

LAURA BUJALANCE

EL ESTATUTO EPISTEMOLÓGICO DE  
LA TRANSMISIÓN DE LA ACCIÓN: UN  
ESTUDIO DESDE MARY HESSE *FORCES*  
*AND FIELDS*

TESIS DOCTORAL

Director: Dr. Pablo Cobreros

Universidad de Navarra  
Facultad de Filosofía y Letras  
Departamento de Filosofía

Pamplona, Octubre 2017



*A mi familia*



# ÍNDICE

PRÓLOGO-----	1
CAPÍTULO 1. DONDE COMIENZA EL DEBATE: <i>FORCES AND FIELDS</i> DE MARY HESSE -----	21
1.1. Contexto de la obra -----	21
1.2. La postura de Hesse en el debate positivismo - realismo ----	30
1.3. Intención de la monografía -----	36
1.4. Conclusiones de la obra-----	39
CAPÍTULO 2. LOS MODELOS FUNDAMENTALES -----	53
2.1. Los modelos fundamentales a lo largo de la historia de la ciencia según Mary Hesse -----	53
2.1.1. Determinación de los modelos fundamentales -----	54
2.1.2. ¿Por qué el mecanicismo no es un modelo fundamental?64	
2. 2. Analogías y modelos fundamentales de <i>Forces and Fields</i> ----	74
2.2.1 Analogías y explicaciones pre-científicas -----	74
2.2.2 La época de los modelos fundamentales-----	76
2.2.3 Los modelos matemáticos -----	101
2.3. Modos de acción en las analogías y modelos -----	117
2.3.1 Modos de acción en las analogías y modelos pre-científicas -----	121
2.3.2. Modos de acción en la época de los modelos fundamentales-----	131

2.3.3. Modos de acción en los modelos matemáticos-----	143
CAPÍTULO 3. LAS EXPLICACIONES CIENTÍFICAS EN EL DEBATE ACTUAL -	149
3.1. El contexto filosófico de la teoría de modelos de Hesse-----	149
3.2. Las teorías de la explicación científica-----	156
3.2.1 La <i>Received View</i> -----	157
3.2.2. Alternativas a la <i>Received View</i> -----	167
3.3. Los modelos en el debate actual -----	192
3.3.1. Los modelos y la teoría semántica -----	196
3.3.2. Formas de representación-----	199
3.3.3. Representacionismo deflacionario -----	203
3.3.4. Implicaciones culturales-----	206
3.3.5 La propuesta de Nancy Nersessian -----	208
CAPÍTULO 4. TRES MODELOS O TRES TRADICIONES: LOS MODOS DE ACCIÓN EN EL SIGLO XIX -----	227
4.1. El reto de la electricidad y el magnetismo-----	238
4.2. Los modelos matemáticos de la acción a distancia -----	250
4.2.1 La tradición francesa-----	252
4.2.2. Ampère-----	259
4.3. Las teorías del potencial y la electrodinámica de Weber-----	264
4.3.1. El Potencial-----	265
4.3.2 La electrodinámica -----	283
4.4. La teoría de campos -----	290

4.4.1. Primeras investigaciones de Faraday -----	292
4.4.2. Faraday y la inducción electromagnética -----	299
4.4.3. El rol de las líneas de fuerza-----	308
4.5. ¿Es el siglo XIX tal y como lo presenta Hesse? -----	337
CONCLUSIONES-----	341
REFERENCIAS-----	345









# PRÓLOGO

## EL PROBLEMA DE LA ACCIÓN

Uno de los problemas centrales de los que las teorías científicas deberían dar cuenta es el de cómo es posible una relación entre objetos físicos en la que uno de ellos establece una influencia sobre el otro. Este problema se conoce como el problema de la explicación de la transmisión de la acción física. La necesidad de dar cuenta de esta relación, tal como se percibe en los fenómenos naturales, está presente tanto en los albores del debate filosófico – la teoría del cambio de Aristóteles<sup>1</sup> – como en los debates actuales de las ciencias cognitivas<sup>2</sup>, o de la filosofía de la ciencia, cuando tratan las teorías de la explicación científica<sup>3</sup>. Las propuestas para dar cuenta de determinadas acciones físicas instancian siempre

---

<sup>1</sup> Aristóteles, *Física*, trans. Ute Schmidt Osmanczik (México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2001), 215a.

<sup>2</sup> Nancy J. Nersessian, *Creating Scientific Concepts* (Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 2008).

<sup>3</sup> Stephan Hartmann, Carl Hoefer, and Luc Bovens, eds., *Nancy Cartwright's Philosophy of Science, Routledge Studies in the Philosophy of Science* (New York: Routledge, 2008).

uno de los dos modos de transmisión de la acción: acción por contacto y acción a distancia. Por ejemplo, el empuje (*push*) como explicación de la transmisión de la acción instancia el modo de acción por contacto. De esta manera, el problema de dar cuenta de la transmisión de la acción tiene como lugar privilegiado para su análisis la evolución del debate acerca de los modos de la acción presente en las teorías científicas a lo largo de la historia de la ciencia.

Como se ha señalado, el problema de la acción para las teorías físicas reside en dar una ‘explicación’ de cómo tiene lugar la transmisión de la acción. Esto implica que el problema no solo concierne al ámbito de las ciencias, sino también al de Filosofía de la Ciencia, disciplina a cuyo ámbito pertenece dar cuenta de las características de las explicaciones en la ciencia y, del mismo modo, determinar si una explicación es o no científica. Por tanto, una de las principales preguntas en torno al problema de la transmisión de la acción es si las explicaciones acerca de cómo actúan unos cuerpos sobre otros son explicaciones que pertenecen al ámbito de lo científico. La respuesta a esta pregunta establece el estatuto epistemológico de los modos de transmisión de la acción, a saber, metafísico, filosófico –en el sentido que la Filosofía de la Ciencia de tradición analítica entiende este término–, o científico.

Las acepciones del término ‘acción’ consideradas como metafísicas en el debate actual se remontan a los escritos aristotélicos, en las que dicho término se define como la actividad

propia de aquello que provoca un cambio<sup>4</sup>. Aunque en las obras de Aristóteles este término aparece intrínsecamente vinculado al estudio de los cambios naturales, la recepción posterior del *corpus* aristotélico relegó el contenido de este término al campo de lo que se consideraba metafísica<sup>5</sup>.

En las ciencias físicas –área científica en la que surge este término– el término ‘acción’ está vinculado a la definición de movimiento: es la magnitud escalar que se define como la diferencia entre energía cinética y energía potencial a lo largo de un tiempo. Dicha variación se produce como resultado de la variación del estado de un cuerpo y tiene como caso paradigmático el cambio de estado que se produce con el movimiento, considerado como variación del espacio a lo largo de un tiempo. Con las connotaciones que tiene esta acepción en la física, a saber, como la influencia que un cuerpo ejerce, el término ‘acción’ no aparece en la literatura hasta 1360<sup>6</sup>. A partir de este momento, las definiciones que las tradiciones científicas dieron de este término no fueron homogéneas. Esta diversidad surge de la consideración que cada tradición hacía de en qué consiste “influir” en un cuerpo.

---

<sup>4</sup> Aristóteles, Física, 202a15-30.

<sup>5</sup> Para un análisis de la evolución de las interpretaciones del término aristotélico leáse Susan James, *Passion and Action. The Emotions in Seventeenth-Century Philosophy* (Oxford: Clarendon Press, 1997), pp. 27-81.

<sup>6</sup> James A. H. Murray, "Action" in *A New Dictionary of Historical Principles. Founded on the Materials Collected by the Philological Society* (Oxford: Clarendon Press, 1888).

Estas interpretaciones contribuyeron a los debates sobre la transmisión de la acción que tuvieron lugar a partir del siglo XVII.

