

EL PAPEL DEL RAZONAMIENTO ANALÓGICO EN LA CONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LA NOCIÓN DE FUERZA GRAVITATORIA Y DEL MODELO DEL SISTEMA SOLAR (PRIMERA PARTE)

José María Oliva Martínez.
Centro de Profesorado de Cádiz.
E-mail: jmoliva@cepcadiz.com

RESUMEN

En este artículo, junto a otro que tenemos en preparación, se revisa la importancia del pensamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo del Sistema Solar. Concretamente, en este primer artículo se empiezan analizando las ideas surgidas al respecto desde las civilizaciones más antiguas, incluida la griega, hasta las aportaciones de figuras como Copérnico, Kepler o el propio Galileo, en los albores de la revolución copernicana. En el otro, pendiente de publicar en un próximo número, se discuten algunos de los razonamientos analógicos formulados con posterioridad a partir de la segunda mitad del siglo XVII y que culminaría con la síntesis newtoniana.

Palabras claves: *analogías, fuerza gravitatoria, historia de la ciencia, razonamiento analógico, sistema solar.*

INTRODUCCIÓN

Hablar de analogías supone hablar de comparaciones entre situaciones o fenómenos que consideramos similares entre sí. Solemos acudir a ellas en distintas facetas de nuestra vida cuando queremos comunicar ideas, explicar cosas o resolver problemas, y carecemos de conocimientos sobre un tema, lo que nos lleva a adoptar como referente otro mejor conocido y que nos parece semejante al menos en la faceta que se pretende expresar. El dominio menos conocido y que se quiere entender se denomina *objeto*, *problema* o *blanco*, mientras el que sirve de referencia para exportar su comprensión se denomina *ancla*, *fuentes* o *análogo*.

Sin duda, las analogías constituyen un instrumento importante en el razonamiento ordinario. Multitud expresiones del lenguaje, de refranes e, incluso, de anuncios publicitarios hacen uso de ellas porque conectan fácilmente con el saber popular y la forma de conocer de las personas. Su papel en la construcción de conocimientos en los individuos ha sido ampliamente fundamentado desde un punto de vista neurológico (Lawson y Lawson, 1993), psicológico (Gentner, 1983; Goswami, 1992), y también desde la didáctica de las ciencias (Duit, 1991; Dagher, 1995).

Sin embargo, desde el punto de vista epistemológico este tema ha sido menos tratado. Aunque está viva la intuición de que el razonamiento analógico juega un papel importante en la producción de conocimientos y en la creatividad de los científicos (Nersessian, 1992; Oliva et al., 1997; Oliva y Acevedo, 2004), y de hecho existen algunos indicios razonables que apoyan tal intuición, son escasos los estudios que analizan de forma monográfica dicho papel en la construcción histórica de determinados dominios de conocimientos.

En un trabajo publicado hace más de tres décadas, Dreistadt (1968) abordaba el papel central de las analogías en trabajos de científicos como Einstein, Kekulé, Darwin, Böhr o Mendeleiev. En consonancia con esta opinión, Khun (1975) apuntaba unos años más tarde la semejanza o analogía entre dos o más problemas distintos, como uno de los factores que puede servir para solucionar nuevos interrogantes y enigmas. Para defender tal opinión dicho autor destaca que los científicos suelen resolver muchos problemas moldeándolos sobre soluciones-enigmas previos, a veces con un mínimo de recursos para las generalizaciones simbólicas. Por la misma época, Gee (1978) destacaba la importancia del razonamiento analógico en el desarrollo de las ideas de Maxwell sobre la naturaleza del campo electromagnético.

Desde una óptica más cercana a planteamientos educativos, Muscari (1988) ha analizado el papel de las metáforas¹ en las ciencias y en la enseñanza de las ciencias. Este autor señala que desde la visión de Isaac Newton del Sistema Solar como proyectiles terrestres hasta la metáfora del reloj de Boyle, la Historia de la Ciencia está repleta de casos a través de los cuales se han reformulado conceptos problemáticos a través de metáforas.

Más recientemente, Gentner et al. (1997) han mostrado la influencia del razonamiento analógico en algunas de las producciones de Kepler, aportación ésta que retomaremos en el presente trabajo al constituir una pieza central del hilo de nuestro discurso, como veremos más adelante. En una línea semejante, Nersessian (2002) ha analizado el papel del razonamiento analógico en la obra de Faraday, mostrando las aportaciones de este tipo de razonamiento en la elaboración de un modelo científico. Finalmente, por nuestra parte, en un estudio anterior hemos descrito dos casos históricos sobre la influencia del razonamiento analógico en la construcción del conocimiento científico. En ambos se toma como referencia el movimiento de proyectiles; en el primer caso como objeto de la analogía que conduciría a la identificación de la parábola como forma de la trayectoria de los proyectiles y, en el segundo, como fuente de la transposición analógica, que finalmente serviría a Newton para ilustrar su teoría de la Gravitación Universal (Oliva y Acevedo, 2004).

