique», en *Enlightenment*, disponible en <http://enlightenment.supersaturated.com/essays/text/bryanregister/bohr_complementarity.html>.
- Rodríguez, P. (2007), *Física Cuántica*, Montevideo, CEBA.
- Rutherford, E. (1911), «The Scattering of Alpha and Beta Particles by Matter and the Structure of the Atom», en *Philosophical Magazine*, s. 6, v. XII, pp. 669-88.
- Schrödinger, E. (1928), «Quantization as a Problem of Proper Values», en *Collected Papers on Wave Mechanics*, Londres, Blackie & Son Ltd.
- Schwarzschild, K. (1916), «Zur Quantenhypothese», en *Berliner Berichte*, 548-568.
- Slater, J. (1924), «Radiation and atoms», en *Nature*, 118, 307-308.
- Sommerfeld, A. (1916a), «Zur Quantentheorie der Spektrallinien», en *Annalen der Physik*, 51, 1-94, 125-167, en Ter Haar (1967).
- _____ (1916), «Zur Theorie des Zeeman-Effekts der Wasserstofflinien, mit einem Anhang über den Stark-Effekt», en *Physikalische Zeitschrift*, 17, 491-507.
- Stoner, E. (1916), «The distribution of electrons among atomic levels», en *Philosophical Magazine*, 48, 719-726.
- Ter Haar, D. (ed.) (1967), *The Old Quantum Theory*, Oxford, Pergamon Press.
- Thomas, W. (1925), «Über die Zahl der dispersionselektronen, die einem stamären Zustände zugeordnet sind», en *Die Naturwissenschaften*, 13, p. 627.
- Thomson, J. J. (1897), «Cathode rays», en *Philosophical Magazine*, s. 5, v. 44.
- _____ (1904), «On the structure of the atom», en *Philosophical Magazine*, 7, 237-265.
- Van Der Waerden, B. L. (ed.) (1967), *Sources of Quantum Mechanics*, Nueva York, Dover Publications.

- Von Neumann, J. (1955 [1930]), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Londres, Princeton University Press.
- Von Neumann, J. y Birkhoff, G. (1936), «On the logic of quantum mechanics», en *Annals of Mathematics*, 37, pp. 823-843.
- Von Weizsäcker, C. (1974), *La imagen física del mundo*, Madrid, La Editorial Católica.
- Wheeler, J. y Zurek, H. (eds.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Nueva Jersey, Princeton University Press.
- Wien, W. (1894), «Temperatur und Entropie der Strahlung», en *Wiedemannsche Annalen der Physik*, v. 52, pp. 132-165.

16. La teoría del big bang en la red del conocimiento

I. Mapas del universo

Desde tiempos inmemoriales los seres humanos confeccionaron mapas del cielo. Una característica fundamental para que pudieran ser mejorados, compartidos y utilizados durante años, es que el cielo presenta un paisaje estable, que los antiguos describieron con figuras. Otra característica fundamental es que el cielo nocturno parece desplazarse del este al oeste, de modo similar a como lo hacen el Sol y la Luna. No solo hay puesta de sol cada día, sino que hay puesta de Luna y puesta de estrellas.

Casi todos estos mapas tenían una presuposición que no se ponía explícitamente en duda: todas las estrellas están a la misma distancia de la Tierra. Esta manera de concebir al universo como un globo con la Tierra en el centro y las estrellas en una gran cúpula fue persistente y, podemos arriesgar, fundada en nuestra más básica percepción. En verdad cuando se observa a lo largo de la noche la Cruz del Sur o Las Tres Marías se aprecia que estas estrellas se desplazan a lo largo del cielo nocturno formando un conjunto solidario (figura 1). Si esto no fuera así, no agruparíamos a tales estrellas en constelaciones. Las constelaciones (Orión, La cruz del sur, Centauro, etcétera) son grupos de estrellas en ciertas zonas del cielo que parecen formar un casquete o cúpula que rodea a la Tierra.



Figura 1. Las dos estrellas más intensas son α y β de Centauro que apuntan a la Cruz del Sur.

Si algunas de ellas estuvieran más cerca y otras más lejos, el efecto que esperaríamos es el que observamos al viajar en la ruta y pasar cerca de un bosque. Los árboles del fondo y los árboles del frente del bosque, parecen tener un movimiento unos respecto de otros de manera que a medida que avanzamos por el costado del bosque, los árboles del frente van ocultando diferentes árboles del fondo. Este efecto conocido como efecto de *paralaje*, nos da una clara idea de que no todos los árboles están a la misma distancia de nuestra observación.

La primera mala pasada que nos ha jugado la naturaleza ha sido que las estrellas no muestran paralaje a simple vista. No podemos darnos cuenta de cuán lejos o cuán cerca está una estrella mirándola durante toda la noche, o de una noche para la siguiente, o esperando que pasen cientos de años. La situación se parece al caso del bosque cuando el bosque está tan lejos que nuestro movimiento no modifica la manera en que la primera fila oculta a los árboles del fondo. Sin el efecto de paralaje la hipótesis más simple es que todas esas estrellas están a la misma distancia. Los antiguos compartían estos criterios de simplicidad de modo que su concepción del cielo era la de un enorme casquete con estrellas empotradas en él, girando en torno a la Tierra. La actitud podría resumirse en «dime lo que ves, y te diré qué hay».

Pero ¿por qué la humanidad se dedicó desde hace tanto tiempo a representar el cielo y el universo? Esta pregunta tiene muchas aristas para explorar. Señalemos que en caso de que no dispongamos de mapas de cierta zona de la Tierra, como es el caso de los océanos y el desierto, en donde todo luce igual o cambia sin dejar rastro del paisaje anterior, el cielo es el único patrón para orientarnos.

Así, los mapas del cielo son mapas útiles para las rutas marítimas y desérticas. Combinando el aspecto del cielo con lo que marca un reloj sincronizado con una ciudad conocida y sabiendo que la Tierra es esférica y cuánto mide su radio, podremos saber cuántas millas hemos navegado hacia el oeste, tal como Colón lo establecía noche a noche.

Pero si estos motivos eran suficientes para la tarea cartográfica de los antiguos, no parecen serlo en la actualidad. Los mapas actuales del universo no obedecen a una necesidad de mantener rutas comerciales entre diferentes sistemas solares. Al menos no todavía.

Un buen mapa puede darnos buenos motivos para conjeturar la manera en que el universo está estructurado, de qué modo pudo haber comenzado, si es que tuvo un comienzo y de qué modo terminará, si es que tiene un final.

Por muy alentadora que pueda ser la situación actual respecto de la acumulación de datos, la precisión y las correlaciones que hemos encontrado, no debemos perder de vista en la empresa científica que nuestras mejores explicaciones de lo que se registra y se observa son siempre una apuesta conjetural. Tenemos tecnología para observar más allá de lo que nuestros sentidos nos permiten, tenemos técnicas para decidir cuáles datos están correlacionados con cuáles otros, tenemos la capacidad de idear experimentos que permitan chequear si hemos hecho buenas predicciones, pero todo esto no impedirá que haya explicaciones alternativas a la que hemos propuesto. La empresa científica es abierta a la revisión. Y uno de los aspectos más interesantes de la ciencia es que por momentos las revisiones nos cambian drásticamente la manera de concebir nuestro entorno. En este capítulo intentaremos recorrer el sendero que nos llevó como comunidad científica, a creer que la teoría que mejor ajusta con los datos es la Teoría del *Big Bang*, una teoría que a grandes rasgos indica que el universo apareció con una gran explosión y desde ese momento se sigue expandiendo. Pondremos de relieve en qué aspectos los científicos han tratado de evitar los cabos sueltos y confeccionar un cuadro coherente que nos de la satisfacción de haber comprendido algo de la naturaleza. Los astrónomos y astrofísicos involucrados

no han tomado decisiones irracionales o apresuradas. Se han comportado como se espera que lo hagan frente a las evidencias apoyando la mejor explicación del inmenso volumen de información disponible. Sin embargo el camino desde los datos a la teoría está repleto de decisiones e interpretaciones y es nuestra intención ponerlas en primer plano.

1.a. Métodos de medición de distancias

Al no poder utilizar una cinta métrica, los métodos para determinar distancias a los astros deben vérselas con la paralaje.

El método de medir la paralaje se basa en consideraciones geométricas sencillas. Ya los antiguos griegos utilizaban estos métodos geométricos para determinar distancias. Por ejemplo, si queremos conocer el ancho de un río, podemos fijar dos estacas en una orilla y notar que desde cada una de ellas se debe apuntar con diferente ángulo para observar un árbol ubicado en la otra orilla (figura 2a). En el caso de querer determinar la distancia a una estrella, realizamos observaciones desde dos puntos distintos de la órbita terrestre. La dirección en la que hay que apuntar con el telescopio para ver una misma estrella es diferente según el lugar de la órbita (figura 2b). Sabiendo las dimensiones de la órbita, podemos determinar la distancia a la estrella del mismo modo que sabiendo la distancia entre estacas determinamos la distancia al árbol de la otra orilla.

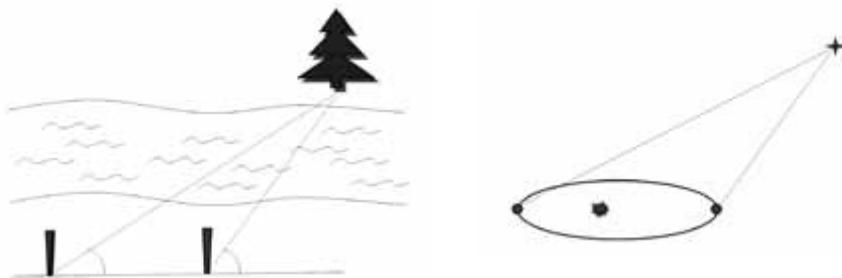


Figura 2. a) se determina el ancho del río a partir de los ángulos y de la distancia entre estacas; b) se determina la distancia a la estrella a partir de los ángulos y de la extensión de la órbita.

Para poder determinar este ángulo se deben tener en cuenta dos aspectos adicionales. Por un lado debemos tener en cuenta que, como las estrellas parecen realizar un recorrido durante la noche, las dos mediciones separadas por seis meses deben realizarse a la misma hora de la noche. Pero para decidir que es la misma hora, debemos establecer el tiempo respecto del movimiento de las estrellas durante la noche. Dicho de otro modo, queremos medir el ángulo con el que se ve la estrella sobre el horizonte pero sabiendo que el horizonte es el mismo que hemos tomado en cuenta al hacer la medición hace 6 meses. De este modo el marco general del cielo nos permite decidir que las mediciones se realizan a la misma hora. Estamos tomando entonces la hora sideral (respecto de las estrellas) y no la hora solar. El segundo aspecto a tomar en cuenta es que toda medición que se realice no debe confundir el ángulo de paralaje con el ángulo de aberración estelar. Veamos en qué consiste este otro fenómeno. Es bien conocido que aunque llueva verticalmente, cuando más rápido vamos, más inclinada nos parece la lluvia (figura 3). Si hacemos un recorrido ida y vuelta, en ambos trayectos la lluvia nos parece inclinada por el solo hecho de que se suman las velocidades de

caída de la lluvia y de nuestro avance para producir una velocidad aparente cuya dirección también es aparente. Si conocemos nuestra velocidad podemos calcular la inclinación que se produce por este efecto. Pues bien, en el caso de observar estrellas que estén en la dirección del movimiento de la Tierra este efecto es nulo y máximo en las demás direcciones⁴. Este efecto debe descontarse para poder determinar el ángulo de paralaje.



Figura 3. a) Velocidad aparente; b) Aberración estelar.

En síntesis, si tenemos un buen mapa del cielo, sabremos cómo se mueve la Tierra respecto del marco general de estrellas y de ese modo tendremos una buena medida de su velocidad y posición para luego determinar la paralaje de una estrella. ¡Las estrellas son el marco de referencia para poder medir la paralaje a las estrellas!

Aunque parezca un círculo vicioso no lo es. Las calles nos sirven de referencia para saber las distancias entre distintas esquinas de una ciudad y para ubicar una calle en particular. Las estrellas en conjunto son el marco de referencia para determinar la velocidad y la posición del Sol y de las estrellas unas respecto de otras.

Si todas las estrellas fueran como el Sol de brillantes entonces un método más sencillo sería medir cuánto más débiles son unas y otras respecto del Sol y con eso armar un mapa de distancias ya que cuanto más lejos está una fuente de luz, más se atenúa su luminosidad⁵. Pero el resultado sería desastroso porque hay distintas estrellas, con distinta masa, con distinta proporción de elementos químicos, con distinta temperatura, etcétera. Así como no podemos decidir entre dos focos de luz cuál está más cerca por su luminosidad porque hay focos de diferente potencia, del mismo modo no podemos decidir sobre la distancia a las estrellas hasta que sepamos de qué tipo de estrella se trata. El método de la paralaje nos ha permitido hacer un buen mapa de las estrellas más cercanas y a la vez nos ha confirmado que no todas las estrellas tienen el mismo brillo intrínseco.

El mapa que se ha podido confeccionar con este método corresponde a un relevamiento del orden de los 50.000 años luz⁶.

4 Su equivalente sería que estamos subiendo o bajando respecto de la lluvia vertical.

5 Esta es la «relación de la inversa del cuadrado de la distancia». Dos fuentes idénticas ubicadas una al triple de distancia que la otra de nuestro detector, la lectura del detector será nueve veces inferior al enfocar la fuente lejana que al enfocar la fuente cercana.

6 Un año luz es la distancia que recorre la luz en el vacío durante un año y equivale a 9.460.000.000.000 km.

Sin embargo, la paralaje no puede ser calculada para objetos muy lejanos ya que el ángulo es muy pequeño para ser detectado. Para esos casos disponemos de otro método.

De todos los tipos de estrellas que hemos estudiado y ubicado con el método de la paralaje hay un tipo especial que tiene una luminosidad variable. Se trata de las estrellas cefeidas⁷. Estas estrellas tienen una característica que las hace muy valiosas para nuestros fines cartográficos. La frecuencia con la que realizan un ciclo de variación de luminosidad está fuertemente correlacionada con su luminosidad intrínseca máxima. Para obtener esta correlación hubo que medir la distancia a estas cefeidas mediante su paralaje. Una vez conocida la distancia y su luminosidad aparente podemos calcular su luminosidad absoluta o intrínseca.

Una vez registrados los valores de luminosidad intrínseca en su punto máximo y el período de variación de varias cefeidas se pudo apreciar que hay una correlación muy buena. Si esta correlación se mantiene para el resto de las galaxias, entonces podemos utilizar las cefeidas de cada galaxia como ‘mojones’ en el universo. El proceso es sencillo, detectamos una estrella cefeida en la galaxia de Andrómeda, por ejemplo, registramos el tiempo que tarda en realizar un ciclo de variación de luminosidad aparente, y con este dato en combinación con la correlación mencionada calculamos su luminosidad intrínseca máxima. Finalmente comparando la luminosidad que nos llega con la luminosidad intrínseca, por medio de la ley del cuadrado de la distancia calculamos a qué distancia se encuentra. En nuestra galaxia podemos aplicar ambos métodos, el de la paralaje y el de la correlación sumada a la ley del cuadrado de la distancia. Entonces, para los casos de las otras galaxias suponemos que la correlación se mantiene y la usamos para determinar las distancias. De este modo podemos ir más lejos con nuestra tarea cartográfica e incluir en el mapa tridimensional al resto de las galaxias, siempre que tengan alguna cefeida entre sus estrellas.

Si un día descubriéramos que las cefeidas de otras galaxias no cumplen con la correlación encontrada en la nuestra, el mapa deberá rehacerse.

Un argumento a favor de extender la correlación a las demás galaxias es que suponemos que los procesos físicos que ocurren al interior de las estrellas son del mismo tipo en todo el universo.

La presunción de que los átomos son del mismo tipo, de que las fuerzas de atracción y repulsión son del mismo tipo y que se dan los mismos tipos de procesos es una presunción fundamental en el intento de pintar un cuadro del universo. Si cada átomo en el universo se comporta diferente según la época y el lugar, entonces la ciencia natural deberá fundarse sobre nuevas bases. La ciencia seguirá siendo posible, pero no se parecerá a lo que hemos estado haciendo en las ciencias naturales hasta ahora.

Volviendo a nuestra preocupación como cartógrafos del universo, encontrar algún otro argumento, más que la sola extrapolación, para sustentar la correlación de las cefeidas sería muy recomendable. Hay una manera en que la ciencia anuda el tejido de sus afirmaciones: la articulación de teorías. Si encontramos una correlación entre la luminosidad y el período para las cefeidas esta correlación debe provenir de algún fenómeno que tiene lugar en el seno de estas estrellas. La física que se encarga de los procesos del núcleo de una estrella tiene un modelo de lo que debe estar pasando al interior de una cefeida y el modelo es suficientemente exitoso. Este modelo no surge como especulación teórica pura sino que se nutre de los resultados experimentales que reproducen los choques entre átomos y partículas

7 La primera estrella variables fue descubierta en la constelación de Cefeo.

subatómicas que creemos están presentes en los núcleos estelares y que son replicados en los aceleradores de partículas.

Ahora no solo tenemos la correlación sino que tenemos una respuesta al por qué de tal correlación. Al encontrar un mecanismo por el cual los procesos nucleares pueden dar como resultado una pulsación en la radiación y en la luminosidad, nos animamos a afirmar que comprendemos por qué las cefeidas se comportan como lo hacen. Y dado que estos procesos deben ser iguales en otras galaxias, confiamos en nuestro método de medir distancias.

El mapa ha llegado a cubrir ahora un espacio del orden de los mil millones de años luz usando la correlación para las cefeidas de otras galaxias. Y creemos que es un buen mapa. Creeremos eso hasta que tengamos nuevas y buenas razones para cambiarlo.

Algo inusual ocurre ahora en nuestra tarea cartográfica. Si no sabemos de qué están hechos los objetos que pueblan el universo no podremos continuar el relevamiento. Necesitamos conocer otras características de las estrellas y del material que puebla el universo para poder cotejar nuestros métodos de estimación de distancias y luego agregar cierta dinámica al mapa. Sí, necesitamos un mapa dinámico. En los siguientes tres apartados nos ocupamos de las herramientas que nos permitirán suponer de qué están hechos los objetos allá afuera y a la vez introducir movimientos en nuestra 'fotografía' del universo para obtener así el mapa dinámico.

I.b. Espectros estelares

El arco iris es una puerta que nos invita a adentrarnos en la investigación de la luz como ninguna otra en la historia de la física. El solo hecho de notar que la luz que proviene del sol está compuesta por varios colores y que es posible descomponerla, abre un panorama que brega por una explicación profunda. Recordemos los aspectos básicos para poder comprender más tarde su papel en ayudar a conformar el mapa actual de nuestro universo.