En el siglo XIX, se realizaron grandes avances y desarrollos en las explicaciones de los fenómenos físicos. A pesar de ello, aún en su segunda mitad, el término 'acción', si bien ya claramente vinculado a la mecánica y a la física, seguía sin ser definido de modo unificado y preciso. Esto se debía, principalmente, a que los términos gracias a los cuales se delimitaba la noción de 'acción' por aquel entonces —a saber, movimiento, fuerza, energía, causa, etc.— no tenían tampoco una definición precisa, ni universalmente aceptada. Por ejemplo, se podía describir el movimiento de un cuerpo, pero no siempre adscribirle acción; o se podía vincular su movimiento con las nociones de energía o fuerza. Tan intrincada era la relación entre el término 'acción' con otros términos físicos relacionados con el cambio y el movimiento que, por ejemplo, desde la segunda mitad del siglo XVIII hasta la primera mitad del siglo XIX, los términos 'acción' y 'fuerza' no solo se distinguían con pocos matices sino que incluso en alemán se identificaban en una sola palabra, *Kraft*. Se puede decir, por tanto, que en la terminología científica de mediados del XIX 'acción' era un término con un uso muy general: el ejercicio de algún poder o fuerza que tiene por efecto el cambio de estado de algún cuerpo.

Justamente por la generalidad del uso del término 'acción' y la dificultad de asociar dicho término con otros relacionados, los debates sobre la transmisión de la acción no se centraron en el

rigor de la definición del término sino, precisamente, en las nociones con las que se asociaba. Puesto que se hablaba de 'influencia' entre cuerpos, surgían preguntas como, de qué depende esta influencia o qué la posibilita. Además, como el término 'acción' hacía referencia a fuerzas y energías, cabía preguntarse: ¿se deben éstas a las propiedades materiales de los cuerpos físicos o a otras propiedades? ¿Quizás a las propiedades de otros cuerpos? Por último, ya desde los escritos de Aristóteles, en los que la acción se vinculaba a la causalidad, en el debate del XIX, al hablar de la acción, se trataba acerca de causas pero seguía sin explicarse qué determinaba que algo fuera causa de un fenómeno físico.

Todas estas preguntas, y muchas similares, constituyen los problemas que Mary Hesse identifica como los "agrupados en torno" al problema de la transmisión de la acción en su obra *Forces and Fields*. Esta monografía es pionera en el análisis de este debate y es referente de todo estudio posterior. De hecho, es la única en la que como tal se plantea explícitamente: "¿cómo pueden actuar los cuerpos unos sobre otros a través del espacio?"<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Mary Hesse, *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. (New York: Dover Publications, 2005), Prefacio.

## NECESIDAD E INTERÉS DE UN ESTUDIO DE *FORCES AND FIELDS*

La obra *Forces and Fields: A Study of Action at a Distance in the History of Physics* escrita por Mary Hesse en 1961 es una obra paradigmática que cualquier estudio sobre la transmisión de la acción ha de tomar como referencia por varios motivos.

En primer lugar, porque en ella la autora acomete los problemas de la Filosofía de la Ciencia desde una perspectiva amplia: una perspectiva en la que la integración de esta disciplina con la historia de la ciencia desempeña un papel fundamental<sup>8</sup>. En la actualidad, este tipo de aproximación no resulta novedosa, pero sí lo fue en la época en que Hesse, Kuhn o Feyerabend hicieron uso de ejemplos de Historia de la Ciencia para profundizar en los problemas de Filosofía de la Ciencia. Esto ha dado lugar a que, desde la publicación de la obra de Hesse, haya mucha más información acerca de los casos históricos que presenta en su obra, casos de los que se tratará en el último capítulo.

En segundo lugar, la lectura que Hesse hace de la historia de la ciencia, se considera, hoy en día, una obra internalista desde el punto de vista de la disciplina de la Historia de la Ciencia. Se denomina 'internalismo' a las reconstrucciones racionales de la

---

<sup>8</sup> Margareta Hallberg, "Mary Brenda Hesse" in *The Dictionary of Twentieth-Century British Philosophers*, ed. Stuart Brown (Bristol: Thoemmes Continuum, 2005).



historia de la ciencia que no incorporan aspectos sociológicos y culturales que son relevantes, siendo el 'externalismo' la corriente académica mayoritaria en dicha área en la actualidad. Se considera que los estudios internalistas presentan una interpretación sesgada de los fenómenos que pretenden describir y, por tanto el hecho de ser internalista urge a una revisión de la obra<sup>9</sup>.

Además, la obra de Hesse es particularmente interesante porque no solo debate el problema de la acción desde la historia de la ciencia, sino también desde las aportaciones de la Filosofía de la Ciencia de su tiempo, la tradición post-positivista<sup>10</sup>, al problema del estatus epistemológico de las teorías sobre la acción. Hesse presenta un tercer planteamiento acerca del rol de los modelos y las analogías en las teorías científicas<sup>11</sup> alternativo a los dos ya presentes en el debate del momento: el planteamiento positivista, para el cual los modelos y analogías serían herramientas para las teorías, y el planteamiento realista *naïve*, que consideraría a los modelos y teorías como descripciones literales de la realidad. De

---

<sup>9</sup> Acerca de los términos del debate internalismo-externalismo cfr. Steven Shapin, "Discipline and Bounding: The History and Sociology of Science as Seen through the Externalism-Internalism Debate" *History of Science* 30 (1992): 333-69.

<sup>10</sup> Esta tradición, también conocida como post-empirista— tiene como referente la física de comienzos del siglo xx junto con las propuestas positivistas/empiristas del Círculo de Viena

<sup>11</sup> Paul Bartha, "Analogy in the Natural Science: Meeting Hesse's Challenge" *Philosophical Inquiries* 3, no. 1 (2015): 47-68. En este artículo se trata con detalle el papel que desempeñaron los modelos y las analogías en el pensamiento de Mary Hesse.

acuerdo con Hesse existen un tipo de modelos, los que ella denomina ‘modelos descriptivos’ que son intrínsecos a las teorías científicas puesto que son los responsables de su capacidad de generalización, de ampliación y de ser testadas. Un subtipo de estos modelos son los ‘modelos fundamentales’, centrales en la obra de Hesse, puesto que la elección, en una teoría científica, de un modo de acción es siempre relativa a ellos.

La conclusión a la que llega no podría ser expresada con mayor precisión y con palabras más escogidas.

*“Our discussion **has not enabled** us to answer the question ‘Do bodies act at a distance’ – this in any case is not the business of the philosophy of science. It **has not enabled us** to show that physics itself gives a definite answer, because although we have maintained that physical theories are asserted as facts, the **problem of action at a distance** is not so much a problem of particular theories as of a **metaphysical framework**. The discussion has, however, enabled us to compose some variations of the theme: namely, the historical, heuristic, and logic importance for physics of ideas and assumptions commonly called metaphysical”<sup>12</sup>.*

Esta conclusión abre un amplio abanico de preguntas:

1. ¿Son estas las únicas afirmaciones que se pueden realizar desde la filosofía de la ciencia acerca del problema de la transmisión de la acción?
2. ¿El hecho de evitar el positivismo que relega las afirmaciones sobre la transmisión de la acción a ser

---

<sup>12</sup> Mary Hesse, *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. (New York: Dover Publications, 1962), p. 303. El subrayado es mío.

consideradas como vacías sólo logra situarlas en el campo de lo metafísico, considerado este como lo no falsable?

3. ¿Hay dos posiciones alternativas a un realismo considerado como literal que puedan dar cuenta del problema de la transmisión de la acción, a saber, el positivismo y la teoría de los modelos de Mary Hesse?

En esta tesis doctoral se acometerán estas cuestiones. En primer lugar, se expondrá la teoría de los modelos de Hesse, presentando una alternativa a dicha propuesta (la teoría de modelos de Nersessian). En segundo lugar, se hará un repaso de las propuestas actuales al debate sobre las explicaciones científicas. En tercer lugar, se analizará en detalle un periodo de la historia de la ciencia, los dos primeros tercios del siglo XIX, un periodo privilegiado para comparar la relación entre los modelos y las explicaciones científicas de un fenómeno natural. Esto es así porque en dicho periodo convivieron diferentes modelos que trataban de dar cuenta de un mismo fenómeno.

Mediante este análisis se pondrán de manifiesto las limitaciones de la propuesta de Hesse sobre los modelos y se presentará una alternativa a la propuesta del estatus epistemológico que otorga Hesse a los modos de acción.

¿Es relevante esta revisión del estatus epistemológico que Hesse otorga a los modos de acción? Sí, siempre y cuando no

quiera relegarse a pertenecer a un ámbito no científico a uno de los problemas centrales de la ciencia: la explicación del cambio físico.