En este trabajo se analiza papel del razonamiento analógico en la construcción histórica de nociones relativas al concepto de fuerza gravitatoria y al modelo de Sistema Solar, durante el periodo comprendido desde de las antiguas civilizaciones, incluida la griega, hasta llegar a las aportaciones de personajes como Copérnico, Kepler o el propio Galileo, en los albores de la revolución científica copernicana. En una segunda parte, actualmente en fase de elaboración, se continúa con algunos de los razonamientos analógicos proporcionados desde la vertiente mecanicista liderada por Descartes hasta llegar a Newton, completando así la visión sobre el papel que jugó

el pensamiento analógico en el devenir histórico de lo que se ha dado en llamar la síntesis newtoniana.

Al hablar de razonamiento analógico, no solo nos referimos a comparaciones en un sentido figurado entre conceptos o fenómenos distintos que responden a leyes o principios diferentes. Por el contrario, también incluimos aquellas otras en las que se comparte un mismo modelo o ley física -y del que, por tanto, los estamentos de la comparación no constituyen más que casos particulares- siempre y cuando la comparación se lleve a cabo en un sentido inductivo, como forma de encontrar regularidades en la naturaleza para después generalizar.

A primera vista, podría esperarse una escasa contribución del razonamiento analógico en el desarrollo de los fenómenos de mecánica, dado que son éstos, precisamente, aquéllos con los que más estamos familiarizados y para los que, por tanto, parecería menos necesario recurrir a cualquier apoyo externo para su comprensión. Sin embargo, como tendremos la oportunidad de ver, el desarrollo de la mecánica, y muy particularmente el estudio de la noción de fuerza gravitatoria, está repleto de casos en los que el razonamiento analógico ha jugado un papel fundamental en la creatividad de los científicos y en la producción de nuevas ideas.

EL ANIMISMO Y ANTROPOCENTRISMO COMO PRIMEROS ESTADIOS DEL PENSAMIENTO ANALÓGICO

Los primeros argumentos de corte analógico podemos encontrarlos en las explicaciones cosmológicas de las civilizaciones más arcaicas. Como sabemos, la concepción del mundo que tenían cosmologías como la hindú o la egipcia, descansaban con frecuencia en metáforas y símiles de carácter antropomórfico y estaban repletas de alusiones alegóricas a dioses, hombres y animales (figura 1). Las propias constelaciones estelares se definieron a partir de formas humanas, animales u objetos y utensilios familiares.



Figura 1.- Motivo egipcio para representar la creación; que incluye a Geb, el dios de la Tierra, a Shu, el dios de la luz y el aire, y Nut, la diosa del cielo.

Más adelante, en la antigua Grecia, la cosmología inicia un largo camino de cambio en el que se desprende de los antiguos mitos para dar paso a una nueva imagen del universo, esta vez basada en la existencia de unas leyes que lo rigen y no tanto en un continuo

proceso de intervención divina. Es éste el período en que desaparecen las divinidades de las explicaciones naturales, si bien todavía es frecuente que se proyecten sobre las explicaciones del cosmos elementos y eventos presentes en el mundo terrestre, como lo es el caso del fuego central de algunos seguidores de Pitágoras, o las esferas cristalinas de Eudoxo, Platón o Aristóteles como soporte necesario para el movimiento de los astros.

Con Copérnico y Kepler llega una nueva era en la visión del universo que desplaza su centro de la Tierra al Sol, rompiendo así con el geocentrismo y geoestacismo de siglos. A pesar de este cambio de rumbo, las ideas platónicas están todavía latentes en estos autores (Khun, 1985). Así, por ejemplo, ya en siglo XVI Nicolás Copérnico llega a utilizar una comparación mística entre el sistema solar y la Trinidad, en la que se sostenía que el universo era en su conjunto la imagen y analogía de la Trinidad. El Padre era el centro (el Sol), el Hijo las esferas en torno, mientras el Espíritu era el complejo de relaciones dentro del universo (Khun, 1985). En realidad la analogía entre Dios y el Sol no era suya sino que provenía del culto neoplatónico al Sol. Como señala Ferris (1990), la idea en sí misma era muy popular en su época, y de hecho no podemos olvidar que Cristo fue modelado por los pintores del Renacimiento sobre bustos de Apolo, el dios solar.

En una línea parecida su discípulo, Rhético, comparaba el modelo de Copérnico con un mecanismo perfecto de relojería en el que Dios jugaría el papel de un relojero:

"Puesto que vemos que este único movimiento satisface un número casi infinito de apariencias, ¿no habríamos de atribuir a Dios, Creador de la naturaleza, esa destreza que observamos en los relojeros normales? En efecto, éstos evitan cuidadosamente insertar en el mecanismo cualquier rueda superflua o cualquiera cuya función se pueda realizar mejor con otra mediante un ligero cambio de posición".

(citado por Mason, 1990; p.11).