La luz, según sostenemos en la actualidad, es una onda que se transmite en el espacio y constituida por un campo eléctrico y magnético. Esta tipificación no parece muy atractiva, pero lo que resultará importante es que la longitud de onda de la luz y su frecuencia están asociadas a su color. La luz de color violeta tiene una frecuencia mayor, o una longitud de onda menor, que la del color rojo. Nuestro conocimiento de la luz ha sufrido la misma transformación que nuestro conocimiento del cosmos. Hemos aprendido que hay cosas más grandes que los objetos más grandes que hemos percibido, y que hay partículas más pequeñas que las que podemos observar. Del mismo modo hay radiación electromagnética de mayor frecuencia que la de color violeta pero no es visible (radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma) y hay radiación de menor frecuencia que la de color rojo (radiación infrarroja y ondas de radio), pero tampoco es visible. Nuestros ojos son sensibles a un pequeño rango de frecuencias, pero la luz se produce en todo el rango imaginable de frecuencias. Para todo eso que no ve el ojo hemos diseñado otros detectores. Ahora vemos más luz que la luz visible⁸.

Así las cosas comprendemos qué es la luz, pero vale la pena agregar que nos interesa saber también cómo es que aparece la luz de las estrellas. Cómo es que una pieza de metal a muy alta temperatura comienza a emitir luz. Cómo es que puede haber luz fría como la de los tubos fluorescentes. Todas estas preguntas tuvieron su respuesta entre el siglo XIX y el XX.

8 Hemos optado por llamar «luz» a la radiación electromagnética y «luz visible» a la que se detecta con el ojo. Nada impide que se reserve el término «luz» para la radiación visible y que para el resto se emplee la terminología «radiación electromagnética no visible».

Todo indica que cuando una carga eléctrica se desacelera o frena emite energía en forma de luz. Al calentar un metal agitamos los electrones de los átomos que componen el metal. Los electrones toman energía provista en forma de calor, y luego la emiten en forma de luz. La agitación de estos electrones es la fuente de luz. A medida que se calienta el metal emite luz roja y luego luz más blanca. Pero sabemos que la luz blanca es la suma de muchos colores, de modo que podemos arriesgar que a medida que el metal está a mayor temperatura emite más luz de frecuencias más altas.

Si medimos el color, o la frecuencia de la radiación, en que emite un metal caliente encontraremos un patrón de curvas como el que se muestra en la figura 4.

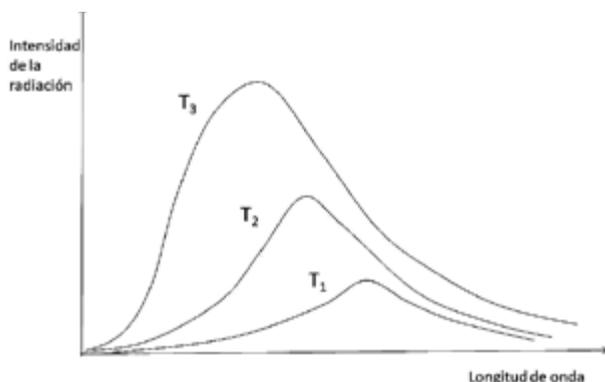


Figura 4. Curvas (esquemáticas) de radiación según la temperatura ($T_1 < T_2 < T_3$).

Un metal a temperatura ambiente emite solamente en frecuencias no visibles. Al elevar su temperatura, comienza a emitir principalmente en frecuencias cercanas al rojo y al estar a mayores temperaturas, como el hierro en una fragua o el filamento de una bombilla de luz, la máxima radiación ocurre en frecuencias más altas incluyendo el resto de los colores y dando como resultado una luz bastante blanca.

Algo así debe estar ocurriendo en el Sol.

Una vez más creemos que lo que ocurre aquí es lo que debe ocurrir a todo electrón en el universo. Entonces si conocemos estas curvas de radiación podemos inferir a qué temperatura está el Sol.

Ahora tenemos una extraordinaria herramienta independiente de la distancia a la que está una estrella.

Pero no todo lo que ocurre en el sol se parece a la luz del filamento de un foco de luz. La luz también puede obtenerse como en los tubos fluorescentes. En este caso el fenómeno es algo diferente. Se hace pasar una corriente eléctrica por un gas, esta corriente eléctrica está formada por electrones libres que viajan a diferentes velocidades, es decir con diferente energía, y al hacer impacto sobre electrones ligados a los átomos del gas, les ceden parte de su energía y así los electrones que están en un nivel de energía en el átomo, pasan a estar en un nivel más alto de energía. Estos electrones excitados se desprenden de su energía absorbida cayendo al nivel inicial en un proceso de cascada pasando de un nivel a otro de energía permitido en el átomo de ese gas y en cada escalón de caída emiten un paquete de energía en forma de luz.

Utilicemos un análogo. Imaginemos que varias piedritas están ubicadas en distintos peldaños de una escalera. Supongamos que al pasar una piedrita a mucha velocidad por la zona de la escalera les comunica a las piedritas una energía que las hace saltar hasta peldaños más

altos que en el que estaban. Ahora imaginemos que las piedritas no son estables salvo en sus niveles originales. Lo que sobreviene es una caída de peldaño en peldaño. Y cada vez que una piedrita cae de peldaño, ya sea entre peldaños sucesivos o de a dos o de a tres, el ruido que hace es característico de la distancia entre peldaños.

En nuestro análogo las piedritas al volver a su peldaño de origen emiten sonido en cada caída. En el átomo del gas, los electrones excitados emiten luz al pasar de un nivel alto de energía a uno más bajo. Las piedritas pueden caer de peldaño en peldaño o caer de a dos, de a tres o de a más peldaños. En el gas también.

Además, para cada elemento químico la configuración del núcleo del átomo es particular y eso condiciona la diferencia de energía entre los peldaños. Es como si para cada elemento químico las distancias entre los escalones de la escalera fueran diferentes. Entonces, si podemos registrar los distintos tipos de ruidos que hacen las piedritas al caer, podremos decir de qué tipo de escalera se trata. Pues bien, si podemos registrar los distintos colores que emite un gas cuando sus electrones decaen de un nivel a otro, podremos saber de qué elemento químico se trata. El espectro de emisión es la huella digital de cada elemento químico. No hay dos elementos químicos que emitan el mismo patrón de radiación. Dime tu espectro y te diré de qué estás hecho.

El espectro de una estrella estará formado entonces por dos tipos de emisión: la radiación que sigue la curva de emisión de cualquier cuerpo caliente,⁹ y el espectro de emisión que resulte de la suma de todos los gases que están presentes en la estrella. Estos dos espectros sumados son la carta de presentación de la estrella (figura 5).

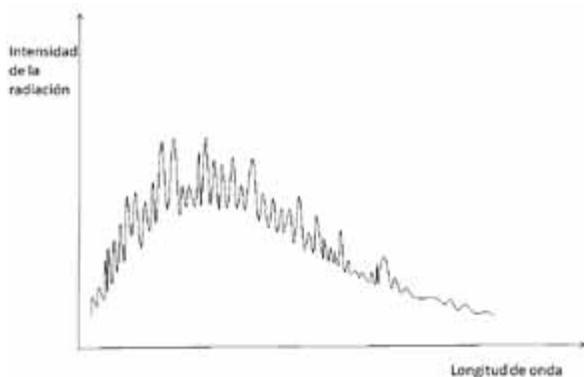


Figura 5. Espectro de emisión (esquemático) de una estrella. Emisiones del gas de su atmósfera sumadas a la curva suave asociada a su temperatura.

Podemos prever el próximo paso: todas las estrellas muestran espectros de los elementos químicos que conocemos aquí en la Tierra. Una vez más, lo que ocurre aquí, ocurre allí afuera.

Midiendo aquí, sabremos lo que ocurre y lo que ocurrió allá.

Si el universo está hecho de estrellas, es fácil saber cuánta materia lo puebla, basta con mirar hacia el cielo y analizar los colores.

⁹ Esta curva se llama «curva de emisión de cuerpo negro» haciendo referencia a la radiación que nos llega de un cuerpo que no refleja radiación. Es decir que registramos lo que emite y no lo que emite sumado a lo que refleja.

I.c. Absorción interestelar

Nos quedó un cabo suelto: en el análogo de la piedra que pasa y excita a las piedritas de la escalera, ¿puede la piedra que pasa cederles cualquier valor de energía a las piedritas de la escalera? La respuesta que hemos tenido que aceptar por la abrumadora cantidad de datos es que no. Y esta respuesta negativa y contraria a la intuición dio lugar al nacimiento de la primera cuantificación o cuantificación de la energía. Los electrones del gas no absorben cualquier cantidad de energía sino una que los lleve exactamente de un peldaño a otro, con la salvedad de que sería posible que una piedrita tome tanta energía que salga de la formación de la escalera y escape de todos esos peldaños. En términos del electrón de un gas, el electrón pasa de un nivel a otro, o bien el átomo se ioniza, pierde un electrón.

Los electrones que han quedado liberados pueden absorber cualquier valor de energía y emitir cualquier tipo de luz, pero los que permanecen ligados al núcleo, formando el átomo, solo pueden absorber el mismo valor de energía que luego emitirán en total sumando las radiaciones de sus distintas caídas en cascada.

La configuración electrónica de un gas hace que absorba determinados valores de energía, aquellos que coinciden exactamente con lo que es necesario para que sus electrones suban de nivel. Y no otra energía.

Si bombardeamos un gas con energía luminosa de cualquier valor de energía veremos que solamente absorbe aquellos fotones que coinciden con sus saltos de energía. El átomo funciona como un filtro de la energía que le llega. Absorbe aquellos valores que coinciden con su estructura. Y como la energía es proporcional a la frecuencia, y ésta se asocia con el color, el gas absorberá ciertos colores y dejará pasar otros. Una vez más el gas puede dejar su huella digital al absorber energía. Dime lo que absorbes y también te diré de qué estás hecho.

I.d. Nubes de polvo en el mapa

En los espectros de estrellas lejanas la curva de radiación presenta unas hendiduras (figura 6). El panorama ahora es comprensible. La luz de la estrella ha atravesado algún gas que absorbe en la frecuencia justa en donde se halla la hendidura en la curva, y por ese motivo falta la luz que tiene ese color. La altura de la curva de emisión indica la cantidad de luz que nos llega en cada frecuencia, de modo que una hendidura es luz faltante. O bien la estrella por algún motivo tiene un déficit en emitir en esa frecuencia, o bien algo la absorbió en el camino.

La interpretación más simple es que hay gas interestelar que absorbe en esas frecuencias. Ya que conocemos los espectros de emisión y absorción de todos los gases, podemos decidir qué gas se interpone entre la estrella y nosotros.

Sobre el mapa construido con todos los objetos capaces de emitir luz, ahora comenzamos a volcar la información de todo el material que no emite, pero es capaz de absorber. Como cuando detectamos un intruso por su sombra, detectamos el material interestelar que queda denunciado por las estrellas lejanas.

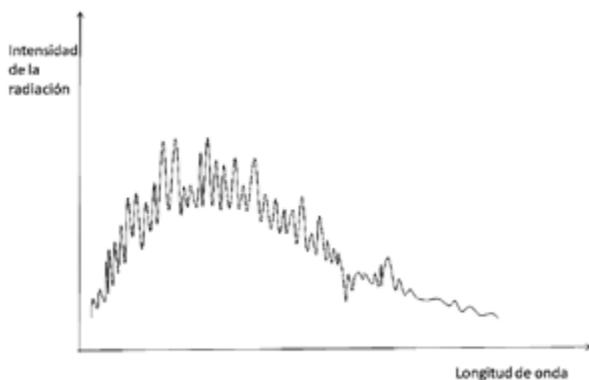


Figura 6. Líneas de absorción del polvo interestelar (esquemático).

El universo no solo está poblado de materia que emite, también lo está de materia que absorbe. Paradójicamente una y otra no pueden evitar dejar sus marcas en los espectros luminosos. La luz es nuestra mejor herramienta de topografía.

En ausencia de nuestro conocimiento de la curva de emisión, esas hendiduras en la curva no serían indicio de nada interesante. Es el conocimiento acerca de la emisión de los cuerpos calientes lo que nos permite asegurar que algo entre medio se ha quedado con la luz faltante. Nuevamente el conocimiento de cierto fenómeno funciona como un medidor para detectar otro tipo de objetos. Esta característica es muy familiar en la ciencia y no hace más que concatenar un conocimiento con otro. Si no conocemos la manera en que emiten los cuerpos, si no conocemos la frecuencia de cada emisión, si no descubrimos que los materiales son capaces de absorber en cantidades específicas, no podremos inferir la naturaleza de lo que hay en las sombras.

l.e. Efecto Doppler

El paso de un automóvil de Fórmula 1 frente al micrófono, el paso de una ambulancia con su sirena prendida cerca nuestro y el cruce de nuestro auto con otro en sentido contrario en la ruta son ejemplos del efecto Doppler¹⁰ en el sonido. Este efecto consiste en que cuando la fuente de sonido se acerca al detector el sonido registrado es más agudo que el que emite la fuente, mientras que cuando la fuente se aleja del detector, el sonido registrado es más grave. Tomemos como análogo de la fuente una máquina que expulsa una pelotita de tenis una vez por segundo. Si esta máquina se ubica a cierta distancia del alumno de tenis, por ejemplo, éste recibirá una pelotita por segundo. Pero si en determinado momento la máquina comienza a acercarse al alumno con cierta velocidad, aunque la máquina siga expulsando una pelotita por segundo, al alumno le llegarán con mayor frecuencia. El motivo es que aunque la segunda pelotita es expulsada por la máquina luego de transcurrido un segundo de expulsar la primera, esta segunda pelotita fue expulsada más cerca del alumno, por lo tanto la segunda pelotita le llegará al alumno antes que si hubiera sido expulsada con la máquina en reposo. El efecto contrario ocurre si la máquina se aleja del alumno. Las pelotitas le llegarán más espaciadas, y por lo tanto con menor frecuencia.

En el caso del sonido lo que cumple el papel de las pelotitas de tenis es el pico de la onda de presión.

¹⁰ Este efecto fue descubierto y explicado por el físico austriaco Christian Johann Doppler en 1842.

Si tomamos en cuenta que la luz también se presenta con características ondulatorias podemos inferir que habrá efecto Doppler lumínico. Esta vez si la fuente de luz se acerca, su frecuencia será más grande que si la fuente estuviera en reposo respecto del observador. Si en cambio la fuente se aleja, la frecuencia será menor. En términos cromáticos, si la fuente se acerca habrá un corrimiento hacia el azul de las frecuencias emitidas y si se aleja, habrá un corrimiento al rojo.

En el caso de la sirena de una ambulancia aun cuando al alejarse se escuche más grave que cuando se acerca, el sonido no deja de ser el sonido de una sirena, típicamente agudo. Del mismo modo si una estrella se aleja, la modificación de la frecuencia de emisión es bastante sutil de modo que su color no cambia, sino que las frecuencias que son típicas del hidrógeno en el laboratorio han quedado corridas una pequeña fracción en dirección hacia frecuencias menores.

Cuanto mayor es la rapidez tanto mayor es el desplazamiento en frecuencias.

Finalmente tenemos información de la dinámica de nuestro universo. Si una estrella está en reposo respecto de nuestro sol, sus líneas de emisión estarán ubicadas como en el espectro del Sol. Si se acerca al sistema solar, sus líneas de emisión estarán desplazadas levemente hacia las frecuencias mayores, y si se aleja, hacia las frecuencias menores, es decir hacia el rojo.

El efecto Doppler se constituye en nuestro nuevo instrumento de medida.

Primero fue el ángulo de paralaje para el mapa de nuestra galaxia, luego la correlación luminosidad-período de las estrellas cefeidas para el resto de las galaxias, más tarde la emisión y absorción para las nubes de polvo y ahora el efecto Doppler para determinar la danza de las estrellas y las galaxias. El mapa crece en extensión, crece en elementos representados y ahora, adquiere movimiento.

II. Corrimiento al rojo de las galaxias

El mapa de nuestra galaxia y su vecindario estaba completo. La Vía Láctea, en forma de espiral, con el Sol y sus planetas en una de las ramas más alejadas del centro, giraba sobre sí misma, tenía un par de galaxias parásitas orbitándola, la Nube Grande y la Nube Pequeña de Magallanes, y todo este conglomerado se encontraba en un vecindario de galaxias que identificamos como el Grupo Local. Todo este vecindario forma un racimo de galaxias. Mucho más lejos todavía hay otros racimos de galaxias. Y en una escala más alejada notamos que estos racimos se distribuyen en super racimos a lo largo de finas hebras formando un tejido de materia estelar a lo largo de todo un universo luminoso pero heterogéneo. El espacio entre las distintas hebras de racimos de galaxias parece vacío de material. Si hay algo, es de una concentración tan leve que casi no absorbe la luz que tiene de fondo.

En un mapa realizado sobre la base de que los cuerpos emiten y absorben, la transparencia es la huella que deja el espacio vacío. El mapa entonces muestra un tejido de materia y las hebras de ese tejido delimitan enormes espacios vacíos. No tardaríamos en preguntarnos por qué la heterogeneidad y no la homogeneidad. ¿Hay alguna razón para que la materia se aglomere preferentemente a lo largo de ciertos surcos generando así un entretejido de hebras altamente densas comparadas con grandes extensiones de espacio vacío? Habría que esperar hasta finales del siglo XX para tener indicios de que esta inhomogeneidad proviene de alguna inhomogeneidad originaria. Quizás haya que esperar varias décadas más para tener indicios de por qué hubo alguna inhomogeneidad originaria.

II.a. Ley de Hubble

Edwin Hubble identificó estrellas cefeidas que no pertenecían a la Vía Láctea. Por aquella época (mediados de 1920) el mapa parecía indicar que el universo constaba de nuestra propia galaxia y nada más. A través de la correlación para las cefeidas, las estrellas identificadas por Hubble abrieron el panorama de todo ese espacio más allá de nuestra galaxia. Y la tarea entonces fue rehacer el mapa.

Hubble midió el corrimiento de emisión de una veintena de galaxias y encontró que todas ellas mostraban corrimiento hacia el rojo, lo cual indica, si se interpreta este dato a la luz del efecto Doppler, que todas ellas se alejan de nosotros. Más aun, cuanto más lejos está una galaxia más rápidamente se aleja de acuerdo a la relación siguiente entre la velocidad (v) de alejamiento y distancia (d) a la galaxia:

$$v = H_0 \cdot d \quad [1]$$

O bien, podemos indicar que la distancia entre galaxias vecinas se va modificando por el movimiento, de modo que:

$$d(t) = d_0 \cdot a(t) \quad [2]$$

en donde $a(t)$ indica la proporción en la que se incrementan las distancias a medida que transcurre el tiempo.

H_0 es la constante de proporcionalidad (*constante de Hubble*) y actualmente se estima entre 71 y 80 km/s, notoriamente diferente de las estimaciones iniciales de Hubble debido a las imprecisiones en la determinación de las distancias. Esta discrepancia no es una mera afinación del cálculo. Una vez más la ciencia teje su tapiz para representar la naturaleza y un error en un dato se propaga a todo aquello que se apoya en ese dato. Esta situación hace endeble al conocimiento científico pero a la vez, el hecho de que las nuevas tecnologías sigan mostrando que hay una correlación entre la velocidad de alejamiento y la distancia de las galaxias a pesar de que las mediciones de distancia y de velocidad se han perfeccionado, nos hace persistir en nuestra sensación de haber acertado en que esta relación está allí afuera y que no es solo el fruto de la casualidad de los datos que hemos recopilado.