## CONEXIÓN BIOGRÁFICA Y MOTIVACIÓN

En mi primer año como estudiante de la Licenciatura de Filosofía, el profesor de la asignatura ‘Filosofía de la Naturaleza’ nos habló de la importancia de la causalidad final en la naturaleza. Esta afirmación me resultó extremadamente controvertida, dado que la naturaleza se rige por unas leyes que no exhiben, desde el punto de vista científico, rasgos finalistas. Esta consternación me llevó a estudiar con más profundidad el tema de la causalidad: los orígenes de su concepto en Aristóteles, las propuestas de sus detractores para, finalmente, realizar como Trabajo de Fin de Carrera un estudio del debate acerca de la causalidad final en uno de los contextos científicos que más controversia ha generado: la teoría de la evolución.

Este trabajo no despejó mis dudas. No obstante, me ayudó a concretar más los términos de mi inquietud intelectual: los que afirman la causalidad final en la naturaleza, afirman que hay algo que “está en” ella que se manifiesta a lo largo del tiempo. Al ser esta concepción pareja a la concepción aristotélica de ‘potencia’, para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados realicé una investigación del concepto de potencia en la *Física* de Aristóteles. Esta investigación, titulada “Una reconstrucción de la Dinámica

Aristotélica” analiza en detalla las instancias del término *δύναμις* en el corpus aristotélico. La conclusión de mi trabajo fue la siguiente:

“[e]l ‘poder interno’ que suele atribuirse a la potencia aristotélica, una vez que se ha señalado que el movimiento se transmite por contacto, no puede ser considerado como perteneciente más que a aquello que sea el origen último de todo movimiento, (...) pero no como perteneciente a los entes naturales objeto del estudio de la ‘Física’. Por este motivo, estimo que sería de utilidad aplicar el significado fundamental de la noción de potencia a las teorías físicas modernas, en las que los problemas de la transmisión del movimiento y el de las interacciones por contacto son problemas que desempeñan también un papel fundamental”.

Mis siguientes investigaciones se centraron, por tanto, en la disciplina científica que más rasgos de la potencia aristotélica parecía exhibir: la teoría de campos. Comenzó entonces un periodo de investigación sobre el origen de la teoría de campos en la obra científica de Michael Faraday. Esta empresa me llevó a realizar dos estancias de investigación en Reino Unido, país de origen de Faraday. Una de ellas fue en la *Royal Institution for the Advancement of Science*, institución en la que Faraday realizó su labor científica y en la que, en la actualidad, se encuentran los archivos de su obra. En ella trabajé bajo la tutela del Prof. Frank A. J. L. James, editor de la obra de Faraday y experto en su figura y su pensamiento. Mi otra estancia tuvo lugar en el Departamento de Historia y Filosofía de la Ciencia de la Universidad de Cambridge, estancia en la cual pude profundizar en la tradición anglosajona de la Filosofía de la

Ciencia, las tendencias actuales tanto de Historia como de Filosofía de la Ciencia y en donde, bajo la tutela del Prof. Simon Shaffer, comencé a comprender la importancia de analizar el concepto de campo no sólo desde un punto de vista de las ciencias físicas, sino desde un punto de vista histórico.

Durante dicha estancia, presenté en la *6th International History of Philosophy of Science Conference* que tuvo lugar en París, una comunicación titulada "*The ontological status of Faraday's lines of force*". Esta comunicación era parte de un Simposio del Congreso titulado "*Continuous or Discontinuous? The ontology of matter in the History of Science*". El debate que se generó a raíz de mi comunicación, por tanto, se centró especialmente en la continuidad o discontinuidad de la acción y, en concreto, en el debate acción por contacto/acción a distancia. Precisamente, el Prof. Frank A. J. L. James, me sugirió una cuestión que es la que dio origen a esta tesis "¿por qué no ha de poderse considerar la acción a distancia como primaria?", a lo que añadió que había teorías que así lo hacían. Hasta ese momento, desde la perspectiva de la teoría de campos británica, la acción por contacto había sido considerada por mí como indubitable. El que no fuera así para todas las teorías científicas modernas me abrió un horizonte de investigación de gran interés: las teorías francesas y las teorías de tradición germana que trataban de dar cuenta de los mismos fenómenos que la teoría de campos, y que tenían como origen la teoría newtoniana de la

gravitación en la que la acción a distancia desempeña un papel preponderante.

Una vez determinada la temática sobre la que se centraría mi tesis, a saber, los modos de acción en las teorías científicas del siglo XIX, inicié la revisión literaria que, como no podía ser de otro modo, se inició con la obra de Mary Hesse, única monografía dedicada al tema. Una vez entré en contacto con dicha obra quedaron claros dos aspectos. Por un lado, que cualquier propuesta sobre dicha temática solo podía hacerse desde lo ya tratado por Mary Hesse. Por otro, que dada la consternación que había supuesto para mí el “destierro” de los modos de acción del campo de la ciencia, hecho que parecía totalmente ajeno a la práctica científica de los científicos que yo había estudiado, una nueva propuesta sobre el tema pasaba también por realizar una propuesta alternativa al estatus epistemológico que Hesse había otorgado a la acción. Como ya se ha señalado, eso ha sido posible gracias a la evolución y proliferación en Filosofía de la Ciencia de teorías de la explicación científica que no existían en el momento en que Hesse escribió su obra.

## **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La presente tesis consta de tres partes que se corresponden con los tres aspectos de la obra de Hesse que se proponen para su revisión: su teoría de los modelos, el contexto filosófico que

determinó sus propuestas y las conclusiones a las que llega a partir del estudio de los casos históricos. A estas tres partes les antecederá un análisis en profundidad de la obra de Mary Hesse. De este modo, este estudio se compondrá de 4 capítulos.

En los dos primeros capítulos se analizará la obra de Mary Hesse *Forces and Fields*. Este análisis presentará la intención de la obra, el contexto en el que se realizó y las conclusiones a las que la autora llega. Para ello, se prestará una especial atención, en el capítulo segundo, a la teoría de los modelos que Mary Hesse presenta de manera explícita en su obra —lo cual incluye determinar el rol que los modelos fundamentales desempeñan en ella—, y a las características de los mismos que se hacen presentes en el desarrollo de su estudio de los estudios de los casos históricos. Uno de los rasgos que Hesse considera como propios de los modelos fundamentales es que ellos determinan la elección de un modo de acción en una determinada época, afirmación que trata de confirmar mediante su análisis de la historia de la ciencia. Se incluirá en este capítulo, por tanto, una relación de los modelos fundamentales que Hesse identifica y de los modos de acción que les atribuye.

El capítulo tercero se corresponde con una revisión del marco conceptual de la obra de Mary Hesse y con la exposición de la evolución que ha sufrido dicho marco hasta el momento actual. La revisión consistirá en un análisis, tanto del estado del debate acerca del estatus de las teorías científicas en el momento en que Mary



Hesse escribió su monografía, como de su teoría de los modelos. Posteriormente se presentarán los desarrollos que han tenido lugar en la disciplina de la Filosofía de la Ciencia en relación a ambos debates. A continuación se presentarán los aspectos en los que dichos desarrollos afectan a las propuestas de Mary Hesse. Para finalizar este capítulo, se propondrá la teoría de modelos de Nancy Nersessian como alternativa a las propuestas de Hesse sobre la función de los modelos en la ciencia.

El capítulo cuarto se centra en la historia de la ciencia del siglo XIX. En primer lugar se presenta en análisis que Hesse realiza de este periodo y la relación de dicho análisis con la conclusión de Hesse acerca del estatuto epistemológico de la acción. A continuación se expondrán las tres tradiciones científicas del siglo XIX, —a saber, la tradición francesa, la tradición alemana y la tradición británica—, estableciendo relaciones entre dichas tradiciones y los modelos fundamentales de Hesse. Las tres tradiciones que se acaban de señalar son las tres tradiciones físicas que, durante los dos primeros tercios del siglo XIX, trataron de dar cuenta de los fenómenos relacionados con la electricidad y el magnetismo. La tradición francesa se caracteriza por su carácter marcadamente matemático y el tipo de modo de acción que este modelo exhibe, a saber, el de las fuerzas centrales. Por su parte, la tradición del dinamismo atómico defendido por los científicos alemanes se caracteriza por sus herencias tanto de la *Natürphilosophie* como del newtonianismo; esto hace que el modo

de acción escogido sea el de la acción a distancia, como se indicará. Con respecto a la tradición británica se expondrá la teoría de Faraday que dio lugar a la teoría de campos y su “relación” con el modo de “acción a cortas distancias”.