En esta fase del pensamiento científico también se destaca el uso de analogías y metáforas como instrumento retórico y alegórico. Así, en sintonía con esa visión mística del mundo, Copérnico utiliza la retórica en *De revolutionibus* para exponer en tono metafórico cuál es la importancia que otorga al Sol en el universo:

"En este bellissimo templo, ¿quién pondría esta lámpara en una posición diferente no mejor que aquella desde la cual puede iluminar todas las cosas al mismo tiempo? Pues no sin razón llaman algunos al Sol el faro del universo, otros su mente y otros su gobernante".

(citado por Ferris, 1990, p. 53).

Recurrió también a la metáfora del Sol como "trono central", con objeto de ilustrar el poder y el dominio que ostentaba sobre los planetas, los cuales a su vez, según él, se comportarían como sus hijos girando en torno a él (Khun, 1985). Además, recurrió a la metáfora de la danza para explicar el comportamiento de los planetas en su recorrido orbital. En efecto, bastante antes de publicar su obra, Copérnico hizo circular privadamente un esbozo escrito a mano de su teoría heliocéntrica, que se titulaba el *ballet de los planetas*, ilustrando de una bella forma el comportamiento de los distintos planetas, incluida la Tierra, en su movimiento alrededor del Sol.

Por su parte, Johannes Kepler, con mayor convicción aún que el propio Copérnico, creía todavía un siglo más tarde en la directriz divina del universo a través de una especie de orden geométrico que mediaba entre Dios y el mundo, y que se plasmaba, por ejemplo, en las relaciones matemáticas que regían el tamaño de las órbitas de los distintos planetas (Holton y Brush, 1988). Cohen (1989) no duda en catalogar esta circunstancia como una de las grandes dificultades planteadas por la astronomía kepleriana en la que se entremezclaban principios físicos mecánicos y animistas. En efecto, como bien apunta dicho autor, no se trataba de una dinámica pura de las fuerzas físicas y los movimientos originados por ellas. Por ejemplo, atribuía el movimiento orbital de los planetas a una acción que el Sol ejercía sobre ellos, pero sin embargo la rotación de ellos y del mismo Sol se asociaba con un principio animista o espiritual.

Así, en su primera publicación importante –más concretamente, en su *Mysterium cosmographicum*– encontramos el intento de relacionar las órbitas planetarias con los cinco sólidos regulares de la geometría. Kepler sostenía que el número de planetas y las dimensiones de sus órbitas podían entenderse en términos de la relación entre las esferas planetarias y los cinco sólidos regulares. En efecto, Kepler concebía un modelo anidado en el que los sólidos y esferas se iban alternando y encajando unos dentro de otros (Khun, 1985; Holton y Brush, 1988).

Más adelante en *Harmonices Mundi* (1619), el mismo libro en el que publicó su tercera ley de las órbitas, Kepler utilizaba una metáfora para hablar del movimiento de los planetas en términos de una sinfonía musical. A través de las regularidades detectadas en su tercera ley, creyó ver una analogía entre las velocidades orbitales máximas y mínimas de los planetas y los intervalos consonantes de la escala musical (Khun, 1985). Según esta analogía neoplatónica los tonos correspondientes a la Tierra eran las notas fa y mi. De hecho, a la tercera ley se le conoce también bajo el nombre de la *ley armónica*. En realidad la idea de asemejar la música y la astronomía no era nueva sino que ya estaba presente en Platón.

Incluso, los seguidores de Pitágoras establecieron una regla general para explicar el tamaño de las órbitas de los diferentes planetas. Según esta regla, los tamaños relativos de las diferentes órbitas eran proporcionales a las longitudes de las cuerdas sucesivas de un instrumento musical armónicamente afinado (Holton y Brush, 1988).

A pesar de lo disparatado que puedan parecernos hoy estas hipótesis, debemos valorar en ellas la aparición de los primeros síntomas que anunciarían una nueva manera de entender los fenómenos de la Ciencia basada en la creencia de la simplicidad y uniformidad de la Ciencia y en la posibilidad de su traducción en números (Holton y Brush, 1988).

El misticismo que llenaba muchas de las ideas de Kepler, le valió no obstante numerosas críticas por parte de un contemporáneo suyo, que fue Galileo Galilei. Así, por ejemplo, Kepler sostenía ya en su época que el fenómeno de las mareas se debía a un efecto de atracción de la Luna. Galileo criticó esta idea por considerar que ese efecto de atracción descansaba sobre una propiedad oculta más que sobre una realidad física. Resulta paradójica esta circunstancia teniendo en cuenta que Galileo todavía creía en la suposición aristotélica de que la conducta de los objetos era el

resultado de una especie de tendencia o deseo natural, pensamiento que recuerda mucho a las tesis antropocéntricas y animistas. Así, pues, tampoco Galileo, aunque presumiera de lo contrario, llegó a superar del todo las creencias de tipo metafísico sobre las leyes de la naturaleza. De ello dan testimonio algunos fragmentos de sus Cartas Copernicanas, concretamente la escrita a la Gran Duquesa de Toscana en 1615 (Galilei, 1890), en los que aunque sólo sea de un modo metafórico y figurado, utiliza el lenguaje alegórico para describir la importancia del Sol:

"...no creo que se filosofara mal si se dijera que él es el principal ministro de la naturaleza y, en cierto modo, el alma y corazón del mundo; que aporta a los cuerpos que lo rodean, no solamente la luz, sino también el movimiento, y esto último, por su revolución sobre sí mismo; por ello, así como, si se detienen los movimientos del corazón de un animal, todos los otros movimientos también cesarán, si la rotación del Sol sobre sí mismo se detuviera, inmediatamente cesarían todos los movimientos de los otros planetas".