Una novedad revolucionaria aparece entonces en el horizonte de la investigación. La dinámica de nuestro mapa denuncia un estado de cosas totalmente asombroso. Mientras que era esperable que cada galaxia tuviera mayor o menor rapidez y que sus velocidades se repartieran entre las que se alejan y las que se acercan como ocurre entre las moléculas de un gas, todas las galaxias formaban, en conjunto, cierto patrón. El panorama era desconcertante: presenciamos la huida colectiva y coordinada de todas las galaxias que hemos podido medir.

Hubble nos hizo ver que era necesario construir telescopios más potentes. Después de todo, había todo un universo para explorar más allá de nuestra galaxia. Cuando se le preguntó qué esperaba observar con esos nuevos telescopios respondió que tenía la esperanza de encontrar algo inesperado.

III. Teoría del Big Bang

III.a. Del corrimiento al rojo de las galaxias al universo en expansión

Los pasos siguientes parecen más o menos sencillos. Sin embargo daremos esos pasos con cautela.

El panorama de la fuga en masa de las galaxias y la correlación que se encuentra entre su distancia y su velocidad nos recuerda el panorama que podría fotografiarse desde el centro de un estadio en el que ha finalizado un encuentro deportivo. Los espectadores que vuelven a sus casas caminando más rápidamente, al cabo de unos minutos serán los que estén más alejados del estadio. Los espectadores que caminan más lento no se habrán alejado tanto del estadio como lo han hecho los primeros. Se puede comprender fácilmente que cuanto más alejado está un espectador del estadio, tanto más rápido tiene que haber caminado desde la finalización del encuentro. Lo mismo ocurriría con la dispersión de las esquiras de una granada. Así se comprende que no todas las esquiras viajan juntas sino ordenadas en velocidad, lo cual puede apreciarse como una distribución que va desde esquiras lejanas muy rápidas hasta esquiras más lentas ubicadas en zonas más cercanas al centro de la explosión.

Estos dos análogos nos impulsan a pensar que nuestra galaxia está ubicada en el centro de una explosión de la que se desprendieron las demás galaxias. Esta idea habría sido muy tentadora. Sin embargo aquí la precisión de las mediciones y la presencia para esa época de la Teoría de la Relatividad¹¹ nos protegió de semejante galactocentrismo.

Las velocidades de alejamiento de las galaxias no solamente cumplen con la «ley de Hubble» sino que desde cualquier galaxia que se hicieran las mediciones se obtendría el mismo panorama de alejamientos. Es decir que no se trata de que todas las galaxias se alejen de la nuestra sino que todas las galaxias se alejan de todas las demás. Este panorama entonces nos estimula a buscar mejores analogías.

Tomemos ahora el caso de un globo moderadamente inflado. Pintemos marcas en el globo de manera que parezca un globo a lunares. Tomando como punto de referencia cualquiera de estas marcas, los lunares vecinos se encuentran a cierta distancia sobre la superficie del globo. Ahora inflamos un poco más el globo. El resultado será que los lunares vecinos se han alejado. ¡Pero este alejamiento de los lunares vecinos le ocurre a todos y cada uno de los lunares del globo!

Este resultado se obtiene porque el globo se ha expandido, se ha estirado en cada punto de su superficie.

Esta analogía parece un poco mejor ya que rescata tanto el alejamiento de los vecinos como la ausencia de una marca privilegiada que pudiera asociarse con el centro de la expansión. El espacio se está expandiendo y las galaxias ubicadas en cada lugar son las marcas que nos permiten medir la velocidad de esta expansión¹².

Cada vecino ve un panorama equivalente. Desde cada punto del universo se ve este mismo espectáculo dinámico y se puede llegar a los mismos cálculos. Nada especial ocurre aquí, solo que nos hemos dado cuenta de ello.

¿Siempre ha estado en expansión el universo? ¿Si ahora se expande, cómo fue en el pasado? Si viéramos este panorama en reversa, como pasando una película hacia atrás, ¿qué veríamos en la pantalla?

La respuesta a esta última pregunta no se hizo esperar. Al invertir el sentido del tiempo, todo aquello que se aleja resulta acercarse de modo que la película nos mostraría cómo las galaxias se irían aglutinando al estrecharse las distancias entre ellas. A medida que se desarrolla

11 Véase en este mismo volumen el artículo de Leonardo Moledo, Nicolás Olszevicki y Esteban Magnani, «Einstein y la reinención de la Física» (*comps.*).

12 Las distancias a las galaxias pueden tener un error importante pero parece ser que el universo se expande entre un 5 y un 10 % cada mil millones de años (Hawking, 1996).

la película veríamos acercarse primero las galaxias más cercanas y más tarde las más lejanas, hasta aglutinarse toda la materia y la energía en un punto único del espacio que habría dado lugar a una gran explosión. Y de allí el nombre de *big bang*. La misma trama del espacio se comprimiría hasta que todo el espacio disponible se redujera a un punto. Ese punto sería el comienzo de todo lo existente en el universo. Sería el comienzo del universo mismo.

III.b. Espacio, tiempo y espacio-tiempo

Un detalle importante viene a complicar la intuición en este momento. ¿Qué relación hay entre el espacio y el tiempo? Al pasar esa película hacia atrás estaríamos viendo lo que ocurrió en el pasado. Pero a su vez, estaríamos viendo cómo se compacta el mismo espacio en ese punto. ¿Podríamos pensar entonces que ese punto explota en determinado momento de un tiempo que venía transcurriendo? En ese caso seguramente queremos preguntar qué había antes de la explosión, cuál fue la causa de la explosión y toda una serie de preguntas relativas a momentos previos.

El detalle importante es que espacio y tiempo ya no están desacoplados. Más bien el problema debe enfocarse como el surgimiento del *espacio-tiempo* y no como el surgimiento del espacio *en* el tiempo.

Una pista para comprender este acoplamiento es la siguiente. Todo aquello que vemos en el cielo no es más que una imagen que se generó tiempo atrás en los objetos que hoy observamos. Por ejemplo, al ver un atardecer estamos viendo el Sol tal como era hace unos 8 minutos. Esto es una consecuencia directa de que la luz no tiene velocidad infinita. Cada imagen se toma su tiempo en ir desde el origen hasta nuestro ojo. Al tratarse de objetos lejanos en la galaxia, la imagen es bastante vieja. Por ejemplo, la estrella más cercana está a unos 4 años luz. Eso indica que la luz tarda 4 años en llegar a la Tierra. Por lo tanto, la imagen que tomamos de ella en una fotografía tiene 4 años de atraso. La imagen que registramos de la galaxia de Andrómeda tiene un atraso de 2 millones y medio de años. Vemos la imagen de cómo era Andrómeda hace 2,5 millones de años.

Pero ¿existe la posibilidad de saber cómo es Andrómeda ahora? La respuesta afirmativa es desalentadora: sí, lo sabremos dentro de 2,5 millones de años. La única respuesta sincera y correcta que podemos dar hasta ahora es que no hay manera de saber hoy cómo es Andrómeda hoy. Dicho de otro modo, no podemos esperar que la ciencia nos provea esta información. Y esto nos hace reflexionar. ¿Qué significa para un científico que las cosas sucedan de tal modo que es imposible realizar ciertas mediciones? Aquí la comunidad puede dividirse. Algunos podrán decir que tiene sentido hablar de objetos inmedibles o de procesos indetectables, pero ése no sería el espíritu por el cual la ciencia se ha diferenciado de la religión o el mito. La ciencia ha aceptado que aquello inmedible e indetectable no puede formar parte de sus teorías.

Algunos científicos han sostenido que lo que no es medible no existe. Pero parece exagerado que al no poder medir algo se obtenga inmediata información sobre su inexistencia. Otros pensamos que si algo no es detectable, sencillamente la ciencia no debe ocuparse de ello, aunque esta situación, justamente por no poder tener ningún registro del asunto, no nos provee información sobre la existencia o inexistencia de tales objetos y procesos tan huidizos. Lo que seguramente no haremos ni unos ni otros es discutir sobre tales objetos indetectables, ya que cualquiera podría sostener cualquier afirmación sin correr riesgos de verse en problemas con los datos. Y si hay algo que ha sido de interés en la ciencia, con mayor o menor importancia según la discusión de que se trate y los actores involucrados, han sido los datos.

Pues bien, entonces tenemos el siguiente problema: el objeto «Andrómeda hoy» es inmedible, indetectable, incognoscible. A cambio tenemos como objeto de estudio a «Andrómeda hace 2,5 millones de años». No hay objetos existentes en el espacio sino en el espacio-tiempo. Los objetos están situados en un lugar y en un instante.

Por lo tanto, cuanto más lejos enfocamos nuestros telescopios o radiotelescopios tanto más antigua es la imagen y por lo tanto esas imágenes proveen información de cómo eran las cosas hace miles de millones de años. Cuanto más lejos enfocamos tanto más joven es el universo que vemos.

Otra pista importante para reconocer la conexión entre el espacio y el tiempo la provee la Teoría de la Relatividad.

A finales del siglo XIX se quiso medir la velocidad de la Tierra respecto del presunto material en el que se transmitía la luz pero todos los intentos fracasaron. Los resultados indicaban que la velocidad de la luz no se sumaba a la de la Tierra sino que la luz siempre viajaba con la misma velocidad sin importar el marco de referencia desde donde se midiera esa velocidad. Su valor parece ser una constante universal. Como consecuencia de ello la gran novedad es que la simultaneidad depende del sistema de referencia y lo mismo ocurre con las longitudes.

Cada lector puede ahora prever que también las duraciones se ven modificadas. Efectivamente se realizaron mediciones que confirman la diferencia predicha por la teoría. Los fenómenos tienen duraciones diferentes según la velocidad del sistema de referencia¹³.

Para coronar esta situación la Teoría de la Relatividad General predice en total acuerdo con las observaciones, que la luz viaja por los caminos más cortos, tal como ya lo afirmaban las teorías anteriores, pero que esos caminos están modificados por la cantidad de masa presente en las inmediaciones¹⁴. La luz que nos llega de las estrellas ha recorrido una trayectoria como lo haría una pelota de golf que rueda por una hondonada. Los rayos de luz al pasar cerca de una gran concentración de masa se desvían como si la distribución de masa funcionara como una lente. Espacio, tiempo, distribución de masa y trayectoria de la luz están enlazados. Por este motivo si tuviéramos un mapa que además diera cuenta de la distribución de masa en el espacio podríamos anticipar si el espacio es cerrado, abierto o plano.

Dicho esto podemos retomar el problema de la expansión y de cómo se vería una película rodando hacia atrás en el tiempo. El resultado sería que todas estas galaxias ubicadas en puntos del espacio-tiempo se aglutinarían en un punto. Ese punto corresponde al punto en el que habría surgido la materia, el espacio y el tiempo y desde ese punto el universo comenzó a expandirse. Ese punto constituye el origen de nuestro universo. El *big bang* es el origen del espacio-tiempo y de toda la energía contenida en él. No tiene sentido preguntarnos por instantes previos al *big bang* como no tiene sentido preguntarnos qué hay al sur del polo sur. En el *big bang* solo hay un entorno hacia el futuro porque allí surge el tiempo. En el polo sur solamente hay un entorno en dirección al norte, porque allí toda trayectoria se aleja del sur.

13 Como ejemplo citemos que el tiempo de vida media del muón medido para muones de baja velocidad (obtenidos en laboratorio) es menor que el tiempo de vida media de los muones que viajan a altas velocidades y la diferencia coincide con la predicha por la teoría para los niveles de precisión actuales.

14 Gracias a este efecto podemos detectar agujeros negros que no emiten radiación pero que nucleen tal cantidad de masa en una región del espacio que son capaces de actuar como lentes convergentes gravitatorias. Cuando observamos las imágenes de dos cuasars gemelos con procesos simultáneos apartados por un pequeño ángulo creemos que en realidad se trata de dos imágenes de un mismo quásar cuyas señales luminosas han sido deflectadas por algún agujero negro que se halla entre el quásar y la Tierra. Véase Turner (1988).

A partir de esa gran explosión la energía inicial (que es toda la que hay en el universo hoy) comenzó a ocupar más y más espacio de modo que a medida que transcurría el tiempo la energía en cada porción del espacio descendía.

Los científicos creen que la forma en que se manifestaba tal energía en las primeras etapas no debía ser tal como se presenta ahora en forma de partículas y radiación sino que solo podría haber habido radiación. A medida que el espacio se expandía, la energía se ‘desparramaba’ de modo que su densidad disminuía. Habrá llegado un momento en que la energía por unidad de volumen era suficientemente baja como para que las partículas y anti-partículas que se formaran a partir de esa energía no se volvieran a transformar en radiación. En ese momento las partículas comenzaron a ser estables. Dicho de otro modo, los choques entre fotones crearon partículas hasta que estas partículas chocaban con menos energía que la necesaria para desintegrarse en fotones. De este modo una vez creadas las partículas, parte sustancial de ellas permaneció sin transformarse en radiación. Sin embargo aquella época prolífica de creación de partículas no duró para siempre. El espacio siguió expandiéndose y con ello la energía por unidad de volumen siguió bajando, la temperatura siguió bajando. Esto significó que los choques entre fotones ya no fueron tan energéticos y entonces ya no se crearon tantas partículas como antes. El Universo había obtenido un equilibrio entre la radiación existente y las partículas que de ella habían surgido.

Es aquí donde se hace evidente que nuestro conocimiento de las características de las partículas, la manera en que aparecen cuando hay gran concentración de energía,¹⁵ la manera en que decaen unas en otras cuando chocan entre ellas o que decaen espontáneamente al cabo de distintas duraciones y los modos de interacción que se establecen entre ellas, son todas cuestiones cruciales para comprender los procesos cosmológicos. Y ya que no hemos podido estar allí para ver todo aquello, qué mejor que reproducirlo del modo más similar posible. Por este motivo los científicos se lanzan a la construcción de enormes aceleradores de partículas. En ellos, las partículas son aceleradas a velocidades cercanas a la de la luz y son dirigidas hacia un blanco, otra partícula, para producir choques tan energéticos como los que suponemos deben haber tenido lugar en esas primeras etapas de nacimiento de las partículas. Así, creemos estar reproduciendo etapas tempranas del *big bang* cuando llevamos a cabo experimentos en los aceleradores de partículas.

Con la aparición de las partículas con masa en reposo y su persistencia en el tiempo se hizo preponderante la fuerza de atracción gravitatoria. Esto provocó que las partículas se fueran agrupando en grandes nubes y a su vez, que esas nubes siguieran compactándose por la fuerza atractiva hasta formar galaxias y estrellas. También esa fuerza de atracción hace que las distintas partes masivas del Universo se atraigan de modo que se reduzca en parte el efecto expansivo del espacio. La pregunta que la ciencia se hace todavía es si la atracción gravitatoria podrá reunir nuevamente toda la masa colapsando hacia un punto en un *big crunch*, o si la expansión no tendrá freno y los cuerpos se alejarán unos de otros indefinidamente hasta nunca más interactuar¹⁶.

15 Las partículas con masa en reposo tienen una energía equivalente dada por la relación tan conocida que debemos a Einstein: $E = m \cdot c^2$. Al concentrarse toda esa energía en un punto podrá crearse una partícula con exactamente esa masa en reposo (estrictamente se pueden crear pares de partículas). Las partículas pueden desaparecer como tales y dar lugar a esas cantidades de energía.

16 Para el caso de producirse un *big crunch* se ha especulado sobre si esa concentración daría pie a un nuevo *big bang* y así sucesivamente en un universo de existencia cíclica. Pero esta idea pasa por alto que el instante inicial cuenta como una singularidad en la que los nexos causales se desvanecen y un siguiente *big bang* no tendría conexión con el anterior.

¿Pero tenemos alguna prueba de que haya habido una explosión así, más allá de que encaja perfectamente con la expansión que se concluye a partir del corrimiento al rojo? Dicho con más detalle. Hemos visto que todas las galaxias registradas muestran corrimiento al rojo. Creemos que este corrimiento al rojo indica que las galaxias se alejan de la nuestra. Hemos calculado que este efecto se registraría del mismo modo desde cualquier otra galaxia. Esto nos llevó a conjeturar que el universo está en expansión. Y si está en expansión debe haber explotado alguna vez. Hasta aquí parece no haber escapatoria a que las cosas ocurrieron como lo sugiere la teoría del *big bang*. Entonces, ¿por qué pedir otras evidencias? ¿Por qué pedir predicciones exitosas si ya hemos obtenido explicaciones exitosas? ¿Por qué esperar que la explicación propuesta para el corrimiento al rojo también sea fructífera en explicar otros fenómenos? Si las cosas no podrían haber sido diferentes dados los datos de que disponemos, ¿para qué necesitamos otra confirmación?

La respuesta es que no es cierto que los datos indiquen ineludiblemente que hubo una explosión y por eso precisamente sería de mucho valor contar con evidencias adicionales sobre la presunta explosión. Además, el valor predictivo de una teoría es una de sus cartas credenciales. No son bien vistas las explicaciones que solo indican cómo ocurrieron las cosas ya registradas pero que no pueden decir algo más sobre lo que todavía no hemos registrado. No es una condición imprescindible que una teoría tenga predicciones, pero es deseable que las tenga y, obviamente, que éstas se cumplan.

Más adelante abordaremos brevemente el problema de que los datos son compatibles con otras interpretaciones. Ahora abordaremos el problema de cómo se consiguió esa evidencia adicional.

III.c. Radiación cósmica de fondo

En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson, dos radioastrónomos norteamericanos, estaban intentando medir la radiación de microondas de nuestra propia galaxia en direcciones alejadas del centro galáctico.

La técnica para esta investigación era apuntar la antena del radiotelescopio directamente al cielo en esas direcciones y tratar de registrar una señal muy débil ya que la mayor intensidad proviene del centro galáctico y no del resto. La tarea de ajuste y calibración de la relación señal ruido es crucial al tratarse de señales cuya intensidad está en el orden de la intensidad del ruido. Esta calibración involucra calcular la cantidad de radiación que ingresa debido a la atmósfera para poder descontarla. Esta radiación depende del espesor de atmósfera que se encuentra en la dirección a la que apuntamos la antena de manera que el ruido es menor en dirección directamente vertical que en las demás direcciones.

Pues bien, Penzias y Wilson sintonizaron el detector para hacer el relevamiento en cierta frecuencia y el detector marcó cierta intensidad. Obviamente necesitaban distinguir qué cantidad era identificada como señal y qué otra cantidad como ruido. Todo detector marca algo aunque no haya nada para ser detectado y lo asociamos con el ruido. Un receptor de televisión muestra algo en la pantalla aun cuando no se trata de la señal de una emisora. Este ruido no se confunde con la señal de la emisora. Cuando la señal de la emisora es muy mala, vemos en la pantalla un poco de la imagen que nos envía la emisora y un poco de ruido (en forma de lluvia en los pixeles de la pantalla). Si la relación señal ruido es mala, podremos igual detectar de qué programa se trata, pero cuando el nivel de la señal y la del ruido es del mismo nivel, será difícil distinguir qué estamos viendo. De forma similar Penzias y Wilson debían distinguir cuánto de lo que el detector mostraba era ruido y cuánto era señal. Para

ello orientaron el detector en diferentes direcciones esperando poder encontrar la variación asociada al espesor de la atmósfera, pero en todas direcciones la señal era la misma.