Por último en la conclusión se expondrá que, tanto la dependencia de Hesse de la tradición semántica de las explicaciones científicas, como su ambigüedad en el uso de los modelos fundamentales en relación con los modos de acción, son los dos motivos que llevan a la autora a prescindir tanto en la ciencia como en la filosofía de la ciencia de los modos de acción como objeto propio.

## **METODOLOGÍA**

Al tratarse de una tesis que aborda aspectos de diversas disciplinas como la Física, la Historia de la Ciencia, la Historia de la Filosofía y la Filosofía de la Ciencia, los métodos de investigación que se han seguido son diversos. Cada uno de ellos se adapta a la finalidad de cada uno de los capítulos.

La metodología utilizada en los dos primeros capítulos es la del análisis conceptual de un texto: la obra *Forces and Fields*. Para el trabajo del tercer capítulo se presenta un estado de la cuestión de las teorías actuales de las explicaciones científicas y un análisis conceptual de la teoría de Nersessian.

Por último, en el capítulo cuarto la metodología seguida ha sido el estudio de casos. Esto incluye la revisión literaria, el análisis de las fuentes primarias, tanto científicas como filosóficas, el debate con las corrientes actuales de la disciplina de la Historia de la Ciencia y el trabajo de estudio de archivos.

## **TESIS QUE SE DEFIENDE**

La tesis que se defiende en este estudio puede enunciarse de la siguiente manera: las explicaciones sobre la transmisión de la acción pertenecen al ámbito de la ciencia, al contrario de lo que afirma Mary Hesse en su obra *Forces and Fields*. Esta tesis se enmarca en el debate acerca de si, siendo un problema esencial de la ciencia el dar cuenta del cambio, las respuestas a este problema pertenecen al campo de la metafísica.

Al ser la obra de Hesse la monografía referente con respecto a este tema el modo de argumentar la tesis se ha llevado a cabo realizando una revisión de *Forces and Fields* a la luz de las teorías contemporáneas de la explicación científica, considerando que la respuesta que da Mary Hesse acerca de a qué ámbito pertenecen las explicaciones sobre la acción está condicionada por el hecho de que en el momento en que escribió su obra y propuso su teoría de modelos, solo había dos corrientes en la Filosofía de la Ciencia que dieran cuenta de las explicaciones científicas: el realismo *naïve* y el positivismo científicista.

## AGRADECIMIENTOS

Aunque la realización de una Tesis Doctoral pueda parecer un trabajo solitario, en la realidad es todo lo contrario. Durante estos años han sido muchas las personas e instituciones que han hecho posible este trabajo. A todos quiero agradecerles su apoyo, su interés y la confianza que han depositado en mí.

En primer lugar quiero agradecer a mi Director de Tesis, el Dr. Pablo Cobreros, por su ayuda incondicional y su siempre paciente apoyo a mi trabajo. Con él, quiero agradecer al Departamento de Filosofía de la Universidad de Navarra por la acogida que han dado a mi proyecto de investigación.

En segundo lugar quiero expresar mi gratitud al Ministerio de Educación gracias a cuya beca FPU, incardinada en el Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Madrid, pude dedicarme a la investigación filosófica. Debo un especial reconocimiento al Dr. Javier Ordóñez de la UAM quien me descubrió el apasionante mundo de la investigación en Filosofía de la Física y que dirigió mi investigación para el Diploma de Estudios Avanzados. Quiero agradecerle también que, junto al Dr. José Manuel Sánchez Ron, me facilitaran el estar en contacto con expertos de esta temática en otros países.

Quiero agradecer también la cordial acogida que el Dr. Frank A. J. L. James, y todo su equipo de la *Royal Institution*, me

brindaron. Durante todo el tiempo que tuve la oportunidad de trabajar con él, me trató como uno más del equipo y puso a mi disposición todos los medios a su alcance para que pudiera avanzar en mi investigación

Al *History and Philosophy of Science Department* de *Cambridge University* quiero agradecer su hospitalidad, así como la oportunidad de formarme como investigador en un entorno privilegiado para mi área de estudio. Gran parte de la grata experiencia de mi año en Cambridge fue debida a la acogida que recibí por parte de mis compañeros de despacho de quienes tanto aprendí.

Quiero expresar mi gratitud también al Dr. Rafael Alvira, a la Dra. María Cerezo, al Dr. Juan Pimentel, al Dr. Jaume Navarro, al Dr. José Torres y al Dr. Jesús Vega por el tiempo que han dedicado a conversar conmigo acerca de aspectos de mi tesis.

Por último, y no por ellos menos importante, sino más bien todo lo contrario, quiero agradecer a mis padres, mis hermanos, mi familia y mis amigos más cercanos, su apoyo incondicional a lo largo de estos años, con todos sus altibajos. Sin su amparo, esta tesis no hubiera sido posible y, por tanto, es también mérito suyo.



# CAPÍTULO 1. DONDE COMIENZA EL DEBATE: *FORCES AND FIELDS* DE MARY HESSE

*En este capítulo se exponen las tesis de la obra de Hesse. La autora propone una tercera vía entre el positivismo y el realismo científico. Hay modelos 'aceptables' y necesarios desde el punto de vista de la ciencia: aquellos modelos que dotan de inteligibilidad y testabilidad a una teoría. Por un lado tienen una función heurística, y no son solo herramientas (como afirma el planteamiento positivista). Por otro lado, su inteligibilidad no puede dissociarse de su testabilidad (lo que aleja su planteamiento del realista, ya que no todas las descripciones literales son testables).*

## 1.1. CONTEXTO DE LA OBRA

Cuando en 1961 Hesse publicó su obra *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics* el debate acerca de la naturaleza de las teorías científicas llevaba vigente unos 30 años. Con formación matemática, y habiendo realizado su Tesis Doctoral en el Departamento de Estudios Científicos y Tecnológicos de la *University College of London* (1949), Hesse había dedicado, por entonces, gran parte de su trabajo académico al estudio de cuestiones como el estatus lógico de las teorías científicas o la relación entre observaciones y teorías. En esta obra, su segunda monografía, Hesse acomete lo que ella consideraba que

debía ser el siguiente paso en el debate sobre cómo se construyen las teorías, a saber, establecer cuál es la naturaleza de las teorías científicas. Desde una postura crítica respecto a una aproximación hipotética-deductiva con respecto a la justificación de las teorías científicas y, a su vez, también crítica con un realismo científico *naïve* que entiende la ciencia como descripciones literales de la naturaleza, en *Forces and Fields* Hesse realiza una propuesta inductivista acerca de las teorías científicas cuyo elemento clave es el papel que, como inferencia inductiva, desempeñan las analogías y los modelos en la ciencia.

El planteamiento de la obra, tal y como Hesse lo describe, es presentar una teoría acerca de la naturaleza de la ciencia, testando dicha teoría en relación a situaciones históricas específicas. El hilo conductor de estas situaciones históricas será el de las distintas explicaciones acerca de cómo tiene lugar la acción física en el contexto de las concepciones sobre la ciencia de cada una de dichas situaciones. De ahí que ya desde el título y el Prefacio de su monografía la cuestión acerca de la acción a distancia esté presente.

Según Mary Hesse<sup>13</sup> hay dos tipos de explicaciones opuestas entre sí acerca de la naturaleza de las teorías científicas, es decir, acerca de qué son las teorías científicas, qué clase de información proveen sobre el mundo y qué procedimientos tienen lugar para que estas teorías se desarrollen.

---

<sup>13</sup> Cfr. Hesse, *Forces and Fields*, pp. 1-21.



La primera de estas explicaciones es la que Hesse denomina "positivista", explicación que se identifica con las propuestas del método hipotético-deductivo del momento. Esta explicación se caracteriza por una postura específica en relación a uno de los temas de estudio de la autora: la relación de observación y teoría. En concreto, las explicaciones positivistas hacen una diferenciación "*sharply between the immediate empirical data and theories which might be built upon them*"<sup>14</sup> y niegan que las teorías tengan un valor descriptivo con respecto a la realidad. En este sentido, el estudio de lo no observable no pertenece a la ciencia, sino se confina a aquella/s disciplina/s que se considere que tienen acceso directo a dicho terreno, como la teología o la metafísica.