(Galilei, 1890. Tomado de la traducción española, 1986, p. 66).

A principios del siglo XVII todavía era frecuente el uso de argumentos metafísicos para defender ciertas ideas científicas establecidas. Por ejemplo, los filósofos tradicionales sostenían la existencia de sólo siete cuerpos celestes, sin contar las estrellas, por lo que el descubrimiento de alguno más rompía con sus creencias metafísicas. El propio astrónomo florentino Francesco Sizzi afirmaba en 1611 que no podían existir satélites alrededor de Júpiter por las siguientes razones:

"Hay siete ventanas en la cabeza: dos fosas nasales, dos ojos, dos oídos y una boca; así, en los cielos existen dos estrellas favorables, dos no propicias, dos luminarias y, Mercurio, solo, indeciso, indiferente. De éste y muchos otros simples fenómenos de la Naturaleza, tales como los siete metales, etc., que sería tedioso enumerar, llegamos a la conclusión de que el número de planetas es necesariamente, siete".

(citado por Holton y Brush, 1988, p. 75).

Poco a poco la ciencia fue abandonando el misticismo y el antropocentrismo en las tesis argumentales, si bien el cambio no fue definitivo y todavía en científicos posteriores se encuentran alusiones a razonamientos de esta índole. Un buen ejemplo que ilustra este proceso de evolución lo encontramos en el pensamiento de Kepler. En su *Mysterium Cosmographicum* (1605) puede leerse los siguientes fragmentos:

"En una ocasión yo creí firmemente que la fuerza motriz de un planeta residía en un alma [...] Sin embargo, cuando reflexioné que esta causa de movimiento disminuye en proporción a la distancia a este astro, llegué a la conclusión de que esta fuerza debe ser sustancial; no en el sentido literal, sino [...] de la misma manera que decimos que la luz es algo sustancial significando que es un ente no sustancial que emana de un cuerpo sustancial".

(citado por Holton y Brush, 1988; p. 67-68).

"Mi objetivo es demostrar que la máquina celeste no es una especie de ser vivo divino, sino una especie de mecanismo de relojería (y quien crea que un reloj tiene alma, atribuye al trabajo la gloria del constructor), por cuanto casi todos sus múltiples movimientos los origina una fuerza material y magnética muy sencilla, al igual que todos los movimientos del reloj los origina un simple peso".

(citado por Holton y Brush, 1988; p. 68).

En el primer caso, como vemos, Kepler compara la gravedad con la luz, resaltando el carácter físico y no espiritual de la gravedad, y alejándose de las tesis neoplatónicas. En el segundo caso, Kepler alude a dos analogías consecutivas, una de ellas referida a la asociación entre gravedad y magnetismo, que discutiremos más adelante, y otra que alude al reloj como análogo con funcionamiento autónomo debido a leyes puramente físicas, adelantándose así a las tesis mecanicistas que se desarrollarían más tarde.

Sin duda, los primeros esfuerzos por esclarecer el concepto de gravedad desde el punto de vista físico, jugaron un papel esencial en este proceso.

PENSAMIENTO ANALÓGICO Y PRIMERAS CONCEPTUALIZACIONES DE LA IDEA DE GRAVEDAD

La concepción aristotélica de la gravedad daba lugar a dificultades en la teoría copernicana, ya que al perder ésta su posición central en el universo su centro perdía también la singularidad que se le había asignado como lugar natural al que tenderían los cuerpos (Mason, 1990). Por esta razón Copérnico supuso que todos los cuerpos celestes, y no sólo la Tierra, tenían poder gravitatorio, de manera que una piedra que se colocara cercana al Sol, a la Luna o a otros planetas, caería hacia ellos al igual que lo hace sobre la Tierra (Mason, 1990). Copérnico concebía la gravedad como la tendencia de los agregados de la materia a congregarse en la forma de una esfera, independientemente del lugar del universo en el que se encontraban, y situaba en el centro geométrico de ese agregado el foco de la gravedad.

"Creo que la gravedad no es más que una apetencia natural conferida a las partes [...] a fin de que puedan establecer su unidad e integridad combinándose en la forma de una esfera".

(citado por Mason, 1990; p. 12).

No obstante, para Copérnico el movimiento de los astros no necesitaba ninguna causa, al tratarse para él de movimientos naturales y, por ello, nunca llegó a tener la necesidad de concebir que los astros se afectaran unos a otros por medio de este mecanismo (Hull, 1981, Mason, 1990).