Penzias y Wilson revisaron la antena y encontraron que dos pichones pasaban la noche allí y que estaba sucia. Se ocuparon de desalojarlos y limpiar la antena¹.

Sin embargo, luego de limpiar la antena el detector seguía indicando la misma señal. Lo que habían estado registrando no era la radiación de la galaxia sino una radiación que viene de cualquier parte del espacio. Esta radiación cósmica de fondo fue inmediatamente interpretada como la radiación remanente de aquella explosión originaria.

Se habían topado por casualidad con la evidencia extra que necesitaba la teoría para reforzar sus cartas credenciales. El *big bang* que había producido el universo en expansión había dejado una radiación remanente uniforme. Sus características eran las mismas sin importar hacia dónde apuntáramos el radiotelescopio.

Ahora una nueva evidencia fortalecía la hipótesis del *big bang*. El Universo se había estado expandiendo y con ello la temperatura había ido bajando. Irradia ahora en una frecuencia típica de los cuerpos que se encuentran a aproximadamente 270 grados centígrados bajo cero².

La teoría había tenido su refuerzo.

Sin embargo, como ya hemos señalado anteriormente, los éxitos y fracasos de una teoría solo pueden evaluarse a la luz de la precisión de los datos. Lo que con cierta precisión puede ser un éxito, con mayor precisión puede ser un fracaso, y viceversa. Para el caso del *big bang*, que existiera una radiación uniforme que viniera del espacio era evidencia adicional de que había ocurrido una explosión, pero que fuera tan homogénea chocaba con otra característica del universo: las galaxias no se distribuyen de manera homogénea. Entonces, ¿esta radiación de fondo reforzaba la Teoría del *Big Bang* o la ponía en aprietos?

III.d. A la caza de las inhomogeneidades

Cuando se propuso la idea de que toda la energía estaba concentrada en un punto en el momento de la explosión y que el espacio comenzó a expandirse de forma homogénea, apareció uno de los obstáculos para la Teoría del *Big Bang*. ¿Cómo podría el espacio expandirse de forma homogénea y a su vez dar como resultado que en algunas zonas hubiera galaxias y en otras no? Debía haber alguna inhomogeneidad desde el comienzo. Con la intención de investigar en forma más detallada esta radiación, se creó un satélite especialmente diseñado para analizar tales frecuencias. En marzo de 1992, el COBE (*Cosmic Background Explorer*: explorador del fondo cósmico) con sus registros permitió confirmar la idea de que hubo pequeñas inhomogeneidades desde tiempos remotos. Este descubrimiento resolvió una de las dificultades que había enfrentado la teoría, y al hacerlo dio un nuevo impulso a la misma.

Sin embargo este episodio deja al desnudo una característica muy poco visible de la ciencia divulgada y enseñada como producto terminado y es la incapacidad de la comunidad científica para decidir de manera inequívoca sobre el apoyo o el abandono de una teoría en ausencia de éxitos asombrosos o fracasos rotundos. Y esta característica es la que le da su dimensión de aventura humana.

1 Los pájaros volvían a refugiarse allí y entonces fue necesaria «una solución un poco más drástica» al problema (véase Weinberg, 1997).

2 Con un poco más de precisión, la temperatura que corresponde a esta radiación es de $2,736 \pm 0,017$ °K, es decir poco menos que tres grados sobre el cero absoluto (Peebles, 1993: 131).

La historia de la ciencia muestra que es moneda corriente que los datos respalden las teorías hasta que cierta información muestra un desajuste importante. A partir de allí la comunidad tiene sobre sus hombros la nada fácil tarea de decidir si seguir trabajando para encontrar qué otro factor fue responsable del desajuste y de ese modo asumir una posición de defensa de la teoría, o bien, elegir abandonar esta teoría por entender que el desajuste es el indicio de su inadecuación empírica. En ambos casos podríamos equivocarnos. Podríamos estar tratando con una teoría falsa y sin embargo seguir buscando qué ha ocurrido como para explicar por qué la teoría, a pesar de ser adecuada, ha tenido una falla predictiva. En el otro extremo, podríamos abandonar prematuramente una buena teoría porque no hemos prestado suficiente atención a qué otras cuestiones podrían estar en juego al momento de realizar los cálculos de la predicción científica. Estos dos posibles errores amenazan sistemáticamente a los investigadores y no parece haber solución.

Si la Teoría del *Big Bang* es correcta debería observarse radiación remanente de aquella explosión. Encontramos esa radiación pero su distribución uniforme se contrapone con la distribución inhomogénea de masa en el Universo. Entonces se propone que la radiación de fondo debe tener inhomogeneidades, que parece uniforme debido que la sensibilidad y precisión de los métodos utilizados no permite detectar diferencias más pequeñas. Por lo tanto se sugiere que realicemos una investigación detallada del fondo de radiación cósmica pero con una mejor tecnología. Se inicia el proyecto de poder obtener esta información sin la perturbación del ruido de la atmósfera, es decir, es necesario llevar los detectores al espacio exterior. Se construye el COBE y finalmente se obtienen los datos que coinciden con lo esperado. ¡Y toda esta aventura para levantar la contradicción toma unos 28 años!

La ciencia, no menos que otras actividades humanas, requiere de las decisiones de los actores involucrados y este caso muestra claramente cómo se han comprometido en tratar de dilucidar si la teoría podía sobrellevar los datos adversos.

III.e. La radiación de fondo y el espacio absoluto

Finalmente se ha hecho un relevamiento de alta precisión de la radiación de fondo y dio por resultado que la radiación es altamente isotrópica,³ tal como aparecía en un principio y con variaciones pequeñas, tal como era necesario para explicar la distribución inhomogénea de masa.

Sin embargo hay una variación de aproximadamente 0,1 % distribuida de forma elipsoidal de manera que en una determinada dirección el cielo parece irradiar en una temperatura un poco más alta y en la dirección opuesta, un poco más baja. Este resultado es interpretado como el efecto Doppler, no ya de las galaxias vecinas o lejanas sino el producido por el movimiento nuestro a través del espacio isótropo.

Si la Tierra se mueve respecto del universo en su totalidad, deberá observarse un corrimiento «al rojo» mirando en una dirección y un corrimiento equivalente pero «hacia el azul» en la dirección contraria. La proa apunta en esta última dirección y la popa, en la dirección en que la radiación de fondo está desplazada al rojo.

Luego de todos los cambios conceptuales, del abandono del éter luminífero en el que la luz presuntamente se transmitía, llegamos a un estado del arte en el que podemos medir

3 Es decir que su intensidad y características no depende de la dirección en la que apuntemos el radiotelescopio.

la velocidad de la Tierra respecto del universo completo,⁴ ¡como si la radiación de fondo cósmico nos indicara la existencia de un espacio en reposo absoluto!

Hasta ahora este resultado se interpreta como el movimiento de la Tierra debido a la diferencia neta en el campo gravitatorio debido a una distribución inhomogénea de masa, aunque muy bien podría ser una diferencia en la radiación misma y, en ese caso, no indicaría el movimiento de los aparatos receptores sino una propiedad de aquello que estamos detectando. Como siempre, la aventura de la interpretación de los datos no es tarea sencilla ni acabada y este caso es uno de los campos de investigación todavía abiertos.

IV. Efecto horizonte y escenario inflacionario: un triángulo amoroso entre cosmología, astrofísica y física de partículas

Hemos encontrado las inhomogeneidades que necesitábamos para confirmar el *big bang* y compatibilizar la teoría con la distribución inhomogénea observada de materia. Pero concentrémonos en la parte homogénea: cuán homogéneo aparece el panorama en diferentes direcciones de observación.

Si observamos en una determinada dirección y enfocamos más y más lejos, vemos zonas más y más antiguas del universo. Vemos cómo ‘era’ el universo en aquellas primeras etapas. Ahora bien, mirando en una dirección y en la opuesta, podremos observar galaxias que se alejan tan rápidamente de nosotros que a su vez no pueden haber interactuado entre ellas. La luz de una de ellas no ha tenido tiempo de llegar a la otra. Habrá entonces imágenes de galaxias que todavía no han llegado a la nuestra. Por lo tanto existe un horizonte de observación, más allá del cual no podemos tener información. Incluso podría haber imágenes que jamás nos llegaran en el futuro. Dado que las partículas no pueden viajar a más que la velocidad de la luz o bien a la velocidad de la luz si son partículas sin masa, entonces cada punto del espacio delimita un *cono de pasado* fuera del cual los eventos que ocurran no pueden haber sido causalmente relevantes. Por ejemplo, si ayer falló un satélite de comunicación a las 12:30 hs y nuestros registros indican que a las 12:25 hs tuvo lugar una tormenta solar, esta tormenta no pudo haber sido la causa de la falla en el satélite pues la información de la tormenta y con ella sus capacidades de causar algo, deben haber llegado 7 minutos más tarde, es decir a las 12:32 hs. De ese modo, aun cuando visto desde el sistema de referencia ubicado en la mitad entre el Sol y la Tierra la tormenta solar tuvo lugar antes que la falla del satélite, no pudo ser su causa. La tormenta solar aun siendo previa a la falla no está suficientemente atrás en el tiempo como para que sea causa de la falla. La tormenta solar está fuera del *cono de pasado* de la falla del satélite y por el mismo motivo la falla del satélite está fuera del *cono de futuro* de la tormenta (figura 7).

4 Según diferentes mediciones la velocidad de nuestro sistema respecto del fondo de radiación es de entre 300 y 700 km/s (Peebles 1993: 153).

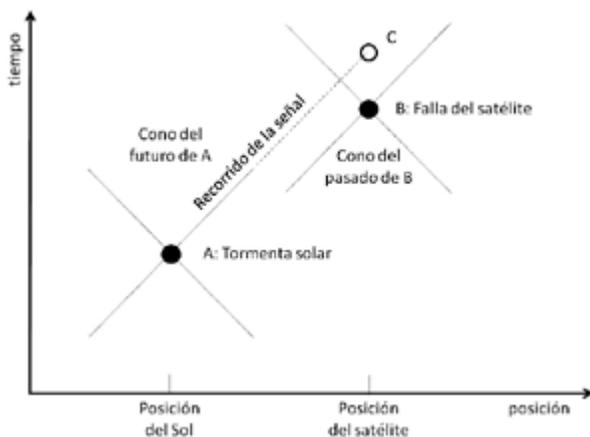


Figura 7. La inclinación indica la velocidad de la señal luminosa y es la inclinación de menor pendiente posible; toda señal viajará con inclinaciones más cercanas a la vertical. A y B son eventos desconectados causalmente.

Habría, por lo tanto, zonas causalmente desconectadas dentro del universo a lo largo de toda su historia. Teniendo en cuenta esta limitación surge naturalmente la pregunta de por qué encontramos zonas distantes del universo que no han estado causalmente conectadas y sin embargo tienen las mismas características.

Una primera propuesta podría ser adjudicarles una causa común, pero esta estrategia no da los frutos esperados. Estas zonas desconectadas, para poder tener una causa común, deberían tener algún episodio o evento común en el pasado, pero ese evento tiene que ubicarse muy atrás en el tiempo y no hay suficiente tiempo hacia atrás porque antes de llegar a ese presunto instante común nos topamos con la gran explosión.

Se ha propuesto, en cambio, que hubo alguna etapa en la que tales zonas pudieron interactuar, luego de lo cual el universo se expandió a un ritmo notablemente superior de modo exponencial, dando como resultado de esa inflación, zonas aparentemente desconectadas pero que han podido emparejarse térmicamente. Esta etapa *inflacionaria* del universo debería haber ocurrido de tal modo que se conjeturan ciertas características para la interacción entre campos, espacio aparentemente vacío y partículas⁵. Una vez más, el estudio de las partículas y la interacción entre campos de fuerzas puede echar luz sobre si esta conjetura va por buen camino.

Precisamente la conjetura proviene de imaginar novedades en las interacciones entre campos y entre partículas en alguna etapa de la expansión: ¿Qué pudo haber dado lugar a un cambio drástico en el modo en que el espacio se expandía en aquellos primeros instantes? Y ¿cuándo tuvo que tener lugar esa etapa de expansión?

Es conocido por los físicos que existen episodios que cambian la manera en que un sistema alcanza el equilibrio de modo que se produce una *transición de fase* y así pueden distinguirse diferentes etapas en la evolución del sistema.

Veamos un ejemplo. Cierta día mi amigo y colega Jorge Paruelo toma una botella plástica con agua que tenía en el *freezer*. El agua no se había congelado, pero al servir el primer vaso,

5 Alan Guth en 1980 propuso esta idea que posteriormente fue desarrollada por Andrei Linde y Paul Steinhardt de modo independiente. Véase Guth y Steinhardt (1984) y Linde (1995), que constituyen descripciones accesibles y de primera mano de esta propuesta.

tanto el agua en el vaso como en la botella se congeló como si un efecto ‘dominó’ se extendiera desde la zona del pico de la botella hacia ambos extremos. La física explica este episodio señalando que si el enfriamiento del agua ha sido suficientemente rápido como para que las moléculas no hubieran tenido tiempo de acomodarse para formar cristales de hielo. Si el agua tiene impurezas es altamente probable que comiencen a formarse los cristales de hielo en esos puntos, pero si no hay tales perturbaciones el proceso puede requerir más tiempo y que la temperatura baje todavía más. Es muy probable que el agua que Jorge sacó del *freezer* estuviera a punto de congelarse pero necesitaba una pequeña perturbación para un ordenamiento molecular más estable. Esa perturbación provino de inclinar la botella.

El agua líquida no tiene simetría mientras que al solidificarse obtiene direcciones en la que se orientan los diferentes ejes de los cristales de hielo, aun cuando en diferentes regiones del agua se hayan generado cristales con diferente alineación. El agua al congelarse pierde el ordenamiento que tenía para adquirir un ordenamiento distinto. Pasa de no tener direcciones privilegiadas a tenerlas. No tener direcciones privilegiadas es equivalente a tener la mayor de las simetrías: simetría esférica (toda dirección es equivalente a otra). Al congelarse el agua se rompe esa simetría y el modo en lo que desencadena esa pérdida es aleatorio: una pequeña perturbación.

Pues bien, según la propuesta inflacionaria, tal etapa debe haber ocurrido previamente a una transición de fase, luego de la cual ciertas simetrías aparecen. Un caso particular es la de que según las teorías previas, la radiación pudo formar pares de partículas de materia-antimateria pero nuestras observaciones parecen indicar que las galaxias están hechas de materia y no de antimateria. De este modo el balance ha sido roto en algún momento para dar predominio de la materia por sobre la antimateria. Tampoco parece verosímil que haya zonas con antimateria ya que en las zonas intermedias en las que materia y antimateria interactuaran, se aniquilarían dejando como rastro la radiación equivalente y podríamos detectar esa radiación como una luminosidad debida aparentemente a nada.

Si no atribuimos este desbalance a ciertos procesos deberíamos atribuirlo a las meras condiciones iniciales, cargando más y más el preciso inicio con condiciones cada vez más específicas.

En este punto vale la pena señalar que si se otorga mucha importancia a las condiciones iniciales aparece el argumento de cuán poco probable era que se dieran exactamente las condiciones que se dieron en el *big bang* como para que el universo evolucionara como lo hizo dando lugar al surgimiento de vida y conciencia. Aparece la tentación de proponer que hubo un diseñador que sintonizó específicamente tales condiciones. Por otra parte para condiciones muy poco probables que han ocurrido y dado lugar al surgimiento de la conciencia, es evidente que aparecerá la pregunta de cómo ha sido posible tal situación. En este sentido un universo tan poco probable aun sin diseñador hace inevitable que sus seres inteligentes se pregunten cómo ha sido posible. Una de las respuestas más sofisticadas que tenemos a mano es que todas las versiones de universo existen en paralelo, pero nosotros existimos en éste y los otros se nos aparecen como universos posibles.⁶

Retomando la propuesta inflacionaria, sin darle gran relevancia a las condiciones iniciales, en un comienzo debería haber habido una gran cantidad de energía confinada a un espacio muy reducido pero en expansión y en ese espacio habría ciertos campos de valor nulo, que al bajar la temperatura por la expansión, podrían tomar valores no nulos apareciendo así regiones

6 Estas dos maneras de tratar el tema corresponden al *Principio Antrópico* fuerte y débil respectivamente. Véase Kaku (1996), Davis (1992) y Wolf (1990).

del espacio que los físicos llaman «falso vacío». Por efectos cuánticos este falso vacío podría interactuar con su entorno y constituir la perturbación que desencadene la transición de fase con la ruptura de la simetría al bajar la temperatura del universo al valor crítico⁷.

Este campo, llamado *campo de Higgs*, sería responsable de la aparición de una presión de repulsión que diera lugar a la expansión exponencial duplicando el diámetro del universo cada 10^{-34} segundos. Esta etapa constituye la era inflacionaria del universo que lo llevó a aumentar su tamaño en un factor 10^{50} en una fracción de 10^{-32} segundos liberando la energía contenida en ese falso vacío y dando lugar a una gran producción de partículas. A partir de allí la expansión continúa al ritmo que surge de las estimaciones de la teoría normal o estándar del *Big Bang*.

De este modo la propuesta da una solución a los problemas de horizonte mostrando que las regiones que hoy parecen haber estado tan separadas de modo que parece inexplicable que coincidan en sus características, en realidad son regiones que tuvieron oportunidad de interactuar y correlacionarse previamente a la era inflacionaria.

La clave para apoyar esta teoría está en la existencia del campo de Higgs y con él, la partícula de Higgs cuya interacción con el resto de las partículas elementales es responsable de que algunas de ellas posean masa (Penrose, 2007: 864).

El modelo estándar de la física de partículas describe las interacciones entre las partículas elementales y ha predicho exitosamente la existencia de diferentes partículas. Sin embargo, la existencia del bosón de Higgs, que vendría a completar el panorama tanto de la cosmología como de la interacción elemental, no ha sido todavía verificada.

La última respuesta acerca de la existencia de cada partícula predicha está en manos de los detectores de rayos que llegan del espacio o bien de los detectores organizados en varias capas alrededor del lugar en que chocan las partículas en un acelerador o colisionador de partículas.

Colisionadores más potentes pueden dar respuestas que no han podido obtenerse con los anteriores aceleradores. Es sencillo: no utilices un pequeño anzuelo para atrapar un gran pez.

Si la partícula que queremos cazar es muy masiva, deberemos disponer de grandes aceleradores, generar choques muy energéticos e interpretar los resultados para decidir si refuerzan nuestras creencias o las ponen en riesgo. Lo que ya sabemos es que cada nuevo acelerador brinda no solamente el dato que necesitábamos para decidir sobre las teorías sino también una catarata nueva de información que impulsa nuevamente a la construcción de teorías que les sirvan de marco explicativo.

La cosmología espera confirmar sus teorías con los experimentos de la física de partículas mientras que las observaciones de las explosiones de supernova brindan a los astrofísicos un escenario de acelerador de partículas natural, aunque ocasional y sin el control de variables de la experimentación.

Una triple unión de especialidades, cada una de ellas con sus técnicas y saberes subsidiarios para poder decir que registran algo, enfrentan un mismo objetivo: de qué está hecho el universo y cuáles son los procesos que han tenido lugar.