La segunda de las explicaciones, opuesta a la anterior, es la del realismo. Hesse entiende el realismo como una concepción para la que las "*scientific theories are in a straight-forward sense literal descriptions of nature*"<sup>15</sup>. Es decir, entiende el realismo en un sentido *naïve* según el cual las teorías se consideran como 'descripciones directas' de las entidades que existen en la naturaleza.

La propuesta que plantea Mary Hesse se presenta como alternativa a las dos mencionadas anteriormente. El modo de articularla es realizando una crítica al positivismo para, posteriormente, diferenciarla del realismo *naïve*. Este último paso es necesario ya que, al solo haber dos propuestas en dicho

---

<sup>14</sup> Ibid., p. 2.

<sup>15</sup> Ibid., p. 3.

momento (la del realismo y la del positivismo), cualquier crítica a una de ellas implicaba situarse desde la postura contraria. El planteamiento parte de determinar en qué condiciones se puede testar una teoría de acuerdo con el positivismo. Según este, el contenido de las afirmaciones sobre fenómenos<sup>16</sup> son independientes de cualquier teoría científica. Estas afirmaciones, además, son las que proveen de testabilidad a las hipótesis o afirmaciones teóricas a pesar de que su contenido no está relacionado con ellas, es decir, dada una hipótesis completamente formal —como una ecuación de símbolos—, cada elemento de la misma se interpreta en términos de afirmaciones sobre fenómenos, y si el resultado de dicha ecuación coincide con la afirmación sobre fenómenos que tiene como contenido el supuesto valor de dicha ecuación, esta se considera testada. Sin embargo, Hesse considera que la práctica real de cómo se interpretan las ecuaciones u otras hipótesis puramente formales no se corresponde con lo que el positivismo afirma. Según Hesse:

*“Descriptions of observations can never be absolute, and there is every degree of interpretation of an observation from those involving simple common-sense assumptions implicit in the use of*

---

<sup>16</sup> ‘Afirmaciones sobre fenómenos’ (*‘phenomenal statements’*) es el término con el que Mary Hesse denomina lo que comúnmente se conoce como *‘observation statements’*. El cambio terminológico se debe a que Hesse quiere excluir del debate acerca de las explicaciones científicas el debate acerca de qué se puede considerar que es una verdadera observación. Por ese motivo propone el término *‘phenomenal’*: *“Here phenomenal statements are those in which observations are described in such a way as to involve no technical terms or knowledge of scientific theories”*. Ibid., p. 15.

---

*the natural language itself, to those involving the highest-level theoretical concepts*<sup>17</sup>.

De acuerdo con esta frase, las afirmaciones que describen fenómenos (o experimentos) han de tener alguna relación con los conceptos teóricos, dado que si no, cualquier interpretación (y las hay en todos los grados) que haga que el resultado de la ecuación sea el que se deduce de la teoría, confirmaría la teoría<sup>18</sup>. Pero desde el positivismo no cabe justificación de por qué la interpretación que se hace de los símbolos formales de, por ejemplo, una ecuación, es en función de unas afirmaciones de fenómenos y no de otras. En cambio, si las afirmaciones sobre fenómenos no se consideran como descripciones absolutas sin términos teóricos, sino que su contenido depende en algún sentido del contenido de los enunciados hipotéticos de una teoría, habrá interpretaciones que confirmen los enunciados teóricos y otras que no, aunque den lugar a los mismos resultados que las otras. Siguiendo a Hesse, en la práctica científica las posibles interpretaciones de los símbolos formales están restringidas, y lo están precisamente por la teoría

---

<sup>17</sup> Ibid., p. 19.

<sup>18</sup> Hesse ilustra este punto haciendo uso de la ecuación ( $\sin \alpha / \sin \beta = \mu$ ). Los símbolos presentes en ella ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) se podrían interpretar como los ángulos entre la Estrella Polar, y Venus y Marte respectivamente, en un día concreto, y que el resultado de la ecuación ( $\mu$ ) fuera el que se deduce a partir de la parte formal de la teoría de la refracción. ¿Se podría considerar, se pregunta Hesse, que, en este caso, queda confirmada la teoría de la refracción, al igual que queda confirmada si  $\alpha$  y  $\beta$  se interpretan como los ángulos de refracción?

sobre la que se está tratando, lo están porque pertenecen a un modelo<sup>19</sup>.

La propuesta de Hesse, la teoría de los modelos como teoría de la explicación científica alternativa al positivismo y al realismo *naïve*, se articula desde esta crítica proponiendo los modelos como elementos inherentes a las explicaciones científicas porque son precisamente ellos los que “*provide[s] the context of natural expectations in terms of which a theory can be tested*”<sup>20</sup>. Esta propuesta, a su vez, ha de poder dar cuenta de lo que desde el positivismo se afirma acerca del estatus de los modelos.

Una de las afirmaciones del positivismo acerca de los modelos es que estos son exclusivamente “herramientas” o “mecanismos” que sirven para aclarar teorías y que resultarían irrelevantes una vez que la teoría se puede definir en términos de un sistema formal deductivo, es decir, una vez que puede ser descrita en términos de unas ecuaciones acordes al fenómeno que se está tratando. La otra afirmación sostiene que en la física moderna no hay ningún modelo que pueda dar cuenta de lo que ocurre a nivel atómico, por lo que las teorías que explican fenómenos en este nivel solo pueden desarrollarse en términos formales puramente matemáticos, y por tanto, en este contexto, los modelos serían redundantes.

---

<sup>19</sup> En el caso anteriormente mencionado el modelo que circunscribe las interpretaciones sería “*a model of imaginary wave-fronts and straight lines drawn in physical space and having relations with observable physical objects*”: Hesse, *Forces and Fields*, p. 17.

<sup>20</sup> *Ibid.*, p. 21.

Con respecto a la primera afirmación, a saber, que los modelos desempeñan un rol meramente heurístico en relación a los sistemas formales deductivos, Hesse sostiene que los modelos “*can be generalised, extended, tested, and if necessary modified*”<sup>21</sup> algo que los sistemas formales no permiten. Cuando Hesse presenta su crítica al positivismo precisamente muestra por qué los modelos son necesarios para la testabilidad de las teorías. Ahora añade que también lo son para “generalizar”, “extender” y “modificar si es necesario” dicha teoría. Para poder comprender por qué los modelos permiten esto es necesario señalar algunos aspectos de los modelos físicos que Hesse considera como “buenos”. En primer lugar, no hay una analogía perfecta entre los modelos y los fenómenos que representan: los “buenos” modelos tienen una “analogía positiva” y una “analogía negativa”<sup>22</sup>. La “analogía

---

<sup>21</sup> Ibid., p. 22. Estas características de los modelos son introducidas por Hesse en un artículo anterior a esta obra que dedica a analizar el método hipotético-deductivo. “*If a hypothesis is to be a satisfactory correlation of a group of experimental data, it must be possible to deduce the data from the hypothesis when the symbols in the latter are suitable interpreted. If the hypothesis is to be a useful instrument of further research, however, this is not the only requirement that it must satisfy. In addition it is necessary that the hypothesis itself should be capable of being thought about, **modified** and **generalized**, without reference to the experiments, so that it **can be used to predict future experience***”: Mary Hesse, "Models in Physics" *British Journal for the History of Science* 4, no. 15 (1953): p. 199. El subrayado es mío.

<sup>22</sup> En una obra posterior Hesse introduce la “analogía neutral”, Mary Hesse, *Models and Analogies in Science* (Notre Dame, Ind.: University of Notre Dame Press, 1966), pp. 87-97. Este término no aparece en *Forces and Fields* pero será tratado en el Capítulo 2 de este estudio en el que se realizará la revisión del Marco Conceptual de Hesse.

positiva” hace referencia a que hay cierta identidad de estructura entre el modelo y los fenómenos. La “analogía negativa” es la parte en la que la analogía entre el modelo y el fenómeno “falla”, es decir la parte en la que los elementos del modelo se consideran “parecidos” a los del fenómeno, pero no idénticos. La “analogía positive” de un modelo es la que permite “extender”, “generalizar”, partiendo de que el modelo “*is a system of entities and processes whose behavior is already known apart from the new experimental facts which is being used to explain*”<sup>23</sup>. Por ejemplo, si una teoría científica desarrollada, como la de teoría del flujo del calor, se constituye como modelo de una rama de la ciencia menos conocida, como la electrostática<sup>24</sup>, cualquier avance en la rama ya conocida del modelo puede ser extendida y testada a su vez en la más desconocida<sup>25</sup>.