Hasta entonces, los aristotélicos nunca habían concebido la gravitación como una acción ejercida a distancia porque creían que un cuerpo no puede ejercer ninguna influencia sobre otro si no es por contacto con él. Por ello, en vez de un efecto atractivo, prefirieron explicar la gravedad como un deseo que los empuja hacia su lugar natural. La explicación de Copérnico discurría con argumentos parecidos pero con una vital diferencia, y es que para él no habría un solo centro sino que el fenómeno de atracción sería universal e innato a toda la materia.

Uno de los argumentos usados por los más conservadores a la hora de combatir la tesis heliocentrista de Copérnico se basaba en la visión aristotélica del movimiento. Según dicha visión, el estado natural de los cuerpos era el reposo, con lo cual, si tal movimiento realmente se produjese, se decía, entonces las cosas perpendicularmente proyectadas hacia arriba no caerían sobre la misma línea sino que su caída se vería rezagada hacia el oeste. Pero para Copérnico el movimiento de la Tierra y el de todos

los astros era un movimiento natural y los objetos que viajan sobre su superficie siguen ese mismo movimiento por propia naturaleza de un modo no forzado. De esta manera, los cuerpos que se encuentran en la Tierra pertenecerían algo así como a una misma comunidad. Esa sería para él la razón de que los cuerpos acompañasen espontáneamente a la Tierra en su movimiento y no se viesen rezagados.

Más adelante, el descubrimiento de los cuerpos magnéticos, que se atraen y se repelen sin necesidad de entrar en contacto, sirvió como analogía en la que basarse para ofrecer un panorama diferente que iría preparando el terreno para una concepción de la gravedad como acción a distancia (Hull, 1981).

En 1600, el estudioso William Gilbert publicó su *De magnete* en la que asociaba la acción gravitatoria con el magnetismo. En efecto, Gilbert, conocedor de los trabajos artesanales con brújulas e imanes de autores como Norman o Maricourt, desarrolló un considerable cuerpo teórico sobre magnetismo y llegó a pensar que la Tierra era un imán gigante construido totalmente a base de piedra imán con tan sólo una cubierta superficial de agua, rocas y tierra. Justificaba el giro de la Tierra alrededor de su eje, basándose en la teoría de Maricourt, según la cual las esferas de piedra imán tenderían a rotar espontáneamente por su propia naturaleza.

Dado que las piedras imantadas ejercían una considerable fuerza sobre los objetos de hierro a cierta distancia, ello sugería que la gravedad sería la fuerza magnética ejercida por el imán Tierra sobre los objetos próximos a ella y sobre los astros del Sistema Solar. Es decir, para Gilbert el magnetismo terrestre alcanzaba hasta los cielos, y lo mismo podría decirse del magnetismo que ejerce el resto de los astros. La Tierra sería un imán, el Sol sería otro imán, y lo mismo podría decirse de todos los demás astros (Bernal, 1975). Gilbert llamó *orbis virtutis* a la esfera de influencia que ejercían los astros alrededor, noción que parece ser que constituye un precedente clave en la noción de campo (Harré, 1986).

De ahí que el mundo se mantuviese cohesionado, explicando así la gravedad terrestre, y el porqué los astros que componen el Sistema Solar permanecen unidos (Mason, 1990) a través de una especie de mecanismo magnético en el que todo se mantendría unido por medio de fuerzas magnéticas. Gilbert creía también que las fuerzas magnéticas eran las responsables del movimiento de los planetas (Bernal, 1975), creencia que para Bacon era exagerada ya que no todo en el universo tendría porqué depender de esa propiedad (Bernal, 1975). Pero, a pesar de ser uno de los principales difusores del copernicanismo en Inglaterra (Solís, 1991), Gilbert no se interesó en sus estudios por la traslación terrestre ya que para él no sería un asunto que tuviese que ver en este caso con el magnetismo (Cohen, 1989).

Johannes Kepler, sin embargo, llevando estas ideas más lejos, aportó una nueva visión de la astronomía. Hasta entonces, los fines de los astrónomos habían sido puramente cinemáticos y sólo intentaban construir un orden geométrico para la esfera celeste. Pero Kepler se preocupó además por determinar las causas físicas de los movimientos y, por ello, en cierto modo, puede hoy ser considerado como uno de los precursores de la dinámica (Cohen, 1989). Kepler tenía un concepto esencialmente inerte de los planetas (Cohen, 1989), pero su concepción de la inercia era diferente a la actual. Fiel a la asociación fuerza-movimiento de la tradición aristotélica, suponía

que los planetas tenían algo así como una especie de *pereza* al movimiento por lo cual haría falta que una fuerza constante los empujara en una dirección tangencial (Hull, 1981). Creía que el movimiento de todos los planetas estaba regido por el Sol y, conocedor de los trabajos de Gilbert, llegó a la conclusión de que esta fuerza debía ser magnética (Cohen, 1989).