La hipótesis de una era inflacionaria, sin saber si ha dado en el blanco, ha brindado un rumbo para la investigación que permite dar coherencia no ya al conocimiento sino a la propia investigación básica.

7 Será más eficaz remplazar estos falsos vacíos por el rol desencadenante que puedan tener ciertas regiones que ya hayan perdido la simetría para inducir a las vecinas a hacerlo como lo indicamos en el ejemplo del agua sobreenfriada.

Sin embargo, la propuesta de un escenario inflacionario, aun dando solución a los primeros problemas de horizonte, abren la posibilidad de los mismos problemas para episodios ubicados respectivamente en el pasado de cada una de esas zonas. De este modo el escenario inflacionario no puede tomarse como una solución general y definitiva para el problema de la coincidencia de características entre zonas desconectadas causalmente aun habiendo brindado otros logros adicionales⁸.

Quizás la solución a los problemas de horizonte provenga de adjudicar las coincidencias a las condiciones iniciales del *big bang*, aun cuando tal atribución haga parecer improbable que el universo haya sido determinado desde el comienzo por las condiciones iniciales tanto más que por las interacciones. O quizás las teorías tengan todavía que dar un giro inesperado, tanto en lo que respecta a las interacciones entre partículas y entre campos como a una descripción general del cosmos, de manera que estos problemas parezcan no ser tan cruciales como lo parecen en el presente.

Los resultados de los nuevos aceleradores de partículas pueden marcar la dirección de este próximo giro.

V. Otras interpretaciones

Son pocos los científicos que no están convencidos de que la Teoría del *Big Bang* sea adecuada. Algunos de ellos se inclinan a favor del modelo de *Universo Estacionario*⁹. Este modelo describe un universo en expansión continua tal cual la que se infiere a partir del corrimiento al rojo de las galaxias, pero con la particularidad de que la densidad de partículas del Universo permanece constante. Esto significa que al expandirse el espacio se deberán crear partículas de modo de mantenerse la cantidad de materia por unidad de volumen (en forma global). Según este modelo, el Universo se expandiría y a la vez se crearía materia de modo que una zona del espacio siempre presentaría el mismo aspecto sin importar en qué época nos fijáramos. Con ello se puede sostener la idea de que el Universo no fue creado ni que apareció en algún instante. En este modelo descriptivo preguntarse a partir de cuándo existe el Universo se responde fácilmente: existió siempre y siempre existirá con el mismo aspecto. La expansión y la creación de partículas en el vacío funcionan conjuntamente dando un balance en el que se mantiene constante la densidad de partículas.

El modelo estacionario da perfecta cuenta del alejamiento de las galaxias pero tuvo que enfrentar una acomodación al descubrirse la radiación de fondo que corroboraba fuertemente la Teoría del *Big Bang*. Dado que según el modelo estacionario no hubo explosión inicial, ¿de dónde venía esta radiación de fondo?

Se sugirió que tal radiación podía provenir de las nubes de polvo existentes en el Universo que absorberían la radiación de las estrellas y la reemitirían en la frecuencia observada del fondo cósmico. Sin embargo no queda explicado totalmente el hecho de que la radiación de fondo no varía en las distintas direcciones de observación. Otro ajuste sería sostener que la distribución de estrellas y de polvo interestelar es homogénea. Pero más tarde, al encontrar las pequeñas inhomogeneidades se debería agregar que la distribución de estrellas y polvo es así de inhomogénea.

8 John Earman (1995) aborda esta dificultad con bastante detalle.

9 Sus representantes más conocidos son Fred Hoyle y Chandra Wickramasinghe (Hoyle, 1985/ Hoyle; Wickramasinghe, 1992).

De este modo la Teoría del Universo Estacionario «sobrevivió» al descubrimiento de Penzias y Wilson pero no sin ajustes.

De un modo más drástico se ha puesto en duda que el corrimiento al rojo sea producto del alejamiento. Esto es ni más ni menos que sostener que hay otros procesos que competirían con el efecto Doppler. Si los fotones sufrieran un efecto de ‘envejecimiento’ por el cual cuanto más tiempo han estado viajando tanto más ha disminuido su frecuencia, tendríamos un panorama exactamente igual al de la ley de Hubble pero sin absolutamente ninguna expansión. Los fotones que han viajado durante más tiempo son los que provienen de las galaxias más alejadas y por lo tanto mostrarán mayor corrimiento al rojo arrojando los mismos resultados que nos llevaron a proponer la expansión. Si los fotones tienen un corrimiento al rojo debido al tiempo que hace que fueron emitidos, el universo puede estar constituido de un espacio quieto. Expansión, explosión inicial, era inflacionaria y otras conjeturas habrían sido ideas erradas. Sin embargo, estas propuestas alternativas deberán enfrentar el problema de la articulación entre campos del conocimiento. Ya no es posible sostener una cosmología que no sea consistente con los conocimientos de astrofísica y de la física de partículas. La libertad para la conjetura se estrecha en la medida que el conocimiento se aplica a campos cada vez más vastos.

Una característica importante del descubrimiento de los detalles en la radiación de fondo es que los defensores de la Teoría del *Big Bang* habían anticipado que de ser correcta la teoría deberían encontrarse tales inhomogeneidades, mientras que tales rasgos no se desprendían de la teoría del modelo estacionario. De este modo, al obtener los resultados predichos, la Teoría del *Big Bang* obtiene credibilidad mientras que los arreglos que sufra la Teoría del Universo Estacionario hacen que su credibilidad descienda.

VI. Materia oscura y futuro del universo

El panorama parecería casi completo si no fuera por haber dejado de lado ciertos datos. Ya en 1930 se registraba que las velocidades de las galaxias dentro de los racimos indicarían que esos racimos contienen mucha más masa que la que le atribuimos por la luminosidad o la absorción. Y desde 1970 la misma situación se detectó para los movimientos de galaxias espirales. Las velocidades de las estrellas en una galaxia en rotación deberían seguir una distribución en relación a la distancia al centro de la galaxia de un modo similar a cómo los planetas de órbitas externas recorren más lentamente su órbita que los internos. Un buen análogo es la rotación de la espuma del café al revolverlo en la taza. Sin embargo los movimientos de las estrellas alrededor del centro de distintas galaxias estudiadas muestran un patrón de rotación más similar al de un sólido.

La idea de que las estrellas estaban empotradas en grandes distribuciones de masa no se hizo esperar. Las galaxias y los racimos de galaxias muestran que, si las leyes de movimiento son correctas, hay mucha más masa que la que hemos estado estudiando.

El hecho de que hayamos conjeturado la existencia de esta *materia oscura* solo por sus efectos gravitacionales y no por su interacción con la radiación muestra que no puede tratarse de protones, neutrones y electrones o residuos de estrellas o polvo interestelar o intergaláctico. Debe tratarse de algo que interactúa muy poco con la materia común aunque contribuye notablemente con su masa.

Pareciera que la mayor parte de la materia con masa no está asociada directamente con la emisión o captura de radiación. ¡Hemos estado viendo solo entre un 15 y un 20 por ciento de lo que hay!

Este descubrimiento reaviva el interés por la pregunta de si el universo seguirá en expansión indefinidamente hasta una muerte térmica en la que ya no hay interacción, o bien si la masa total existente será suficiente para frenar la expansión, y en todo caso comenzar una etapa de contracción hacia un *big crunch*¹⁰.

La respuesta está escondida en la relación entre la velocidad de expansión y la densidad de masa. Según se espera de la teoría estándar del *Big Bang* la expansión, luego de la era inflacionaria habría seguido con un ritmo moderado que disminuye paulatinamente. Es decir, se esperaba que la constante de Hubble fuera decreciendo con el tiempo. Sin embargo a finales del segundo milenio las mediciones de mayor precisión mostraron que la expansión parece estar acelerándose.

La pregunta permanece aún hoy sin respuesta aunque son claras las estrategias para la búsqueda de esa respuesta. Por un lado debemos registrar el ritmo de expansión con precisión cada vez mayor y por otro lado debemos comprender de qué está compuesta esa materia oscura para poder contabilizarla junto con la materia conocida.

Las partículas que formarían esa materia oscura no han sido todavía descubiertas aun cuando muchas especulaciones han sido ofrecidas.

Nuevamente el estudio de explosiones de supernova y de resultados obtenidos en los grandes colisionadores son los caminos a seguir explorando.

VII. Conclusiones

La Teoría del *Big Bang* cuenta con el apoyo mayoritario de la comunidad científica. Sin embargo el conocimiento en este campo de investigación, lejos de completarse de modo acumulativo nos invita a reconsiderar la articulación entre las afirmaciones de la teoría y los conocimientos establecidos en otras áreas. La articulación consistente es un requisito básico de la investigación en ciencias naturales de manera que cada vez es más difícil proponer hipótesis que puedan dar una buena explicación de su objeto de estudio y cumplir con cada una de las restricciones que el resto del conocimiento les impone.

La teoría estándar ya no es una teoría solamente del origen y desarrollo del cosmos sino que se ha instituido en una teoría de todo lo que hay: espacio, tiempo, energía y materia.

Quedan por investigar los aspectos que permanecen abiertos como lo son si el Universo seguirá en expansión indefinidamente o si se volverá a aglomerar la energía en un punto, cuáles fueron las condiciones por las que se formaron las inhomogeneidades desde los albores de la expansión, qué tipo de interacción se da entre partículas como para que unas tengan masa en reposo y otras no, qué porción de la información debe ser atribuida a las condiciones iniciales y cuáles características emergen naturalmente de los procesos que tuvieron lugar, qué otras partículas pueden estar allí afuera para ser descubiertas todavía y de qué modo pueden alterar el panorama global, qué procesos tienen lugar en puntos singulares del espacio tiempo y de qué modo se pueden conectar porciones aparentemente desconectadas

10 Una de las incógnitas relacionadas con este tema es cuál es la masa de los neutrinos y cuán abundantes son en el universo; y en un nivel más especulativo todavía, si hay diferentes tipos de neutrinos, unos livianos y otros pesados o si la masa está provista por entidades totalmente nuevas para el zoológico de partículas que conocemos en la actualidad.

causalmente. Cómo afecta a nuestra visión del cosmos el saber que al crearse pares de partículas que viajen en direcciones opuestas sus comportamientos quedan correlacionados aun cuando los separe una distancia que los desconecta causalmente y tantos otros interrogantes que motorizan la investigación.

Hemos recorrido un largo camino desde que en la antigüedad se pensaba al Universo con un tamaño finito y fijo, sin vacío, sin expansión, sin comienzo ni fin, con movimientos circulares eternos y con leyes diferentes para el cielo que para la tierra. En cada etapa de ese camino creíamos haber dado con la teoría adecuada. La aventura de la ciencia es no saber cuál es el camino que todavía nos queda por recorrer y cuáles decisiones tomaremos en cada disyuntiva que los datos planteen a las teorías.

También hemos recorrido el camino que va desde la descripción disjunta de regiones del universo a la búsqueda de un panorama completo aplicable a lo macro y lo micro; un panorama que no solo diga de qué está hecho el universo sino que diga también cómo fue que llegó a estar constituido así. Ya no es posible formular teorías parciales para cada aspecto y tampoco las teorías pueden ofrecer mucho si no se las combina con otras. La red teórica hace que cada teoría se sustente parcialmente en otras y que a su vez, de sustento a las nuevas. La articulación entre campos aparentemente diversos hace que cada aporte o modificación repercute en el panorama completo que tenemos sobre el mundo.

La búsqueda de una gran teoría unificada que pueda darnos elegantemente una descripción sencilla de la complejidad existente parece ser un objetivo irresistible. La diversidad que golpea a la puerta de nuestros sentidos, amplificadas por los instrumentos de detección que brinda la tecnología, nos invita a preguntarnos por qué el universo es de este modo y no de otro. Ya no nos contentamos con saber qué hay, también queremos comprender por qué ocurrió así y no de otro modo. ¿Por qué el universo en que vivimos tiene estas características y ha resultado ser éste y no otro de entre todos los universos posibles? Intentamos comprender no solamente lo que hay sino también qué otra cosa podría haber habido.

VIII. Bibliografía

- Bojowald, M. (2008), «Rebote del universo», en *Investigación y Ciencia*, N° 387, pp. 14-19. Trad. español de *Scientific American*.
- Davis, P. (1992), *The Mind of God. The Scientific Basis for a Rational World*, Nueva York, Simon & Schuster.
- Earman, J. (1995), *Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks. Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes*, Nueva York, Oxford University Press.
- Ferraro, R. (2005), *El espacio-tiempo de Einstein*, Buenos Aires, Ediciones Cooperativas.
- Gangui, A. (2005), *El Big Bang. La génesis de nuestra cosmología actual*, Buenos Aires, Eudeba.
- Guth, A. y Steinhardt, P. (1984), «El universo inflacionario», en *Investigación y Ciencia*, N° 94, pp. 66-79. Trad. español de *Scientific American*.
- Hacyan, S. (2005), *Física y metafísica del espacio y el tiempo*, México, FCE.
- Hawking, S. y Penrose, R. (1996), *La naturaleza del espacio y el tiempo*, Madrid, Debate.

- Hawking, S. (1996), *Historia del tiempo ilustrada*, Barcelona, Crítica.
- Hoyle, F. (1985), *El Universo inteligente*, Madrid, Grijalbo.
- Hoyle, F. y Wickramasinghe, N. C. (1992), *Fuerza vital cósmica. La energía de la vida por el universo*, México, FCE.
- Jammer, M. (1954), *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*, Nueva York, Dover.
- Kaku, M. (1996), *Hiperespacio. Una odisea científica a través de universos paralelos, distorsiones del tiempo y la décima dimensión*, Barcelona, Crítica.
- Kosso, P. (1998), *Appearance and Reality: An Introduction to the Philosophy of Physics*, Nueva York, Oxford University Press.
- Landy, S. D. (1999), «Cartografía del universo», en *Investigación y Ciencia*, N° 275, pp. 4-11. Trad. español de *Scientific American*.
- Linde, A. (1995), «El universo inflacionario autorregenerante», en *Investigación y Ciencia*, N° 220, pp. 16-23.
- Oerter, R. (2008 [2005]), *La teoría de casi todo. El modelo estándar, triunfo no reconocido de la física moderna*, México, FCE.
- Peebles, P. J. E. (1993), *Principles of Physical Cosmology*, Princeton, Princeton University Press.
- Penrose, R. (2007 [2004]), *El camino a la realidad: Una guía completa de las leyes del universo*, México, Debate.
- QuintanaG., H. (1998), *Espacio, Tiempo y Universo*, Santiago de Chile, Universidad Católica de Chile.
- Sklar, L. (1994 [1992]), *Filosofía de la física*, Madrid, Alianza.
- Turner, E. L. (1988), «Lentes gravitatorias», en *Investigación y Ciencia*, N° 144, pp. 14-21. Trad. español de *Scientific American*.
- Vorontsov-Vel'yaminov, B. (1987), *Extragalactic Astronomy*, Glasgow, Hardwood Academic Publishers.
- Weinberg, S. (1997), *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, Nueva York, Basic Books, Inc. Publishers.
- Wolf, F. A. (1988), *Parallel Universes: The Search for Other Worlds*, Nueva York, Simon & Schuster.

Índice Analítico

A

- A priori: 48, 77, 78, 226, 256, 289, 332
- Aberración estelar: 394
- Abstracción: 30, 40, 128, 237, 334, 340,
- Aceleradores de partículas: 347, 396, 406, 414
- Acción a la distancia: 382
- Aceleración: 101, 130, 131, 133, 134, 205, 232, 238, 239, 367
- Ácidos
 - Teoría de la acidez: 276
- Acto: 43, 44, 45, 46, 52
- Adaptación: 292
- Afinidad química: 154
- Agnosticismo: 296, 298
- Agujeros negros: 345, 347, 405
- Aire
 - Desflogisticado: 275
- Álgebra: 66, 114, 334, 373
 - Cuántica: 375
- Alquimia: 31, 137ss, 178, 262, 263
- Analogía: 42, 178, 263, 339
- Anatomía
 - Animal: 53, 54, 55, 171, 173, 177, 181, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 191, 194, 199, 290, 291, 302
- Animales, taxonomía: 54
- Anomalía
 - Media: 96, 97, 99, 102, 103, 106, 108
 - Verdadera: 96, 97, 99, 102, 103
- Antimateria: 412
- Anti-Tierra: 23
- Ápeiron: 21
- Apologética: 113
- Ápside: 216
- Argumentos dialécticos: 242
- Argumento EPR: 383, 384, 385, 386
- Aristotelismo: 120, 124, 125, 126, 127, 225,
- Aritmética: 30, 37, 66, 67, 118, 169, 182, 330, 333, 334
- Arjé: 21, 22
- Artes liberales: 116, 118, 119
- Artes mecánicas: 176
- Astrología: 122, 123, 139, 144, 251, 252, 254, 261, 262
 - Caldea: 140
- Astronomía:
 - Platónica: 13, 15, 16, 18, 19, 20, 23, 26, 27, 254
 - Copernicana: 206, 207, 208, 210, 257, 258, 259, 260
 - Interpretación de Wittenberg: 250
- Esférica: 82, 83, 84, 221, 227
- Observacional: 241, 267
- Ptolemaica: 52, 64, 229, 249, 256

Atomismo

- Griego: 145, 152, 365
- Moderno: 366

Átomo

- De Hidrógeno: 366, 369, 374
 - Espectro del: 369
 - Estructura fina del: 370
- Estado estacionario del: 368, 371, 372
- Modelo de Bohr: 367, 369, 370, 372, 374
- Modelo de Rutherford: 366, 367, 368
- Modelo de Sommerfeld: 369, 370, 372
- Modelo de Thomson: 366
 - Radio del: 366, 367, 368
- Aurifacción: 141, 150
- Autoevidencia: 311, 312, 313
 - Criterio de: 78, 311, 333
- Automatismo, principio del: 197
- Axioma de Arquímedes: 331
- Axioma de Platón: 212, 227,
- Axiomas: 37, 39, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 75, 78, 310, 311, 331, 333, 334, 335
- Axiomático-deductivo, sistema: 65, 310, 324, 333
 - De Hilbert: 331, 334

B

- Big Bang, teoría del: 402ss
- Big Crunch: 406
- Biología: 34, 151, 289ss
- Bomba atómica: 344, 348, 350, 352, 353, 354, 355
- Bosón de Higgs: 413
- Botánica: 53, 173, 181, 189, 194, 270, 271, 279, 289

C

- Caída libre: 233, 238, 239, 240
- Calcinación: 152, 155, 272, 273, 274, 275, 278
- Cálculo: 66, 67, 206
 - Astronómico: 271
 - Diferencial: 329
- Cales: 272, 274
- Calor: 56, 131, 140, 149, 231, 272, 276, 277, 278, 354, 360, 376, 397
- Calórico: 281
- Calorímetro: 276, 282,
- Cambio
 - Accidental: 42
- Cualitativo: 42, 129, 130
- Cuantitativo: 42, 129
- Campo
 - De Higgs: 413
 - Electromagnético: 375, 376
 - Gravitacional: 332, 333, 345, 382, 383, 410
- Catástrofe ultravioleta: 361
- Catastrofismo: 292
- Categorías: 41
- Causa
 - Eficiente: 45, 46, 375