La “analogía negativa” del modelo es la que permite contrarrestar, desde la postura de Hesse, la segunda afirmación del positivismo, a saber, que en la física moderna las teorías que explican fenómenos atómicos pueden desarrollarse en términos formales puramente matemáticos. ¿Por qué? Porque, de acuerdo

---

<sup>23</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 22.

<sup>24</sup> Esta analogía, entre el flujo de calor y la electrostática, fue establecida por Thomson (1824-1907) en su programático artículo de 1842: William Thomson, "On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies, and Its Connexion with the Mathematical Theory of Electricity." *Reprinted Philosophical Magazine*, 1954. (1842).

<sup>25</sup> En el ejemplo de Hesse, la rama menos desconocida sería la de la teoría de los gases.

con Hesse, las teorías matemáticas no son necesariamente formalismos sin interpretación, es decir, no son “*mere collections of signs combined in arbitrary axioms and permitting inference according to arbitrary rules*”<sup>26</sup> ya que los modelos físicos que dan paso a modelos matemáticos dejan “trazas” en las matemáticas que los han formalizado. Por ejemplo, el modelo físico del movimiento ondulatorio en un medio material solo pudo ser formalizado en términos de ecuaciones de ondas del movimiento fluido, y todo desarrollo matemático posterior en relación con dicho movimiento ondulatorio mantuvo las características de estas primeras ecuaciones asociadas al modelo, características diferentes al de otro tipo de ecuaciones<sup>27</sup>. Por tanto, cualquier sistema formal matemático que se constituya como teoría explicativa de los fenómenos a nivel atómico va a tener “trazas” interpretativas heredadas de explicaciones anteriores, de manera que no será nunca un sistema totalmente formal.

¿Es la propuesta de Hesse una propuesta realista *naïve*? Hesse afirma que no, que su propuesta es también una alternativa a la del realismo *naïve*. Esta diferencia se aclara a partir de la respuesta de Hesse a la pregunta que ella misma se plantea, a saber, ¿cómo de seriamente hay que tomarse el rol de los modelos en la física? La

---

<sup>26</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 23.

<sup>27</sup> Las ecuaciones de ondas son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que tienen características distintas a las ecuaciones integrales, por poner un ejemplo.

respuesta para la autora es clara: los modelos no pueden considerarse como una descripción real de los fenómenos precisamente porque su “utilidad” reside en que se fundamentan en una analogía que no es perfecta, sino que reside solo en ciertos aspectos que son los que anteriormente se han denominado ‘estructura’. Como se ha indicado, la estructura es lo que se puede abstraer del modelo y se corresponde con la parte positiva de la analogía: aquello que representa “*the extent of assured knowledge about the phenomena*”<sup>28</sup>. No obstante, conviene recordar que la parte negativa de la analogía no “muere” nunca completamente ya que deja “huellas” de su presencia, por ejemplo, en el lenguaje. Por ejemplo, una singularidad en el campo electromagnético se sigue denominando ‘partícula’ aunque ya no tenga el significado de objeto duro y esférico, como tuvo en su origen. El uso de ese término es una “traza” que ha dejado en el lenguaje el modelo de partículas del que hizo uso la electrodinámica a la hora de constituirse.

## **1.2. LA POSTURA DE HESSE EN EL DEBATE POSITIVISMO - REALISMO**

Una vez señalado en el epígrafe anterior el contexto del surgimiento de la propuesta de Hesse acerca de las explicaciones científicas como una alternativa a las propuestas del positivismo y

---

<sup>28</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 25.



del realismo, en este epígrafe se expondrá de un modo sistemático y recopilatorio la propuesta de Hesse secuenciando deductivamente las tesis implícitas en dicha propuesta.

**Primera tesis:** el positivismo considera como condiciones necesarias de las explicaciones, para que puedan ser consideradas científicas, la posibilidad de falsabilidad (que implica, a su vez, la testabilidad) y el hecho de que se confirmen sus enunciados observacionales. Pero estas condiciones no son suficientes. Hace falta, además, que dichas teorías cumplan también la condición de 'inteligibilidad'<sup>29</sup>, condición definida por Hesse como la propiedad de encarnar modelos de manera que dichas teorías puedan resultar significativas, puedan ser testadas y se puedan ampliar. En este sentido, Hesse amplía el significado de 'explicación', entendiéndola no solo como la capacidad de correlacionar fenómenos y de hacer predicciones, sino también como la capacidad de *entender*<sup>30</sup> las conexiones que hay en ellos.

**Segunda tesis:** una teoría no puede, por lo general, ser testada si se reduce a mero formalismo, aunque la propuesta positivo-formal de las teorías considere que se puede abstraer de cualquier modelo la parte que representa el conocimiento

---

<sup>29</sup> Hesse llega incluso a comparar los modelos con la poesía. Para ella los modelos serían la expresión metafórica cargada de connotaciones de lo que las matemáticas se describiría con lenguaje prosaico.

<sup>30</sup> Se subraya este término por ser el término exacto usado por Hesse.

sobre un fenómeno que este modelo asegura, y que el resto del modelo se puede desechar.

**Tercera tesis:** no se puede abstraer completamente un modelo puesto que lo que desde el positivismo se considera como desechable del mismo siempre deja “trazas”, ya sea en el tipo de matemáticas asociadas al modelo, o en las connotaciones del lenguaje con que dicho modelo se construyó.

**Cuarta tesis:** afirmar que la parte negativa de la analogía no se puede desechar no compromete con considerar que los modelos son meramente descripciones literales de los fenómenos, afirmación que sí se realiza desde el realismo *naïve*.

**Quinta tesis:** según Hesse, los modelos se introducen en un momento dado de la historia de la ciencia como “descripciones factuales”, descripciones que permiten hacer inteligibles los hechos, gracias tanto a lo que posteriormente se considerará como “analogía positiva”, como a lo que se tratará, al variar los hechos descritos por el modelo, como “analogía negativa”. En palabras de Hesse,

*“[a] model is intended as a factual description if it exhibits a positive analogy and no negative analogy in all respects hitherto tested, and if it has a surplus content which is in principle capable of test”<sup>31</sup>.*

---

<sup>31</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p.27. El subrayado es mío. Hesse destaca que “*in principle capable of test*” hace referencia a que dentro de una situaciones históricas en las que se está desarrollando una explicación científica que aún

A este tipo de modelos Hesse los denomina “modelos descriptivos” e indica que son los modelos propios de una postura realista. Pero afirma, además, que son un tipo de modelos necesarios para la práctica científica que, en el momento en el que se originan, se plantean con intención de ser realistas; y, posteriormente, pierden “analogía positiva” y ganan “analogía negativa” en la medida en que los hechos que el modelo explican van cambiando, es decir, dejan de ser descripciones “realistas literales”, para desempeñar el rol propio de los modelos en la ciencia, a saber, una convivencia entre una “analogía positiva” y una “analogía negativa” en un modelo “*intended as a factual description*” que permite que las teorías puedan ser testadas, generalizadas, modificadas, etc.

Los modelos descriptivos son especialmente importantes en la propuesta de Hesse. Si bien no son los únicos modelos de los que los estudiosos de los fenómenos naturales<sup>32</sup> han hecho uso a lo largo de la historia de la ciencia, sí son, de acuerdo con Hesse, los únicos que desempeñan un rol en las explicaciones científicas.

Los otros tipos de modelos que Hesse identifica en su análisis de la historia de la ciencia son los siguientes: ‘*archaic models*’,

---

no se ha agotado, todavía se puede expandir el modelo y su poder descriptivo/explicativo.

<sup>32</sup> Se utiliza esta terminología en vez de la de ‘científicos’ puesto que el análisis de Hesse se remonta hasta los estudios de los presocráticos.