Kepler suponía que el Sol, de modo análogo a cómo irradia rayos de luz al espacio (Genter et al, 1997), también emite una especie de efluvios o hilos magnéticos a los que denominó *anima motrix* (alma motriz). Y suponía que estos efluvios rotaban como los radios de una rueda con el giro del Sol, empujando a los planetas en dirección tangencial a su trayectoria (Mason, 1990) a través de un efecto que denominaba *vís motrix* (fuerza motriz) (Gentner et al., 1997). Esta conjetura de líneas de fuerza que giran por la rotación del Sol fue incluso confirmada por Galileo algo más tarde (Solís, 1991). Según Kepler los planetas recibían un empuje tangencial que era proporcional a la densidad de rayos. Como tal densidad, dicho empuje disminuiría linealmente con la distancia, y lo mismo podría decirse para la velocidad de los planetas (Solís, 1991) (figura 2).

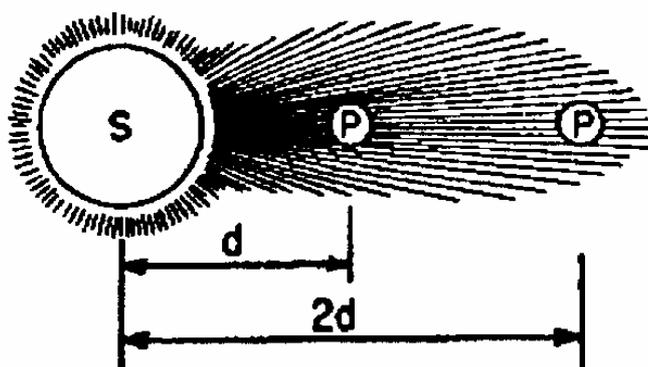


Figura 2.- Al igual que ocurre con los rayos de luz, la densidad de efluvios que emana el *anima motrix* postulado por Kepler decrecería con la distancia.

Así, pues, para él los planetas más lejanos se moverían más lentamente que los cercanos al Sol, porque los radios se irían separando en relación inversa con la distancia. En consecuencia, Kepler creía que la acción del Sol sobre los planetas era inversamente proporcional al radio de las órbitas. En un sentido estricto, y hablando en términos geométricos, la cantidad de principios motrices que podría encontrar un planeta en el espacio debería ser proporcional al inverso del cuadrado de la distancia al Sol, como ocurre con la intensidad de luz que sale de un foco y se distribuye alumbrando una superficie perpendicular a la dirección de propagación. Pero Kepler supuso erróneamente una proporcionalidad inversa de tipo simple imaginando un mecanismo de ahorro que haría que el Sol radiara su *ánima motrix* solamente en el plano de la eclíptica y no en el resto de las direcciones (Casadella y Bibiloni, 1985).

Para reafirmar este tipo de dependencia inversa entre la fuerza motriz y distancia al Sol, Kepler buscó una analogía entre la gravedad y la luz, la cual aparece recogida en su *Mysterium Cosmographicum* (citado por Holton y Brush, 1988). Aunque esta

dependencia inversa entre velocidad y distancia, que se apoyaba en la mera intuición, no es del todo correcta, sí puede considerarse una primera aproximación de lo que después sería la ley de las áreas. Kepler creyó toda su vida en la equivalencia de ambas usando una u otra indistintamente dado que las predicciones que ambas estiman son muy parecidas (Khun, 1985).

Para explicar la forma elíptica de las órbitas recurrió a un curioso mecanismo basado igualmente en el magnetismo (Mason, 1990). Suponía que la envoltura externa del Sol constituía en su globalidad uno de los polos del imán, mientras los planetas alineaban sus polos norte y sur de acuerdo perpendicularmente a su eje de rotación. Los ejes de los planetas mantenían una orientación fija e independiente de su movimiento orbital, de forma que el planeta se vería alternativamente atraído y repelido por el Sol en función de cuál es el polo que apunta hacia él, distorsionándose así la circularidad de la órbita adaptándose a una elipse (figura 3).

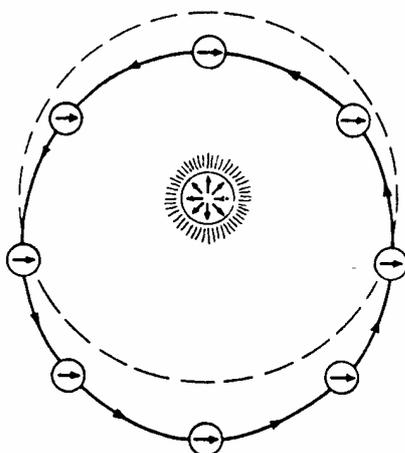


Figura 3.- Explicación de Kepler de la forma elíptica de la órbita de los planetas como deformación del "ideal" de circularidad.