Final: 45
 Primera: 38, 46,
 Teoría de las cuatro: 44ss
 Causalidad: 57, 124, 128, 378, 380
 Ciencia
 Deductiva: 37, 39
 Del arte: 176ss
 Exacta: 139, 175, 184, 199
 Experimental: 13, 19, 164, 175, 270, 303
 Formal: 335
 Islámica: 114
 Natural: 68, 167, 175, 184, 199, 295, 332, 334,
 395, 416
 Pseudo: 141, 164
 Pura: 15, 36, 67, 195
 Cinemática: 18, 19, 130, 212, 265
 Mertoniana: 134
 Circunferencia máxima: 327, 328, 329
 Cladograma: 305
 Coherencia, Criterio de: 78, 333
 Combustión: 155, 194, 272, 274, 275, 276, 277,
 278, 281
 Cometa: 255, 345
 Complementariedad: 379, 380, 381, 382
 Compuesto químico: 278
 Comunidad científica: 77, 78, 164, 179, 276,
 277, 299, 301, 321, 360, 363, 365, 369, 373,
 377, 382, 392, 404, 408, 409, 416
 Conceptos universales: 36, 39, 128
 Polérmica medieval sobre los: 127ss
 Conceptualismo: 127, 128
 Conócete a ti mismo: 17
 Constante de Boltzmann: 362
 Constante de Hubble: 402, 416
 Constante de Planck: 362, 364
 Convencionalismo: 78, 128, 334
 Corrimiento al rojo: 401, 402, 406, 407, 414, 415
 Cosmología: 123, 203, 250, 259, 264, 410, 413,
 415
 Aristotélica: 49 ss, 231, 233, 241, 246
 Copernicana: 210
 Platónica: 20ss
 Creacionismo: 303
 Cromodinámica cuántica: 375
 Cruzada antievolucionista: 303
 Cuádricas: 322
 Cuadrilátero de Saccheri: 314
 Cuanto de luz (fotón): 364, 365, 368, 372, 377,
 378, 382, 383, 386, 399, 406, 415
 Cuanto elemental: 360ss
 Cuerdas, teoría de: 375
 Cuerpo negro: 340, 360, 361, 362, 363, 367
 Espectro del: 361, 398
 Curvatura constante: 324, 330

D

Deferente: 84, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 99,
 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109,

206, 212, 213, 214, 217, 218, 221, 222, 249,
 265
 Definición matemática: 67, 68, 69, 70, 72, 73, 75,
 78, 310, 333, 334
 Demiurgo: 20, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29
 Demostración: 17
 Matemática: 64, 65, 67, 69, 71, 73
 Silogística: 37
 Densidad: 230, 231, 262, 376, 406, 414, 416
 Desigualdad de Bell: 386
 Destilación: 140, 142, 146, 147, 148, 149, 150,
 153, 154, 157, 159, 162, 165, 194, 282
 Determinismo causal: 125, 376
 Dialéctica: 15, 17, 18, 19, 20, 21, 118
 Dinámica moderna: 175, 193, 258, 271
 Dios: 38, 46, 50, 113, 124ss, 156, 164, 169, 203,
 252ss, 290, 298, 302, 356, 382
 Prueba ontológica de la existencia de: 124
 Discontinuidad cuántica: 364, 375, 380, 381
 Diseño inteligente: 303
 Diseño divino: 190
 División, método de la: 29, 64
 Doble verdad, teoría de la: 120, 126
 Dogmatismo: 156
 Doxa: 17, 18, 35, 38
 Dualidad onda-partícula: 365, 371, 379, 380, 382
 Dualismo ontológico: 35
 Duplicación del cubo, problema de la: 65

E

Eclipse: 81, 208, 333, 345, 346
 Eclíptica: 27, 85, 86, 87, 90, 104, 207, 214, 219,
 222, 241, 259
 Ecología profunda: 199
 Ecuación de Bohr: 369
 Ecuación de Schrödinger: 376
 Ecuaciones de Maxwell: 338, 339, 343
 Ecuaciones diferenciales: 373
 Ecuador: 24, 25, 26, 86, 104, 224
 Celeste: 85, 86, 89, 209
 Ecuante: 94, 95, 96, 97, 98, 99, 101, 103, 105,
 106, 107, 108, 208, 211, 212, 214, 217, 218,
 222, 249, 256
 Efecto Doppler: 400, 401, 402, 409, 415
 Efecto fotoeléctrico: 347, 363, 364
 Efecto Stark: 370
 Efecto Zeeman: 370
 Electricidad: 271, 337, 360, 375
 Electrodinámica
 Clásica: 367, 368
 Cuántica: 375
 Electromagnetismo: 337, 338, 339, 340, 341,
 343, 355, 361, 368, 372
 Teoría de Maxwell del: 337, 338, 340, 360,
 363, 364, 365
 Electrón: 364ss
 Momento angular del: 368ss
 Órbita del: 368ss

- Elementos
Teoría de los cuatro: 18, 22, 24, 27, 28, 30, 40, 49, 51, 132, 140, 142, 148, 157, 158, 194, 204
- Transmutación de los: 50, 137, 140ss, 277
- Elipse: 218, 227, 257, 265, 322
- Empirismo: 121, 158, 171
Aristotélico: 235, 238
- Enciclopedistas latinos: 112
- Energía: 175, 199, 340ss, 360ss, 380, 382, 397ss, 404ss, 412, 416
- Enmarañamiento cuántico: 384
- Epíclis: 27, 84, 91ss, 109, 206, 209ss, 217, 218, 222, 249, 265
- Epísteme: 17, 18, 35ss, 236
- Equilibrio puntuado: 292
- Equinoccio: 86, 89, 93, 96ss, 209, 216
- Era Nabonnassar: 104, 109
- Escepticismo: 250
- Escolástica: 43, 170, 174, 236
- Esferas: 51ss, 91, 210: 220, 222, 255
- Celestes: 51: 204, 211, 213, 243
- Homocéntricas: 51, 205
- Espacio: 18, 22, 46ss, 77, 78, 222, 314, 332, 338ss, 345ss, 365, 396, 401ss, 412, 415, 416
Absoluto: 25, 338, 340, 409
De Hilbert: 375
Multidimensional: 374, 375, 376, 377, 381
Vacío: 47, 51, 342, 401, 411
- Espacio-tiempo: 344, 404, 405
Curvatura del: 332, 346
- Especiación: 292
- Espín (número cuántico angular): 370, 385, 386
- Estoicismo: 140, 144, 148, 153
- Estrellas
Cefeidas: 395, 401, 402
- Distancia relativa de las: 85
- Espectro de las: 396ss
- Fijas: 24, 25, 51, 83, 84, 87, 89, 101, 109, 205, 213ss, 232, 243, 249, 346
Esfera de las: 52, 53, 206, 213ss
- Luminosidad absoluta de las: 395
- Supernovas: 413, 416
- Éter: 18, 29, 51ss, 205, 213, 276, 338ss, 409
Retraso del: 339ss
- Evolución: 56, 289ss
Teoría de la: 291ss
- Excéntricas: 94, 210, 222, 249
- Experiencia sensorial: 225
- Experimento de Aspect: 386
- Experimento de Michelson-Morley: 338ss
- Experimento mental: 382, 383, 384
- F
- Facultades mentales: 185
- Fases de Venus: 216, 223, 225, 231, 232, 241, 260
- Ficción de Laplace: 376
- Ficciones: 258
- Filotaxis: 189
- Física: 18, 118, 129, 211, 233, 259, 269, 337, 340, 412
Aristotélica: 37ss, 204, 206, 224, 229, 231, 238, 240, 249, 255, 338
Clásica: 77, 193, 206, 361, 362, 367, 376, 379, 381
De Partículas: 414, 415
Moderna: 31, 234, 239, 381
Cuántica: 341; 359ss
Nuclear: 349, 350
Fundamentos de la: 359, 360, 371
- Fisiología: 20, 55, 178
Comparada: 186, 189
- Fisión del uranio: 344, 347, 348, 350, 351
- Flogisto: 272, 273, 274, 276, 278
Teoría del: 269, 272, 273, 274, 277, 279, 285
- Formalismo (en matemáticas): 334
- Fuerza: 130, 132, 133, 193, 204, 234, 238, 259, 265
- Centrífuga: 224
- Centrípeta: 265
- Gravitacional: 214, 332, 345, 406
- Magnética: 245
- Motriz: 204
- Vital: 291
- Fuego central: 23
- Función de onda: 374, 375, 376, 382, 384
Colapso de la: 382
- G
- Galaxia de Andrómeda: 395, 404, 405
- Gases: 160, 272, 273, 275, 280, 282, 362, 398, 399
Interestelares: 399
Teoría cinética de los: 362, 366
- Gato de Schrödinger: 384
- Genes: 292
- Genética: 292, 301,
- Geocentrismo: 50, 169, 203, 207, 217, 222, 259
- Geodesia: 66
- Geología: 184, 289, 294, 296, 300
- Geometría: 23, 37, 118, 190, 254, 261, 309, 332, 345
Absoluta: 320
Astral: 77
- Cartesiana: 175
- Consistencia de la: 330
Elíptica: 77, 322, 326ss, 335
Modelo Doble esférico: 327
- Esférica: 64, 327, 328
Euclidiana: 61ss, 310, 316, 318, 321, 322, 324, 327, 330, 332
Fundamentación de la: 331
Hiperbólica: 77, 321ss, 328
Modelo de Klein: 325
- Lobachevskiana: 321, 323, 330
- No Euclidiana: 309ss

Proyectiva: 64, 331
Gnosticismo: 139, 140, 145
Gran año: 25
Gravedad: 193, 214, 225, 290
 Específica: 231, 240
 Fuerza de: 332, 345
 Ley de: 297
Gravitación universal, teoría de la: 345

H

Heliocentrismo: 170, 175, 208, 214, 223, 225, 226, 253
Herencia: 301
 Leyes de la: 303
Hermetismo: 139, 140, 254, 264
Hidrodinámica: 271
Hidrógeno: 147, 276ss, 366ss, 401
Hipérbola: 312, 322
Holístico, enfoque: 183
Homeopatía: 158
Humanismo: 168, 169, 170

I

Idealismo: 381
Ideas
 Teoría de las: 17, 20
Ilustración: 270, 272, 290
Ímpetus: 133, 134, 204
Teoría del: 120, 128, 129, 132, 133, 134
Inducción, método de la: 39
Inercia: 259, 343
 Principio de: 134, 193, 205
Infinito: 76, 78, 314
Innatismo: 35
Intelectualismo ético: 17
Intuición: 17, 56, 69, 76, 78, 256, 311, 314, 344
A priori: 77
Racional: 35, 37
Isocronismo: 230

J

K

L

Lamarckismo: 300
Latitud celeste: 86, 87
Ley de no contradicción: 126
Ley de Hubble: 402, 403, 415
Ley de Planck: 362
Ley de Rayleigh-Jeans: 361, 363
Ley de Wien: 361, 362
Ley natural: 124, 186, 258
Leyes de Kepler: 261, 265
Leyes de Newton: 360, 374
Línea absidal: 94ss

Lógica: 118, 335
 Aristotélica: 37, 39, 116, 121, 124, 236
 Diagramática: 335
Matemática: 335
Principios de la: 70
Logística: 66, 67
Longitud
 Celeste: 85, 86, 87, 101
 Media: 92ss
 Verdadera: 93, 94, 99, 100, 106
Luz: 131, 191, 226, 332, 345, 346, 363, 396, 397, 400
 Aberración de la: 224, 225
 Difracción de la: 364
 Interferencia de la: 364
 Ley de refracción: 260
 Ondas de: 376
 Propagación de la: 194, 342, 364, 409
 Teoría corpuscular de la: 365, 380
 Teoría ondulatoria de la: 194, 338, 365, 380, 396
 Velocidad de la: 342, 343, 344, 345, 360, 386, 404

M

Macrocosmos: 21, 143, 159, 263
Magnetismo: 245, 271, 337, 360
Mareas, movimiento de las: 232, 233, 242, 244, 264
Masa: 101, 204, 230, 277, 342ss, 365, 405, 409, 410, 415, 416
 Ley de conservación de la: 277, 282
Masa crítica: 351, 352
Matemática: 15, 17ss, 37, 61ss, 128, 167, 236, 254, 318, 334
 Aplicada: 334
 Fundamentación de la: 321, 331
 Pura: 21, 82, 334
Materia: 20ss, 28ss, 41ss, 125, 133, 140ss, 160, 204, 277, 282, 291, 343, 344, 359, 360, 364ss, 399ss, 410, 412, 414, 416
 Ley de conservación de la: 269
 Ondas de: 371, 372, 374
 Oscura: 415, 416
Materialismo: 154, 290, 381
Matrices: 373
Mayéutica: 17
Mecánica: 23, 101, 118, 206, 343, 345, 361
 Celeste: 258, 265, 338
Cuántica: 57, 341, 355, 359ss
 Incompletud de la: 383, 384, 385
 Interpretación de Copenhagen de la: 379, 380, 381
 Interpretación probabilística de la: 375, 376
 Problema de la interpretación de la: 378ss
Matricial: 373, 374, 375, 377
Newtoniana: 347, 360, 365, 374
Ondulatoria: 374, 375, 376

Medicina: 18, 36, 63, 118, 123, 139, 141, 150ss, 208, 272
Medición: 66, 128, 275, 376, 380, 384, 385, 393
 El problema de la: 378ss
Método científico: 174, 199
Método experimental: 173, 175, 180, 274
Microcosmos: 21, 143, 159, 263
Microscopio: 234, 341, 377
Mineralogía: 270, 271, 279
Misticismo: 126, 141
Molécula: 341
Movimiento: 17, 24, 38ss, 57, 127, 130, 132, 133, 198, 204, 229ss, 338
 Acelerado: 239
 Aparente: 18, 19, 209, 213, 214
 Browniano: 341
 Circular uniforme: 23, 25, 48, 51, 52, 53, 91
Forzado (o violento): 132, 133, 204, 234, 249
Local: 48, 129ss
Natural: 50, 52, 132, 133, 134, 204, 234, 249
Principio de: 208, 218
Rectilíneo uniforme: 338, 343
Uniforme: 130, 131, 132
Mundo,
 Alma del: 24, 253
 Armonía del: 57, 174, 218, 241, 253, 254, 260, 261, 263
 Cuerpo del: 24
 Empírico: 204, 237
 Fenoménico: 38, 40, 42
 Físico celeste: 18
 Físico terrestre: 18
 Ideal: 17ss, 35
 Sensible: 17ss, 35, 49
 Sublunar: 49ss, 216, 249
 Supralunar: 49, 51, 53, 133, 250
 Música de las esferas: 261, 262, 263

N

Naturalistas: 289ss
Navaja de Ockham: 129
Neodarwinismo: 292, 301
Neolamarckismo: 291
Neoplatonismo: 29, 116, 122, 152, 170, 175, 177, 222, 251, 254, 261
Neutrón: 348, 349, 366, 415
Nitrógeno: 275
Nociones comunes: 70, 310, 313, 331
Nomenclatura química: 155, 160, 186, 278ss
Nominalismo: 120, 121, 127, 128, 134
Nous: 37, 56
Núcleo atómico: 366, 367, 374, 398, 399
Números
 Cuánticos: 370, 379
 Azimutal: 369, 370
 Magnético: 370
Irracionales: 22, 30, 66, 67
Primos: 67

Q: 375

O

Osciladores armónicos: 371
Onda-piloto: 372
Ondas de radio: 396
Ondas electromagnéticas: 332, 337, 360, 375
Óptica: 64, 82, 114, 123, 139, 155, 177, 189ss, 259, 271, 360
Órbita planetaria: 23, 27, 218, 222, 227
 Circular: 217, 257
 Elíptica: 265
 Excentricidad de la: 209, 216, 218, 256, 259
Ortogénesis: 291, 300
Oscurantismo: 168, 169, 385
Ósmosis: 188
Ouroboros: 143
Ousía: 41ss
Oxígeno: 149, 273, 275, 276, 277, 279, 280, 281, 282, 370

P

Palanca, principio de la: 230
Parábola: 322
Paraboloide hiperbólico: 324
Paralaje
 Estelar: 215, 216, 220, 223, 224, 225, 232, 246, 255, 392ss
 Lunar: 82
Partículas: 27, 153, 341, 359, 360, 365, 366, 370ss, 386, 396, 406, 412ss
Alfa: 366, 367
 Dispersión de: 366, 367
Elementales: 381, 413
Modelo Estándar de: 375
Perigeo: 98, 99, 216
Perihelio de Mercurio, problema del: 342, 345, 347
Período de revolución: 90, 101, 103, 213, 261
Perspectiva: 64, 175, 176, 180, 181, 189ss
Peso negativo: 273
Pharmakon: 141
Physis: 39ss
Piedra filosofal: 137, 150, 152, 161, 165
Pitagorismo: 15, 22, 65
Planetas
 Interiores: 103
Movimiento de retrogradación: 89ss, 205, 213, 215, 220, 256
Superiores: 90
Plano
 Euclidiano: 321, 324, 332
 Hiperbólico: 324, 325, 326, 330
Platonismo: 30, 31, 34, 113, 122, 140, 253, 262
Platónico-pitagórica, tradición: 13, 31, 65, 67, 72
Pneuma: 22, 56, 148
Poliedros regulares, teoría de los: 28, 65, 67
Postulado (ver Axioma)

Postulado de Euclides (o V Postulado): 76, 309ss
Pragmatismo: 250
Primer motor: 38, 46, 132
Primeros principios: 35, 37ss, 135
Principio de exclusión de Pauli: 370, 374
Principio de incertidumbre: 356, 377, 382, 383
Probabilidad: 241ss, 255, 362, 371, 373, 376, 383ss
 Ondas de: 377
Proporción áurea: 24, 190
Protón: 366, 415

Q

Quarks: 375
Química: 114, 137ss, 194, 269ss,
 Moderna: 31, 269281
 Neumática: 273
 Primitiva: 137

R

Racionalidad: 21, 55, 125, 126, 128, 141
Racionalismo: 57, 126, 155, 158
Radiación: 354, 355, 359, 360, 364, 368, 373, 375, 382, 397, 398, 406, 410, 412, 415
 Cósmica de fondo: 407ss
 De Equilibrio: 360
 De Microondas: 407
 Electromagnética: 360, 363, 364, 366, 367, 372, 396
 Infrarroja: 396
 Térmica: 340, 360, 361
 Espectro de: 360
 Ultravioleta: 364, 396
Radiactividad: 340
Rayos Catódicos: 363, 366
Rayos Gamma: 396
Rayos X: 340, 396
Razón: 17, 35, 70, 118, 140, 156, 158, 160, 163, 169, 178, 181, 214, 224, 254, 270
Disputa con fe: 111ss
Reacción en cadena: 348, 349, 351
Realidad: 17, 28, 30, 35, 40, 44, 49, 57, 77, 78, 110, 126, 127, 177, 222, 227, 255, 258, 309, 316, 317, 319, 331, 332, 333, 347, 359, 374
 Criterio de: 383, 384
 Difusa: 384
 Física: 52, 129, 333, 381, 383, 384
 Objetiva: 129, 381
Realismo: 127
 Científico: 383
 Local: 386
Rectas: 67ss, 311ss, 346
 Elípticas: 327
 Hiperparalelas: 323
 Paralelas: 74, 76, 310, 312, 313, 321, 323, 325, 326
 Ultraparalelas: 323