'*analogue machines*', '*post hoc models*' y '*complementary models*'<sup>33</sup>. Conviene definir cada uno de ellos puesto que, en las diferentes épocas en las que se dieron, sí desempeñaron un papel primordial en las explicaciones (que no siempre eran científicas) que se daban de los fenómenos naturales. '*Archaic models*' son aquellos modelos que se utilizan deliberadamente, aún a sabiendas de que son falsos, porque son útiles para determinados propósitos. Por ejemplo, la mecánica newtoniana se puede considerar un '*archaic model*' porque, aún conciéndose en la actualidad que es falsa, se utiliza para la realización de cálculos mecánicos en escalas que no requieren la precisión de la mecánica relativista o la cuántica. Por su parte, los '*analogue machines*' son modelos construidos para simular ciertos aspectos de procesos naturales cuyas matemáticas son conocidas pero difíciles de tratar en ciertos casos<sup>34</sup>. Los modelos '*post hoc*' son probablemente los más "famosos" de la historia de la ciencia por su fuerte presencia en las explicaciones científicas del siglo XIX; son modelos que se inventan para hacer que las matemáticas asociadas a una teoría sean más fáciles de aplicar. Un ejemplo de modelo '*post hoc*' serían los modelos de

---

<sup>33</sup> Cfr. Hesse, *Forces and Fields*, pp. 26-27.

<sup>34</sup> El ejemplo que pone Hesse es el de los "*wind tunnels*". Las matemáticas asociadas a este fenómeno resultan tan complejas que, hasta en la actualidad, más de 50 años después de la publicación de la obra que de Hesse, siguen proponiéndose modelos para representarlo. Cfr. R. M. Rennie et al., "Mathematical Modeling of Wind-Tunnel Thermal Behaviour" *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 29, no. 3 (2015): doi:10.2514/1.T4444.

éteres mecánicos del siglo XIX; según Hesse, todo el contenido de estos modelos ya estaba recogido en las matemáticas que describían los fenómenos que estos explicaban y no contribuyeron a la ampliación de las teorías. Por último, los '*complementary models*' son aquellos que, como el modelo de onda-partícula de la física cuántica, se excluyen unos a otros en ciertos aspectos y, por tanto, la parte positiva de la analogía de cada uno de ellos solo es útil en los aspectos no limitados por su modelo complementario.

Como se ha señalado, aun siendo parte de los modelos que se detectan al analizar el cómo tiene lugar la ciencia a lo largo de la historia, Hesse sostiene que estos modelos no pertenecen al ámbito de las "explicaciones" científicas. Ese rol lo desempeñan solo los modelos "descriptivos" y más específicamente, un subtipo de éstos<sup>35</sup> que Hesse denomina modelos "fundamentales". Estos modelos son diferentes al resto de los modelos descriptivos puesto que son presupuestos por ellos y se consideran fundamentales solo en relación a un contexto histórico concreto. Según Hesse, el hecho de que sean más generales que el resto de los modelos descriptivos y que dependan del momento histórico (son "*period dependent*"),

---

<sup>35</sup> "A particular important class of descriptive models or theories in the science of any given period are those which may be called *fundamental*": Hesse, Forces and Fields, p.28. En esta afirmación se añade explícitamente, además, el componente de "dependencia" a los modelos que estaba implícito en el resto de sus afirmaciones. Así, para Hesse, los modelos se consideran fundamentales o no dependiendo de la época en la que se den. Es decir, son *period dependent*.

determina que no se puedan enmarcar en la jerarquía hipotética-deductiva en la que se suele considerar que se encuadran las teorías. Esto erige los modelos fundamentales como un tipo de modelos único, ya que su rol en la ciencia no se ejerce ni hipotética ni deductivamente.

Las propiedades específicas de estos modelos son uno de los aspectos más destacables de la propuesta de Hesse, puesto que estas propiedades los describen como desempeñando precisamente un rol poco convencional: los modelos fundamentales funcionarían, al mismo tiempo, como generalizaciones de bajo nivel, a partir de datos experimentales; hipótesis de alto nivel, a partir de las cuales –en conjunción con otras observaciones y generalizaciones– se pueden realizar predicciones y explicaciones; y reglas de inferencia de acuerdo con las cuales se siguen las deducciones a partir de las hipótesis.

### **1.3. INTENCIÓN DE LA MONOGRAFÍA**

En el epígrafe anterior se ha expuesto que, en *Forces and Fields*, Hesse presenta la teoría de los modelos como una teoría acerca de la naturaleza de la ciencia y de las explicaciones científicas. Esta teoría se revela como una alternativa a las teorías tanto positivistas como realistas en un sentido *naïve*. La teoría de los modelos, como se ha apuntado anteriormente, sostiene que los modelos son inherentes a las explicaciones científicas y son necesarios para que

dichas teorías sean testables e inteligibles. Además, se ha señalado que Hesse indica que son los modelos “fundamentales” (cuyas características se han descrito en el anterior epígrafe) los determinantes a la hora realizar un análisis histórico de la práctica de la ciencia porque estos dependen de la época en que se dan. Queda añadir dos aspectos más acerca de la obra de Hesse para esclarecer la intención de su obra.

El primer aspecto hace referencia a que Hesse, exceptuando en el Capítulo I de *Forces and Fields*, ‘*The Logical Status of Theories*’, que reserva a presentar los aspectos conceptuales que se han tratado en este trabajo hasta ahora, dedica el resto de su obra a realizar un análisis histórico de los tipos de acción en la historia de la ciencia, con preponderancia de los análisis de la acción física. Con este análisis acomete el proyecto de corroborar su teoría acerca de los modelos.

El segundo aspecto hace referencia al tema central de este trabajo, a saber, determinar el estatuto epistemológico de la transmisión de la acción. ¿Cuál es el vínculo de esta pregunta con la teoría de los modelos de Hesse y con el análisis de la historia de la ciencia que realiza en su obra? Según Hesse “*the mode of action of bodies upon each other is one of the general properties that such models exhibit*”<sup>36</sup>, siendo que en este contexto “*such*” hace referencia a los modelos fundamentales. Por tanto, cualquier respuesta acerca de

---

<sup>36</sup> Ibid., p. 28.

qué sean, qué estatus tengan, etc., la “acción a distancia” o la “acción por contacto” solo puede ser dada en términos de un modelo fundamental. La pregunta que surge a partir de esta afirmación es si es posible determinar algo acerca de la acción física si cualquier afirmación sobre ella está ligada a un modelo fundamental y este depende de la época en la que tiene lugar. Precisamente, la respuesta a esta pregunta es la que se encuentra de modo explícito en la intención con la que Hesse escribe su obra.

¿Cuál es esta intención? *Forces and Fields* se presenta como un estudio en el que se describen los modelos fundamentales que han surgido a lo largo de la historia de la ciencia prestando especial atención a las transiciones de unos a otros. Esta descripción permite determinar si dichos modelos satisfacen verdaderamente los criterios que los modelos deben cumplir, según Hesse, para ser considerados como explicaciones científicas, a saber, capacidad para generalizar, capacidad de ampliar conocimientos, capacidad de poder ser modificadas si es necesario, ser testables y ser inteligibles. Sin embargo, a lo largo de los nueve capítulos de análisis histórico, el análisis que, de hecho, se presenta en la obra no se centra en los modelos fundamentales en general, sino en el estatus de las acciones que dichos modelos fundamentales conllevan o permiten, a saber, las acciones a distancia o las acciones por contacto. Esto va a determinar las conclusiones de la obra las cuales se desvían de la intención inicial.



## 1.4. CONCLUSIONES DE LA OBRA

El capítulo de conclusiones de *Forces and Fields* no se consagra a determinar si su análisis de los modelos fundamentales a lo largo de la historia de la ciencia puede establecer de un modo definitivo la teoría de los modelos de Hesse como alternativa al positivismo y al realismo en cuanto que teorías de las explicaciones científicas. Aun siendo lo que cabría esperar, hay muy poco debate acerca de esta cuestión en las conclusiones de la obra. Partiendo de su análisis histórico afirma que tanto los modelos de acción por contacto como los modelos de acción a distancia son buenos modelos en el sentido de que son inherentes a las explicaciones científicas, ya que permiten que dichas teorías sean testables e inteligibles. Además Hesse subraya que las afirmaciones sobre la acción a distancia (del tipo “los cuerpos no pueden actuar donde no están”) y las afirmaciones sobre la acción por contacto (del tipo “no se deben postular entidades intermedias inobservables”), que se realizan en el contexto de sus respectivos modelos, han desempeñado en la historia de la física el rol de principios regulativos<sup>37</sup>. En este sentido, las afirmaciones acerca de la acción por contacto están conectadas con momentos de la historia en que la física se centra en objetivar y despersonalizar la naturaleza<sup>38</sup> y,

---

<sup>37</sup> Hesse usa el término ‘principios regulativos’ en un sentido kantiano. Introduce el término al tratar la concepción kantiana de impenetrabilidad de la materia. Cfr. *Ibid.*, p. 173-80.