Resulta curioso reseñar el hecho de que Kepler no llegara nunca a dar la misma explicación al movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol y al movimiento de la Luna alrededor de la Tierra. Mientras en el primer caso siguió las tesis comentadas en el apartado anterior, en el segundo siguió un esquema más cercano al desarrollo que sufriría la mecánica un siglo después y que culminaría con la ley de Gravitación Universal. En efecto, según indica Crombie (1996), Kepler llegó a considerar que la Luna era mantenida en su órbita por dos fuerzas, una originada por el *anima motrix* que la impulsaba lateralmente y otra de atracción mutua con la Tierra y que asimilaba con la fuerza gravitatoria (*virtus tractoria*). Kepler concibió esta fuerza central mutua entre la Tierra y la Luna en un intento de dar alguna explicación al fenómeno de las mareas. Aunque Kepler no llegó a asimilar enteramente esta fuerza con el magnetismo, sí consideró ambos fenómenos análogos como se desprende del siguiente pasaje extraído de su *Astronomía Nova* (1609):

"Si dos piedras fueran colocadas cerca una de otra en cualquier lugar del universo fuera de la esfera de fuerza de un tercer cuerpo [...] se comportarían como dos cuerpos magnéticos y se reunirían en un punto intermedio, recorriendo cada uno de ellas una distancia hacia la otra en la misma proporción en que la masa de esta otra se encuentra respecto a la suya propia".

(citado por Crombie, 1996, p. 174)

Más adelante, en la misma obra, Kepler da un salto importante al describir como sistemas análogos a las dos piedras y el sistema Tierra-Luna:

"Si la Tierra y la Luna no fueran mantenidas, cada una en su órbita, por sus fuerzas animales y otras equivalentes, la Tierra ascendería hacia la Luna una cincuenta y cuatroava parte de la distancia entre ellas, y la Luna descendería hacia la Tierra unas cincuenta y tres partes ...".

(citado por Crombie, 1996, p. 174).

Kepler desarrolló su teoría de la gravitación solamente aplicándola a la Tierra y a la Luna. Nunca pensó que el Sol y los planetas se atrajesen recíprocamente de forma análoga a cómo lo hacían la Tierra y la Luna. En este sentido, podría decirse que para él el fenómeno de la gravedad era considerado un fenómeno sublunar y no de carácter universal.

Finalmente, una figura importante en ese proceso de unificación fue Galileo quien, como sabemos, fue uno de los más fieles defensores de las tesis heliocéntricas de su época. Galileo se sirvió también de argumentos basados en razonamientos analógicos para defender estas ideas. Galileo consideraba análogos el comportamiento respecto de la Tierra de un cuerpo o proyectil en caída libre, y el movimiento de un objeto que se deja caer desde el mástil de un barco (Solís, 1991; Oliva y Acevedo, 2004). Así mismo observó un paralelismo entre el movimiento de un péndulo y el de una bola que cae por un plano inclinado (Khun, 1975), encontrando que una bola que rueda por un plano inclinado adquiere suficiente velocidad para subir a la misma altura vertical por otro plano inclinado de cualquier pendiente, de forma similar a cómo la masa puntual de un péndulo sube y baja alcanzando la misma altura.

A MODO DE SÍNTESIS

Como se desprende de lo dicho a lo largo de las líneas anteriores, el razonamiento analógico ha jugado un papel central a lo largo de la historia en las ideas acerca del fenómeno gravitatorio y de la estructura del Universo y del Sistema Solar. Cada vez que el pensador o el científico se ha visto en la necesidad de explicar nuevos hechos y fenómenos en situaciones o campos desconocidos para él, la historia muestra la tendencia constante a recurrir a argumentos de este tipo en los que se traza un puente entre lo nuevo y lo ya conocido.

Como ha podido verse, las primeras muestras de pensamiento analógico en la explicación del cosmos toman como referente objetos y situaciones del mundo terrestre –constelaciones como objetos o animales, esferas cristalinas, etc.- o se sitúan en el pensamiento antropomófico y animista, en el que se proyectan comportamientos y principios de funcionamiento de los seres vivos, incluido el

hombre, sobre el mundo inanimado. En este contexto, las leyes naturales se sustituyen por deseos y tendencias finalistas o por la intervención continua de la divinidad como motor causal de los sucesos.

Posteriormente, se aprecia una progresiva y lenta evolución hacia otros planteamientos y argumentos más sutiles y complejos, en los que el paralelismo se establece ya a un nivel fenomenológico y no tanto a través de conductas humanas o divinas. En ellos se relaciona el funcionamiento del cosmos, en particular del Sistema Solar, con causas situaciones físicas ajenas a los deseos y comportamientos humanos. El ser humano pierde su peso y protagonismo en este escenario, desplazándose el interés hacia la unificación de fenómenos o campos experienciales aparentemente distintos, empezándose a labrar la hipótesis de la analogía de las leyes terrestres y celestes, y con ella la visión mecanicista que se desarrollaría más tarde con Descartes.

Los casos más emblemáticos estudiados que ilustran este cambio de enfoque, lo tenemos en la analogía de la gravedad con la luz (Kepler), para interpretar cuantitativamente la variación con la distancia de la acción solar sobre los planteas, y la identificación de la gravedad con el magnetismo (Gilbert, Kepler y, más tarde como veremos, Borelli). Ambas analogías serían posteriormente retomadas por otros autores, como fue el caso de Newton, aunque esta vez en un sentido no literal sino figurativo, como tendremos ocasión de ver en la segunda parte de este trabajo.