Reducción al absurdo: 73, 74, 75, 314
Refracción atmosférica: 259
Regla de cuantificación de Sommerfeld: 369
Regularidad, principio de: 211, 213
Relación de conmutación: 373
Relatividad
 Principio de: 338, 343, 345
 Teoría especial de la: 341ss, 363, 382ss
 Teoría general de la: 47, 332, 333, 335, 344ss, 375, 405
Reminiscencia: 35
Reposo absoluto: 338, 342ss, 410
Representación realista: 184
Revolución científica: 157, 163, 171, 174ss, 227, 253, 270, 274, 292, 347
Revolución copernicana: 31, 77, 174, 203, 208, 210ss, 250
Revolución matemática: 313, 318, 321, 331, 335
Revolución química: 269ss
Revolución relativista: 344ss

S

Saltacionismo: 291, 292
Salvar los fenómenos: 26, 206
Sangre, circulación de la: 188
Satélite: 408, 410
Secciones cónicas: 64, 65
Secretismo: 142, 143, 150, 157
Selección
 Natural: 289ss, 303ss
 Sexual: 305
Separabilidad (no localidad): 383, 386
Series de Balmer: 369
Seudoesfera de Beltrami: 326, 330
Silogismo: 37, 230, 234ss
Simultaneidad: 405
Sistema de referencia inercial: 342405, 410
Sol
 Manchas del: 231, 241, 259
 Velocidad del: 89
Sólidos regulares: 67, 190, 252, 381
Supervivencia: 295, 304
Sustancia: 21ss, 139, 140, 147ss, 231, 250, 275, 277ss, 340

T
Teleología: 45
Telescopio: 216, 225, 231, 234, 241ss, 252, 260, 266, 393, 402, 405
Telos: 36, 43, 45, 50, 54
Temperatura: 49, 56, 231, 354, 360, 361, 394ss, 406ss
 Absoluta: 360, 361
Tensor de curvatura: 329, 330
Teocentrismo: 169
Teología: 37, 38, 115ss, 250, 291, 302
Teorema
 de Pitágoras: 30, 65, 67, 75, 321

de Tales: 65
de la velocidad media: 131
Teoría ácido-alcalina: 161
Teoría cerrada: 381
Teoría cuántica antigua: 367ss, 379
Teoría M: 375
Teoría unitaria del trabajo: 177
Teosofía: 264
Termodinámica: 360, 361
 Segunda ley de la (Ley de entropía): 360, 362
Termómetro: 231, 276
Tiempo
 Absoluto: 344
Tierra
 Eje de la: 216, 223
 Movimiento de rotación de la: 216, 219,
 223ss
 Movimiento de traslación de la: 216, 217,
 219, 225
Órbita circular de la: 216, 217
Topografía estelar: 400
Transformaciones, teoría de las: 375
Transmutación, teoría de la: 291
Trigonometría: 110, 210
 Esférica: 221
 Plana: 221

U

Uniformismo: 294
Universo: 21, 28, 46ss, 113, 123ss, 150, 158,
164, 174, 192, 203ss, 229ss, 249, 252ss, 267,
271, 285, 332, 333, 338ss, 391ss
 Estacionario: 414ss
 Expansivo: 347, 402ss
 Finitud del: 133, 220, 347, 417
 Infinitud del: 210
 Inflacionario: 410, 414
Utilidad, principio de: 36, 40

V

Vacío: 22, 46ss, 111, 112, 127, 133, 239, 240,
340ss, 365, 401, 411ss
Variables ocultas: 385, 386
 Teorías de las: 385, 386
Velocidad uniforme: 131, 205, 211, 213
Verdad: 17, 31, 38, 69ss, 78, 120, 182, 227, 234,
249, 254, 263, 335
 Como correspondencia: 333
Criterio de: 72, 333
Necesaria: 125ss
Teoría sustancial de la: 72
Vía Láctea: 259, 401, 402
Vida: 138, 142, 198, 245, 289, 292, 297ss,
304ss, 384, 412
 Elixir de la: 150, 152
Principio de: 24

Z

Zoología: 38, 53, 173, 189, 194, 293, 295

Índice de Nombres

A

Abelardo, Pedro: 124
Abetti, G.: 228
Achaz: 226
 Adet, Pierre Auguste: 281
Adriano, P. E.: 106
Agatodaimon (alquimista): 145, 149
Agrícola, George: 166
Agustín de Hipona: 113, 121, 122, 124, 126, 127, 135, 155
Albenda Solis, C.: 335
Alberto de Sajonia: 121
Alberto Magno: 154, 155
Alcmenón: 54
Alcuino: 116
Alejandro Magno: 104, 139, 151, 33, 34, 61, 62, 146
Al-Fargani: 122
Alfonseca, M.: 284, 286
Algaroth, Vittorio: 278
Alhazen: 313
Alí Aben Rabel: 207
Alic, M.: 135
Al-Mamoun: 153
Al-Mansour: 153
Alonso, Almudena: 58
Al-Razi: véase Rhases
Amiclas de Heraclea: 65
Amintas III: 33
Anaxágoras: 54
Anaximandro: 21, 22
Anaxímenes: 22
Andersen, Geoff: 231, 246
Andrónico de Rodas: 34
Andur Pedersen, Stig: 79
Anscombe, G. E. M.: 58
Anselmo de Bec: 124
Antipáter: 34
Antonino: 82, 107
Apollonius: véase Apolonio de Perga
Apolonio de Perga: 63, 64, 65, 91, 92, 122
Apolonio de Rodas: 63
Apolonio de Tyana: 144
Apolonio: véase Apolonio de Pergae
Aquinas, Thomas: véase Tomas de Aquino
Aristarco de Samos: 212
Aristarco de Samotracia: 63
Aristocles de Atenas: 13
Aristófanes de Bizancio: 63
Aristón: 13
Aristóteles- pseudo: 122
Aristóteles: 3, 10, 13, 14, 15, 21, 22, 23, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46,

47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 63, 65, 68, 70, 71, 79, 91, 109, 112, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 129, 130, 132, 133, 134, 135, 138, 140, 153, 154, 155, 166, 169, 170, 174, 203, 204, 205, 206, 211, 213, 216, 227, 229, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 238, 240, 241, 242, 243, 249, 250, 251, 253, 310, 335, 338, 365
Armitage, A.: 228
Arnaldo de Vilanova: 155
Arnaud de Villeneuve: véase Arnaldo de Vilanova
Arquímedes: 7, 63, 65, 75, 122, 169, 196, 198, 205, 230, 213, 253, 317, 331
Arquitas de Tarento: 15, 16, 23, 65
Asclepiades: 33
Asclepios: 33
Augusto II el Fuerte: véase Federico Augusto II
Avempace: 204
Averroes: 122, 123, 125, 154, 204
Avicena: 122, 123, 125, 154, 204
Azzouni, Jody: 72, 79

B

Babini, J.: 173, 174, 175, 179, 181, 184, 186, 188, 189, 191, 192, 193, 194, 195, 198, 199, 200, 336
Bacon, R.: 126, 155, 198
Baltas, A.: 247
Barnes, Jonathan: 58, 236, 246, 247
Barret, R.: 335
Baumé, Antoine: 280
Becher, Johann Joachim: 272
Beda el Venerable: 112, 121
Bekker, Emmanuel: 34, 58
Bellarmine, Roberto (Cardenal): 232
Beltrami, Eugenio: 321, 324, 325, 326, 330, 335
Beltrán, A.: 135
Benítez, H.: 227, 228
Bennett, J. A.: 246
Bensaude, Bernardette: 150, 166
Bensaude-Vincent, B.: 269, 274, 275, 276, 278, 284, 285, 286
Beretta, M.: 286
Bermejo M. R.: 286
Bernal, J. D.: 8, 112, 174, 175, 180, 181, 184, 195, 200
Berthelot, M.: 287
Berthollet. C. L.: 278, 279, 281, 285, 286, 287
Bertomeu Sanchez, J. R.: 285, 286, 287
Bessel, Friedrich Wilhelm: 77, 224, 318
Bialas, V.: 268
Bienkowska, B.: 228
Birkenmajer, A.: 204, 207, 208, 227, 228
Blanco, J. G.: 110
Blagden, Charles: 277, 284
Boecio: 112, 115, 116, 121, 124, 127
Boehme, Jacob: 263
Boettger, Johann Friedrich: 164, 164

Bohl, Francisco: 83
 Bohm, David: 385, 386, 387
 Bojowald, M.: 417
 Boll, F.: 81, 110
 Bolos de Mende: 144, 145
 Bolyai, Farkas: 319
 Bolyai, Janos: 76, 77, 318, 319, 320, 321, 323, 330, 336,
 Bolyai, Johann: véase Bolyai, Janos
 Bolyai, Wolfgang: véase Bolyai, Farkas
 Bonola, R.: 317, 319, 320, 336
 Böttger: véase Boettger, Johann Friedrich
 Bounarotti, M. A.: véase Miguel Angel
 Boyle, Robert: 10, 163, 240, 275, 279, 365
 Bradley, James: 224, 225
 Bradwardine, T.: 129, 130
 Brahe, Tycho: 223, 224, 228, 233, 254, 255, 256,
 257, 258, 260, 266, 267
 Branchi, A.: 272, 287
 Brock, William H.: 151, 153, 158, 160, 163, 164,
 166, 273, 274, 277, 284, 287
 Bröcker, Walter, 58
 Brongniart, A.: 279, 287
 Brueghel, Pieter (el Viejo): 163
 Brunetti, F.: 246
 Bucquet, J. B.: 277, 279, 287
 Buenaventura (San): 126
 Buridán, John.: 121, 132, 133, 134, 204, 228
 Butterfield, H.: 135

C

Cabeo, Niccolo: 234, 246:
 Cadet-de-Vaux, Antoine-Alexis: 275, 280
 Calímaco: 63
 Calipo: 52, 205
 Calvo, Tomás: 58
 Camejo, Marina: 9, 31, 170, 174, 203, 228, 229,
 249
 Candel, Miguel: 58
 Cano Ledesma, A.: 110
 Carlomagno: 116
 Carman, Carlos A.: 110
 Carman, Cristián C.: 9, 27, 31, 76, 81, 123, 206,
 229, 249
 Cármides: 13, 14
 Carnot, Nicolas Léonard Sadi: 284
 Carrillo, J. L.: 287
 Cartwright, J.: 277, 287
 Caspar, M.: 251, 252, 253, 254, 256, 257, 258,
 259, 261, 265, 267, 268
 Caspar, Neumann: 279
 Cavendish, Henry: 271, 277
 Cayley, Arthur: 235
 Cayo Plinio Cecilio Segundo: véase Plinio el Viejo
 Celso: 157
 Chaulnes, (VII Duque de): 278
 Cherniss, H.: 58
 Chevalier, Jacques: 46, 58

Christianson, J. R.: 223, 228
 Ciceron, Marco Tulio: 212, 219
 Clavius, Christopher: 76
 Cleómenes: 61
 Cleopatra (alquimista): 144, 145
 Coffa, J. A.: 203, 204, 206, 214, 216, 228
 Cohen, I. B.: 228, 246, 264, 268
 Colerus, Egmont: 64, 66, 79, 336
 Colón, Cristóbal: 199, 392
 Coxeter, H. S. M.: 336
 Commandino, Federigo: 63, 76
 Condillac, E. B. de: 280, 282
 Condorcet, N. (Marqués de): 280
 Copenhaver, B. P.: 263, 268
 Copérnico, Nicolas: 31, 95, 174, 192, 203, 203,
 204, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213,
 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222,
 223, 224, 225, 227, 228, 229, 232, 233, 238,
 241, 242, 246, 249, 250, 251, 252, 253, 254,
 256, 265, 266, 268, 344
 Cornford, Francis: 25, 32
 Cristina de Lorena: 226, 228
 Crombie, A. C.: 135, 258, 268
 Crombie, I.: 16, 29, 32
 Cromwell, Oliver: 160
 Crosland, M. P.: 279, 280, 282, 287
 Crubellier, Michel: 58
 Cullen, William: 279
 Cuvier, G.: 290, 291

D

D'alembert, J. L. R.: 272, 287
 d'Albert d'Ailly, L. J.: véase Chaulnes, VII Duque
 de
 Danton, Georges- Jacques: 283
 Darcet (D'arcet), Jean: 280
 Datri, Edgardo: 75, 76, 77, 79, 336
 Daumas, M.: 287
 David, Jacques-Louis: 64, 68, 272
 Davis, P.: 412, 417
 Davisson, Joseph: 372
 Davy, Humphry: 276
 de Magalhaens, Joao Hyacintho: 273
 de Novara, Domenico Maria: 207
 de Porris, Georg Joachim: véase Rethicus
 de Samaranch, Francisco P.: 58
 Dear, P.: 246
 Demetrio de Falera: 63
 Demetrio Poliorcetes: 62
 Demócrito (falso): 145
 Demócrito de Abdera: 22, 145, 365, 381
 Descartes, René: 203, 260, 268, 317
 Diderot, D.: 272, 287
 Diego de Santiago: 162
 Diez de la Cortina Montemayor, Elena: 9, 33, 68,
 204, 229, 249, 310, 338
 Digges, Leonardo: 231
 Digges, Thomas: 231

Dinóstrato: 65
Diocleciano: 143, 152
Dion: 15, 16
Dionisio I: 15, 16
Dionisio II: 15
Dionisio- pseudo: 116
Dios: 251, 252, 254, 256, 260, 261, 262, 290,
298, 301, 302, 356, 382
Djerassi, C.: 287
Dobrzycky, Jerzy: 207, 208, 209, 213, 215, 218,
221, 222, 228
Donovan, A.: 287
Doppler, Christian Johann: 400, 401, 402, 409,
415
Drake, S.: 246
Dreyer, J.: 110
Dreyer, J. L. E.: 259, 268
Du Pont, Pierre: 284
Duhem, Pierre: 23, 32, 175
Dumas J. B.: 286
Dumbleton, J.: 129
Dunnington, Waldo: 319, 336
Duns Scoto, Juan: 126
Duquesa de Toscana: véase Cristina de Lorena
Düring, Ingemar: 39, 40, 44, 47, 50, 53, 54, 55,
56, 57, 58,

E

Earman, John: 414, 417
Ecfanto: 212, 219
Eigen, Manfred: 57
Einstein, Albert: 5, 228, 332, 333, 335, 337, 341,
342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350,
352, 355, 356, 363, 364, 365, 369, 371, 372,
374, 375, 376, 378, 379, 382, 383, 384, 385,
386, 387, 388, 403, 406, 417
Elena, Alberto: 250, 258, 268
Eliade, Mircea: 138, 166
Empédocles de Agrigento: 22, 54, 56, 140, 161
Eratóstenes de Cirene: 63
Escolar Sobrino, Hipólito: 63, 79
Escoto Erígena, Juan: 116
Escudero, Jesús Adrián: 58
Espeusipo de Atenas: 15, 33
Esteban de Alejandría: 145
Esteban, Soledad: 9, 137, 141, 150, 157, 158,
166
Estratón de Lampsaco: 63
Etchemendy, John: 335, 336
Euclid: véase Euclides
Euclides: 3, 7, 31, 32, 37, 58, 61, 63, 64, 65, 66,
67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78
79, 82, 109, 121, 123, 139, 169, 251, 252, 309,
310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318,
319, 322, 323, 324, 327, 330, 331, 333, 335,
336
Euclides de Megara/450-380- socrático: 15, 63
Eudoxio de Cnido: 23, 52, 65, 205, 213

Eurito: 15
Evans, James Allan: 15, 32
Evans, James: 84, 95, 110, 246
Eves, Howard: 71, 79, 323, 336

F

Farrington, Benjamin: 30, 32
Federico Augusto II: 164
Federico Guillermo II de Prusia: 164
Federico I de Prusia: 164
Fehèr, M.: 262, 268
Felipe II: 162
Ferraro, R.: 417
Feyerabend, P.: 57, 58, 379, 387
Ficino, M.: 170, 254, 262
Filipo de Macedonia: 16, 33
Filipo de Medma: 65
Filipo de Opunte: 29
Filipo II de Macedonia: 33
Filolao: 15, 22, 212, 216, 219
Filopón, Juan: 204
Filópono, J.: 133
Finley, Moses: 14, 32
Finocchiaro, M. A.: 232, 238, 246
Fisher, J.: 81, 110
Flammarion, C.: 228, 286
Fludd, R.: 262, 263, 264, 268
Fourcroy, A.: 276, 279, 280, 281, 284, 286, 287
Fraile, Guillermo: 16, 32
Frege, Gottlob: 335
Fritz K. v.: 44
Fulcanelli (seudónimo): 164

G

Gago Bohórquez, R.: 272, 274, 275, 276, 277,
278, 279, 280, 281, 282, 286, 287
Galilei, Galileo di Vicenzo Bonaiuti de véase:
Galilei, Galileo
Galilei, Galileo: 4, 31, 57, 134, 174, 205, 206,
216, 225, 226, 228, 229, 231, 237, 241, 246,
247, 259, 268, 338, 365
Galilei, Vincenzo: 229
Gangui, A.: 417
García Bacca, Juan David: 64, 68, 70, 72, 73, 79
García Belmar, A.: 286, 287
García Gual, Carlos: 58
García Hourcade, J. L.: 253, 256, 262, 265, 268
García Suárez, Alfonso: 58
García Yebra, Valentín: 58
Gassendi, Pierre: 263
Gauss, Carl Friedrich: 76, 77, 314, 318, 319,
320, 321, 323, 332, 336
Geach, P. T.: 58
Gearbart, C. A.: 228
Geber: véase Jabir Ibn Hayyan
Gerberto: 116
Gerson, Levi Ben: 76

Geymonat, L.: 228, 356
 Gilbert, William: 4, 10, 237, 244, 245, 246, 247, 259, 268
 Gilson, E.: 135
 Gingerich, O.: 246
 Giunta, Carmen: 285
 Glauber, Johann Rudolf: 161
 Gödel, Kurt: 333, 336
 Goldstein, B.: 83, 110
 González Redondo M.: 286
 Goodfield, J.: 21, 22, 31, 211, 223, 227, 228
 Gorgias: 15, 16, 34
 Grant, E.: 135, 246
 Grassi, Orazio: 232
 Gray, A.: 297, 302
 Gray, J.: 336
 Grecco, Hernán: 110
 Greenberg, M. J.: 336
 Gregory, Andrew: 19, 23, 32
 Grimaux, E.: 286
 Guerlac, H.: 287
 Guettard, Jean-Étienne: 270, 271
 Guillaumin, Godfrey: 10, 31, 57, 134, 174, 205, 229, 246, 259, 288, 338, 365
 Guillermo de Ockham: 126, 128, 129, 30
 Guth, Alan: 411, 417
 Guthrie, William K.: 58
 Gutiérrez Bueno, P.: 286, 287
 Guy, Alain: 58
 Guyton de Morveau, L. B.: 279, 280, 284,