En el mencionado trabajo se discutirán algunos de los razonamientos analógicos formulados con posterioridad a partir de la segunda mitad del siglo XVII hasta llegar a la síntesis newtoniana. Profundizaremos, de una parte, en la analogía entre la gravedad y el magnetismo, a la luz de autores posteriores a la época de Kepler, y abordaremos el papel de esta forma de razonar y argumentar en el desarrollo de las tesis mecanicistas y en el devenir de la síntesis newtoniana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNAL, J.D. (1975). *La proyección del hombre. Historia de la Física clásica*. Madrid: Siglo XXI.
- CASADELLA, J. y BIBILONI, L. (1985). La construcción histórica del concepto de fuerza centrípeta en relación con las dificultades de su aprendizaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 3(3), pp. 217-224.
- COHEN, I.B. (1989). *Revolución en la Ciencia*. Barcelona: Gedisa.
- CROMBIE, A.C. (1996). *Historia de la Ciencia: De San Agustín A Galileo*. Madrid: Alianza Universidad.
- DAGHER, Z.R. (1995). Review of studies on the effectiveness of instructional analogies in science education. *Science Education*, 79(3), pp. 295-312.
- DREISTADT, R. (1968). An analysis of the use of analogies and metaphors in Science. *Journal of Psychology*, 68, pp. 97-116.
- DUIT, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75(6), pp. 649-672.
- FERRIS, T. (1990). *La aventura del Universo*. Barcelona: Crítica.

- GALILEI, G. (1615). Carta a la señora Cristina de Lorena, Gran Duquesa de Toscana. En P. de la Fuente, X. Granados y F. Reus (Eds.), *Cartas Copernicanas*. Madrid: Alhambra (1986).
- GEE, B. (1978). Models as a pedagogical tool: can we learn from Maxwell? *Physics Education*, 13, pp. 278-191.
- GENTNER, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, pp.155-170.
- GENTNER, D., BREM, S., FERGUSON, R., WOLFF, P., LEVIDOW, B. B., MARKMAN, A. B., y FORBUS, K. (1997). Analogical reasoning and conceptual change: A case study of Johannes Kepler. *Journal of the Learning Sciences*, 6(1), pp. 3-40
- GOSWAMI, U. (1992). *Analogical reasoning in children*. Hove: Lawrence Erlbaum.
- HARRÉ, R. (1986). *Grandes experimentos científicos*. Barcelona: Labor.
- HOLTON, G. y BRUSH, S.G. (1988). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- HULL, L.W.H. (1981). *Historia y filosofía de la Ciencia*. Barcelona: Ariel.
- KHUN, T. (1975). *La estructura de las revoluciones científicas*. Madrid: Fondo de Cultura económica.
- KHUN. T. (1985). *La revolución Copernicana*. Barcelona: Ariel.
- KOYRÉ, A. (1990). *Estudios de historia del pensamiento científico*. Madrid: Siglo. XXI.
- LAWSON, D.I. y LAWSON, A.E. (1993). Neural principles of memory and neural theory of analogical insight. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), pp.1327-1348.
- LOSSE, T. (1987) *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*. Madrid: Alianza.
- MASON, S.F. (1990). *Historia de las Ciencias. La revolución científica de los siglos XVI y XVII*. Madrid: Alianza.
- MUSCARI, P.G. (1988). The metaphor in science and in the science classroom. *Science Education*, 72(4), pp. 423-431.
- NERSESSIAN, N. J. (1992). How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science. En R.N. Giere (Ed.): *Cognitive Models of Science*, pp. 3-45. Minneapolis, MN: University of Minnesota Press. En línea en <<http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/faculty/nersessian/papers/how-do-scientists-think.pdf>>.
- NERSESSIAN, N. J. (2002). Maxwell and "the Method of Physical Analogy": Model-based reasoning, generic abstraction, and conceptual change. En D. Malament (Ed.) *Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics*, pp.129-166. Lasalle, IL: Open Court.
- OLIVA, J.M^a y ACEVEDO, J.A. (2004). Pensamiento analógico y movimiento de proyectiles. Perspectiva histórica e implicaciones para la enseñanza. *Revista Española de Física* (enviado para su publicación).
- OLIVA, J.M^a, MATEO, J.; BONAT, M. y ARAGÓN, M^a.M. (1997). Las analogías en los textos de Química de Secundaria. *Actas de la 26^a Bienal de la Real Sociedad Española de Química*. Volumen I. Cádiz, pp. 323-324.
- SOLÍS, C. (1991). *Historia de la Ciencia y de la Técnica. La revolución de la Física en el siglo XVII*. Madrid: Akal.

¹ La metáfora constituye un instrumento del lenguaje en el que se utiliza una analogía de forma implícita sin detallar las relaciones existentes entre los dos dominios que se comparan. En ella, se sustituye un elemento del objeto por otro del análogo utilizando una relación de identidad en un sentido figurado. Por ejemplo, constituye una metáfora hablar "de la red de átomos" o de "la nube de electrones".