H

Hacyan, S.: 417
 Hald, A.: 242, 247
 Hales, S.: 273, 274, 287
 Halley, Edmund: 265, 345
 Halma, Abbé: 84
 Halma, N.: 110
 Hamilton, N. T.: 110
 Hamilton, W.: 360
 Hammer, F.: 268
 Hankinson, R. J.: 247
 Hanson, Norwood Russell: 27, 32, 228
 Hare, R. M.: 16, 32
 Haroun-Al-Rachid: 153
 Harriot, Thomas: 231
 Hartner, W.: 82, 83, 110
 Hartshorne, R.: 336
 Haskins, C. H.: 135
 Hassenfratz, Jean Henri: 276, 281
 Hawking, S.: 356, 403, 417
 Heath, Thomas: 19, 27, 32, 64, 68, 70, 75, 79
 Hecateo: 54
 Heegaard, Paul: 83
 Heiberg, J. L.: 68, 79, 81, 82, 83, 84, 110
 Heiberg, Johan: 64
 Heidegger, Martín: 58

Heisenberg, Werner: 31, 32, 350, 351, 352, 357, 371, 372, 373, 374, 375, 377, 378, 379, 381, 382, 387
 Henderson, D.: 326, 336
 Henry, John: 247
 Heráclides del Ponto: 15, 27, 212, 219
 Heráclito: 14
 Hermes Trimegisto: 141, 144, 263
 Hermias de Atarnea: 33
 Hermócrates: 20
 Hermógenes: 14
 Hermótimo de Colofón: 65
 Hernandez Paricio, L. J.: 312, 336
 Hernias: 34
 Heródoto: 54
 Herpillis: 34
 Hesse, Mary: 247
 Heytesbury, W.: 129
 Hicetas: 212
 Hicks, R. D.: 13, 14, 15, 16, 22, 32
 Hilbert, David: 331, 334, 336, 375
 Hildegarda de Bingen: 115
 Hiparco de Nicea: 84, 91, 92, 104, 105, 266
 Hipatia: 135
 Hipócrates de Cos: 122
 Hipócrates de Quíos: 66
 Hipsicles de Alejandría: 67
 Hobbes, T.: 317
 Hofer, Ferdinand: 142, 166
 Hoff Kjeldsen, Tonne: 79
 Hoffman, R.: 287, 356
 Holmes, F.: 287
 Holmyard, Erick J.: 141, 161, 166
 Homero: 54, 63
 Hooke, Robert: 246, 265
 Hooker, J. D.: 297
 Hopkins, Arthur J.: 147, 166, 247
 Hormigón, M.: 336
 Hoyle, F.: 228, 414, 417, 418
 Hubble, Edwin: 402, 403, 415, 416
 Hume, D.: 317
 Huygens, Christiaan: 194, 241, 364

I

Ibn as Shair: 222
 Ibn Ruchd: véase Averroes
 Ibn Sina: véase Avicena
 Ihde, A. J.: 141, 143, 153, 163, 166, 273, 287
 Isaías: 226
 Isidoro de Mileto: 68
 Isidoro de Sevilla: 112, 115, 121

J

Jabir Ibn Hayyan: 153
 Jaeger, W.: 58
 Jammer, M.: 362, 369, 372, 380, 382, 387, 418
 Jantsch, Eric: 57

Jehová: 226
Jenócrates: 15, 33
Jenófanes: 34
Jiménez, Elvira: 58
Joan de Peratallada: véase Joannes de Rupescissa
Joannes de Rupescissa: 155
Johansen, Thomas K.: 19, 20, 21, 32
Johnson, Ben: 163
Josué: 226
Jussieu, B. de: 270
Justiniano I.: 15

K

Kaku, M.: 412, 418
Kant, Emmanuel: 77, 79, 317, 379
Kay, Charles D.
Kepler, J.: 4, 22, 31, 57, 91, 110, 174, 203, 206, 218, 227, 241, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268
Keynes, John M.: 163
Khayyám, Omar: 76, 313, 314
Kirk, C.: 22, 32
Kirwan, R.: 271, 272, 278, 287
Klamroth, Martin: 64
Klein, Félix: 323, 324, 325, 326, 332, 336
Kline, M.: 336
Klügel, Georg: 317
Knight, D. M.: 287
Knorr, Wilbur R.: 64, 79
Koestler, Arthur: 20, 30, 32, 211, 228
Kosso, P.: 418
Koyré, A.: 8, 110, 175, 228
Kuhn, T. S.: 8, 122, 123, 135, 203, 210, 211, 212, 213, 228, 250, 268, 363, 379, 387

L

La Croce, Ernesto: 58
La Métherie, J. C. (de): 281
Laercio, Diógenes: 13, 15, 22, 34, 58, 81
Lagrange, Joseph Louis: 284, 360
Lambert, Johann: 76, 313, 317, 324
Landy, S. D.: 418
Lao Tsé: 150
Laplace, P. S.: 276, 277, 278, 286, 290, 376, 388
Lavoisier, Antonie-Laurent: 5, 11, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288
Lavoisier, M.: 282, 285
Layzer, D.: 217, 228
Le Roy, Jean Baptiste: 275
Legendre, Adrien-Marie: 76
Lemery, Jean: 161
Leodamas de Tasos: 65
León: 65
León X: 170
Leucipo: 22, 365

Leveré, T. H.: 287
Levi, B.: 336
Libau: véase Libavius, Andreas
Libavius, Andreas: 160
Lindberg, David C.: 126, 135, 247
Linde, Andrei: 411, 418
Linneo, Carl von: 54, 271, 279
Lippershey, Hans: 231
Lisandro: 14
Lloyd, D. R.: 31, 32
Lobachevsky, Nikolai: 77, 318, 320, 312, 323, 324, 330, 332, 336
Locke, J.: 317
Lombardi, Olimpia: 110
Lorentz, Hendrik Antón: 325, 340, 363
Lorenzano, César: 110
Luis Felipe I de Orleáns: 270
Luis XV: 270
Luis XVI: 270, 271, 277, 283
Lulio, Raimundo: 155
Lull, Ramón: 155
Lutero, Martin: 250
Lynch, John P.: 58

M

Machamer, P.: 236, 247
Macquer, P. J.: 273, 275, 279, 280, 287
Mäestlin, Michael: 251, 258
Magnani, Esteban: 10, 332, 337, 357, 363, 403
Magullan: véase de Magalhaens, Joao Hyacintho
Malesherbes, G. C. (de): 278
Manitius, K.: 84, 110
Marcos, Alfredo: 59
María la Hebrea: 144, 145, 146, 147, 155
Marías, Julián: 58
Mazarin, Jules: 270
Melanchthon, P.: 250, 268
Meliso: 34
Melogno, Pablo: 10, 13, 32, 35, 37, 61, 63, 79, 82, 91, 121, 123, 139, 190, 212, 254, 310, 365
Mendell, Henry: 23
Menechmo: 65
Menge, Heinrich: 64, 68
Mersenne, Marin: 263
Méterie, J.C. (de la): véase La Métherie
Mielli, A.: 287
Miguel Angel: 172, 208
Miguel, Hernán: 10, 391
Miguez, José Antonio: 58
Minkowski, Hermann: 325
Moisés: 146
Moledo, Leonardo: 10, 11, 332, 337, 356, 357, 363, 403
Monge, Gaspard: 277, 278, 384
Morveau, M. M.: 279, 284, 286, 287
Mosterín, Jesús: 37, 59
Mourelatos, Alexander: 18, 19, 25, 32

Multhau, Robert P.: 137, 139, 143, 145, 156, 166

N

Nabonnassar: 104, 106, 109

Nasir al Din al Tusi: 76

Neoclides: 65

Neugebauer, O.: 81, 84, 89, 110

Newsome, Carrol: 71, 79

Newton, Isaac: 7, 10, 31, 47, 57, 77, 89, 163,

174, 203, 206, 227, 228, 230, 234, 246, 247,

265, 267, 268, 270, 332, 337, 338, 340, 342,

343, 344, 345, 346, 347, 360, 364, 373, 374

Newton, Robert: 110

Nicanor: 34

Nicetus de Siracusa: 219

Nicolás de Cusa: 212, 251

Nicolás de Oresme: 121, 129, 131, 132, 134, 212

Nicómaco: 33, 34

Nieto, A.: 180, 181, 200, 286

Nix, L.: 83

Nollet, Jean Antoine (abate): 270

Nuyens, P.: 59

Ñ

O

Ockham, Guillermo de: véase Guillermo de Ockham

Oerter, R.: 418

Okruhlik, Kathleen: 247

Olimpodoro: 145

Olof Bergman, Torbern: 279

Olszewicki, Nicolás: 11, 332, 337, 363, 403

O'Malley, C. D.: 246

Ordóñez, J.: 135, 265, 268

Oresme, Nicolas de: véase Nicolas de Oresme

Orsini, Alessandro (Cardenal): 232

Osiander, Andreas: 203, 210, 222, 227, 249, 250, 258

Ostanes: 144, 145

Ostrogradsky, Mijaíl Vasilievich: 321

P

Pagel, Walter: 158, 166

Pallí, Julio: 58

Pantin, I.: 228

Papp, D.: 179, 180, 199, 201, 224, 228

Pappus de Alejandría: 63, 64, 79

Paracelso: 157, 158, 159, 160, 161, 162, 166, 263, 288

Parménides de Elea: 14, 43

Partington, James R.: 143, 149, 152, 164, 166, 287

Pasch, Moritz: 331, 336

Paulze, Jacques: 271, 284

Paulze, M. A.: véase Lavoisier, M.

Pedersen, O.: 81, 82, 84, 110

Peebles, P. J. E.: 408, 410, 418

Pelagio: 145

Pellegrin, P.: 58

Pellón González, Inés: 11, 269

Penrose, R.: 413, 417, 418

Penzias, Arno: 407, 408, 415

Pera, M.: 247

Pérdicas: 61

Perdomo Reyes, Inmaculada: 11, 31, 57, 174,

218, 241, 249, 262, 268

Pereyra Moine, Ramiro: 110

Pérez Sedeño, E.: 83, 110, 247

Pérez Torres, María Luisa: 58

Pericles: 14, 16

Perictióna: 13

Perrin, C.: 288

Petreius, Johannes: 210

Peyrard, F.: 64

Pirenne, H.: 135

Pitágoras de Samos: 7, 22, 30, 65, 67, 75, 321

Pitia: 33

Platón: 3, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22

23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37,

38, 39, 43, 51, 57, 63, 65, 66, 67, 68, 72, 79, 91,

112, 123, 170, 190, 212, 227, 253, 254, 365,

381

Playfair, John: 76, 313, 314, 331, 336

Plinio el Viejo: 147

Plutarch: véase Plutarco

Plutarco: 15, 16, 23, 32, 63, 79, 81

Poincaré, Henri: 78, 79, 324, 325, 336

Poirier, J. P.: 273, 284, 288

Popper, Karl: 8, 22, 32, 388

Posidonio: 76, 144, 312, 313

Préaux, Claire: 61, 79

Price, James: 164

Priestley, Joseph: 271, 273, 275

Prigogine, Hililla: 57

Proclo de Licia: 15, 32, 63, 64, 65, 66, 67, 70,

71, 76, 79, 83, 310, 312, 313, 336

Proclus de Lycie: véase Proclo de Licia

Protágoras: 16, 17

Próxeno: 34

Pseudo-Geber: 153

Ptolemy, Claudius: véase Ptolomeo, Claudio

Ptolomeo I Soler.: 61, 62, 63, Euclides- Melogno

1, 2, 3, 4// Alquimia- Esteban 3, Ptolomeo II

Filadelfo, 62, Euclides- Melogno 2, 3

Ptolomeo, Claudio: 3, 10, 27, 31, 76, 81, 82, 83,

84, 85, 87, 90, 91, 92, 94, 95, 98, 100, 101, 102,

103, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 112, 122,

123, 139, 169, 203, 206, 207, 211, 212, 213,

214, 215, 217, 218, 222, 227, 229, 231, 233,

236, 241, 242, 243, 249, 250, 251, 264, 266,

313

Puertas Castaños, María Luisa: 68, 70, 79

Puerto, Javier: 162, 166, 271, 288
Pumfrey, Stephen: 247
Pythias: 34

Q

Quine, W. V. O.: 335, 336
Quintana G. H.: 418

R

Racionero, Quintín: 58
Rackham, H.: 31
Ramus, Petrus: 236
Raven, J.: 22, 32
Reale, Giovanni: 16, 32
Regiomontano, Johann Müller: 207
Reinchenbach, H.: 228
Rethicus: 209, 210, 211, 221, 268
Rey Pastor, J.: 336
Rey, Abel: 64, 65, 66, 70, 75, 79
Reymers, Nicolai: 258
Rhasos o Al-Razi: 153, 154
Ribnikov, K.: 336
Richter, Jeremias Benjamin: 285
Riemann, Bernhard: 76, 77, 324, 326, 327, 329, 332, 336
Rioja, A.: 135, 265, 268
Robert de Chester: 154
Rodolfo II: 162, 256, 260
Rodríguez, Pablo: 11, 77, 309, 336, 341, 359, 388
Ross, W. David: 16, 32, 247
Rostovtzeff, M.: 62, 79
Roswita (von Gandersheim): 115
Rouelle, Guillaume François: 270, 273
Ruiz, A.: 336
Rupert Hall, A.: 228
Russell, B.: 335

S

Saccheri, Girolamo: 76, 311, 313, 314, 315, 316, 317, 321, 323, 326, 328, 336
Sacrobosco, Juan: 207
Sage, Balthasar George: 280
Sagredo, Giovanni Francesco, alumno de Galileo: 233, 238, 240, 244
Salomón: 146, 226
Sambursky, S.: 135
San Agustín: véase Agustín de Hipona
San Alberto Magno: véase Alberto Magno
San Buenaventura: véase Buenaventura
Sanabria Hernandez, J.: 335
Sanchez, J.: 11, 127, 135
Sánchez Ron, J. M.: 349, 357
Santaló, L.: 336
Santana, Margarita: 11, 111, 152, 168, 174
Santo Tomás: véase Tomás de Aquino

San-Valero, Concha: 59
Sarpi, Paolo, alumno de Galileo: 244
Sarton, George: 8, 20, 30, 32, 63, 64, 68, 76, 79, 150, 166, 196, 197, 201, 228
Scheele, Carl Wilhelm: 275
Schöner, Johannes: 209
Schwartz, A.: 288
Segismundo I: 208
Séguin, Armand: 272
Sendivogius, Michael: 162
Serna, C.: 58
Silvio: véase Sylvius, Franciscus
Simon, A.: 288
Simplicio: 23, 32, 83, 91, 233, 236, 243
Simplicius: véase Simplicio
Simpson, G. C.: 59
Simson, Robert: 64, 68, 69, 70, 79
Siro: 82
Sklar, L.: 418
Smith, A. Mark: 247
Soboul, A.: 283, 288
Sócrates: 14, 16, 17, 34, 41, 63
Soler Grima, Francisco: 56
Solón: 13
Sonne-Hansen, Lise: 79
Sorabji, Richard: 247
Spinoza, Baruch de: 317
Stahl, Georg Ernst: 272, 274, 277, 279
Steinhardt, Paul: 411, 417
Stengers, Isabelle: 150, 166
Strawson, Peter: 78, 79
Swerdlow, N.: 81, 110
Swineshead, R.: 129
Sylvius, Franciscus: 161
Szabó, Árpád: 79

T

Tachenius, Otto: 161
Tales de Mileto: 21, 22, 65, 160, 236
Taliaferro, R.: 84, 105
Taton, René: 156, 166, 247
Teeteto de Atenas: 65, 67
Teniers, David (el joven): 162, 163
Teodoro de Cirene: 15, 65
Teodosio: 114
Teófilo: 154
Teofrasto: 33, 34, 63
Teón de Alejandría: 64, 68
Teosobia: 144
Terámenes: 14
Terra, Andrés: 360
Teudios de Magnesia: 65, 66
Thales de Mileto: véase Tales de Mileto
Theón: 82
Theón de Alejandría: 82
Tholde, Johann: 162
Thöldius: véase Tholde, Johann
Thomas, Ivor: 79

Thomas, W.: 371, 388
Thompson, Benjamín (Conde de Rumford): 284
Thoren, V. E.: 223, 228
Tiamina, Daina: 326
Timeo de Locro: 15
Tomas de Aquino: 120, 126, 154, 155, 166, 246
Toomer, G. J.: 81, 84, 110, 247
Torreti, R.: 336
Toulmin, Stephen: 21, 22, 31, 32, 211, 223, 227, 228
Trasíbulo: 14
Trótula de Salerno: 115
Trudaine de Montigny, Jean Charles
Philibert: 273
Tschirnhausen: véase von Tschirnhaus, Ehrenfried Walther
Tucídides: 14, 32
Turner, E. L.: 356, 405, 418

U

Ursus, Nicolaus Raimarus: 258

V

Valdés Villanueva, Luis M.: 58
Valentín, Basilio: 161
Van Der Waerden, B. L.: 27, 32, 371, 372, 373, 388
Van Helmont, Jean Baptiste: 160, 161
Vega, L.: 135
Vegetti, Mario: 55, 59
Velarde Lombraña, Julian: 58
Venel, Gabriel-François: 272
Verne, Julio: 267
Vernet, J.: 207, 228
Vickers, B.: 268
Villedeuil, P. L. de: 278
Vitale, Giordano: 76
Vitellio: 260
Voelkel, J. R.: 267, 268
Von Hohenheim, Philippus Aureolus Theophrastus Bombast: véase Paracelso
Von Liebig, Justus: 137, 166
Von Peuerbach, Georg: 207, 215
Von Tschirnhaus, Ehrenfried Walther: 164
Vorontsov-Vel'yaminov, B.: 418

W

Waldo Dunnington, G.: 319, 336
Wallace, A. R.: 289, 296, 297, 298
Wallace, W.: 247
Wallis, John: 76, 313, 314
Wapowski, Bernard: 209
Wätzenrode, Lucas: 207
Weigel, Erhard: 263
Weinberg, S.: 408, 418
Wentzel, K. F.: 376
Wenzel, Karl Friedrich: 285

Westman, R. S.: 250, 263, 268
Whitehead, Alfred N.: 335
Whittaker, John: 29
Wickramasinghe, N. C.: 414, 418
Wilson, C.: 247
Wilson, Robert: 407, 408, 415,
Wojtkowiak, B.: 160, 166
Wolf, F. A.: 412, 418

X

Xeber: véase Jabir Ibn Hayyan

Y

Yañez, M.: 207, 228

Z

Zenódoto de Efeso: 63
Zenón de Elea: 43
Zeyl, Donald: 29, 32
Zoroastro: 140, 144
Zósimo de Panópolis: 144, 145, 148, 149, 150, 165
Zupko, J.: 205, 228
Zurek, H.: 376, 377, 378, 389.

Esta publicación cuenta con el apoyo de la Comisión Sectorial de Enseñanza (CSE) de la Universidad de la República (Udelar). Forma parte de la serie «Manuales de aprendizaje» de la CSE, que tiene como objetivo mejorar las condiciones de aprendizaje de los estudiantes y, al mismo tiempo, propiciar la autoformación docente mediante la reflexión sobre sus prácticas y sobre el estado del arte en su disciplina. Secundariamente, esta publicación pretende colaborar en la constitución de tradiciones disciplinares y culturas educativas nacionales.

ISBN: 978-9974-0-0760-4



9 789974 007604