<sup>38</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 291.

por tanto, están fuertemente vinculadas a los modelos mecánicos. Las teorías de la acción a distancia, en cambio, pueden tener un origen doble: o bien enunciarse como alternativas a las teorías de acción por contacto, o bien enunciarse para evitar cualquier sospecha de hipótesis injustificadas en términos de entidades intermedias.

Aunque Hesse presente ambos tipos de acciones como propias de uno de estos dos modelos (de acción a distancia o de acción por contacto) que surgen cada cierto tiempo en la historia de la ciencia<sup>39</sup>, da la impresión de que la autora considera que el estatus de los modelos de acción a distancia es controvertido ya que ve necesario incluir como corolario de lo anterior que los modelos de acción a distancia *“are not necessarily lacking in the content which makes them good models”* siempre y cuando *“are in intention factual descriptions and not merely heuristic devices”*<sup>40</sup>.

A raíz de poner el acento de las conclusiones en que los modelos de acción a distancia son equiparables como ‘buenos’ modelos a los de la acción por contacto, Hesse inicia un debate sobre las afirmaciones acerca de los modos de acción que va construyendo el argumento que le lleva a la afirmación que ella

---

<sup>39</sup> Destaca que los modelos de acción por contacto parecen haber tenido más presencia a lo largo de la historia porque han sido más predictivos. Ibid., pp. 293-94.

<sup>40</sup> Ibid., p. 292.

establece como conclusión final. Esta argumentación se articula del siguiente modo<sup>41</sup>:

1. Hay teorías que son, tomadas en su totalidad, factuales en el sentido de que tienen consecuencias que pueden ser testadas pero que pueden contener elementos individuales que no pueden ser testados.

2. Lo que se asume en una teoría acerca del modo de acción física es un tipo de elemento individual que no puede ser testado porque los dos posibles modos de acción física son posturas antitéticas (como el del átomo y el continuo, o el del determinismo y la libertad). Los debates acerca de este tipo de antítesis tienen una característica principal<sup>42</sup>: el debate muestra signos de alejarse progresivamente de posiciones empíricas cada vez que se demuestra la falsedad de una de sus posturas. En el caso concreto de los modelos de acción, la secuencia de alejamiento sería la siguiente:

- (a) La materia solo actúa por contacto, pero
- (b) parece ser que hay materia atrayéndose a distancia sin ningún medio aparente, por tanto

---

<sup>41</sup> Cfr. *Ibid.*, pp. 292-94.

<sup>42</sup> Hesse considera que una de las principales dificultades para detectar que el debate acción-a-distancia/acción por contacto es similar a los otros dos que indica es porque éste se ha tenido lugar principalmente en el contexto de la física y, por tanto, su carácter científico no se ha puesto en duda.

- (c) se postula la existencia de la materia sutil y sus propiedades, no obstante
- (d) se refutan estas propiedades, por lo que
- (e) el medio entre la materia que se atrae se define en términos de tensiones, de manera que la energía es la única propiedad material que hay en él, eso implica que
- (f) la acción, ha de ser continua, después de todo. Es decir, se vuelve a lo que se sostiene en (a) pero con una afirmación de carácter mucho más general.

3. Por tanto, cuando se afirma que la materia puede actuar a distancia o no puede actuar a distancia, no se está haciendo ningún tipo de aserción simple ni empírica. Ni siquiera metafísica, ya que Hesse subraya que, en su modo más general, tanto los enunciados que afirman que la acción a distancia es fundamental como los que afirman que lo es la acción continua, son no-confirmables y no-falsables. Puesto que esta afirmación es crucial para responder a la pregunta que plantea en el Prefacio acerca de si los cuerpos pueden actuar uno sobre el otro a través de la distancia, conviene detenerse en la explicación detallada que da Hesse sobre los enunciados acerca de los modos de acción.

3.1. Para Hesse, los enunciados sobre estos modos de acción en sus formas más generales son, respectivamente “toda acción entre cuerpos está compuesta de intervalos espaciales

indivisibles” y “toda acción entre cuerpos tiene lugar mediante una acción continua a través del espacio que se interpone entre ellos”.

3.2. Estos enunciados no se pueden confirmar ni falsar. Son vagos porque en ellos no se dice cómo reconocer la “verdadera” acción a distancia o la “verdadera” acción continua puesto que sus enunciados solo indican las condiciones en función de las que debe entenderse el concepto de espacio, y no las de los conceptos de acción por contacto o a distancia.

3.3. Es cierto que se pueden enunciar de un modo más preciso para que, si no pueden ser falsables, al menos sean confirmables. Por ejemplo “en toda acción aparentemente continua siempre hay discontinuidades ocultas” y “en toda acción aparentemente a distancia siempre hay una cadena de causas continuas oculta”. De esta manera, la primera se podría confirmar si se descubren “*gaps*” en la acción y la segunda si se descubren continuidades. Eso sí, no son falsables porque si no se encontraran “*gaps*” o no se encontraran las cadenas continuas, la existencia tanto de unos como de otras no sería desaprobada.

3.4. La interpretación de Hesse del estatus de estos enunciados más precisos la extrae de la que presenta el filósofo John Watkins acerca de los enunciados que son

confirmables e implican de un modo débil otro tipo de enunciados que pueden ser falsados. En su artículo *Confirmable and Influential Metaphysics*<sup>43</sup> se establece que dichos enunciados han de ser interpretados como “verdadero-o-falso” y, además, que comparten características con enunciados que se consideran como típicos de la metafísica (rasgos que hacen que no puedan ser falsables).

Por tanto, hasta el momento, las conclusiones establecidas por Hesse afirman que las teorías de modelos de acción pueden ser factuales en su totalidad pero tienen elementos individuales, a saber, los enunciados sobre los modos de acción, que son “verdadero-o-falso” y que comparten características con enunciados metafísicos. ¿Se solventa con estas conclusiones el problema de si la teoría de los modelos de Hesse es un alternativa a las teorías positivistas o realistas *naïve*? ¿Dan respuesta a la pregunta acerca de si los cuerpos pueden actuar unos sobre otros en la distancia?

La respuesta a la segunda pregunta es un no rotundo. De hecho, el último párrafo de *Forces and Fields*, que se expone a continuación, lo afirma directamente. Además, como veremos, este mismo párrafo responde con un “no” a la primera pregunta, ya que en dicho párrafo, que se presenta como una síntesis final de la

---

<sup>43</sup> Cfr. J. W. N. Watkins, "Confirmable and Influential Metaphysics" *Mind* 68, no. 267 (1958).

obra, no trata sobre el debate de la naturaleza de las teorías científicas.

El texto con el que Hesse cierra su monografía es el siguiente:

*“Our discussion has **not enabled** us to answer the question ‘Do bodies act at a distance’ – this in any case is not the business of the philosophy of science. It has **not enabled** us to show that physics itself gives a definite answer, because although we have maintained that physical theories are asserted as facts, the problem of action at a distance is not so much a problem of particular theories as of metaphysical frameworks. This discussion has, however, enabled us to compose some variations on a theme: namely, the historical, heuristic, and logical importance for physics of ideas and assumptions commonly called metaphysical”<sup>44</sup>.*

Este último párrafo resulta enigmático en su contenido, puesto que no se sigue de un modo directo de todo lo expuesto anteriormente. Es más, se podría decir que es un párrafo que parece haber sido añadido *a posteriori*. En primer lugar, porque este párrafo se sitúa al final del último subepígrafe de las conclusiones, –subepígrafe dedicado a los aspectos teóricos de la percepción extrasensorial<sup>45</sup>–, debate totalmente desligado del resto del contenido de la obra. Dicho subepígrafe se añade como una suerte de corolario final en el que se indica que no se puede dejar de dar cuenta del reto que la parapsicología plantea a los axiomas de la física acerca de la acción a distancia, y no trata más temática que las condiciones de posibilidad de la parapsicología. Al finalizar esta cuestión se inserta como último párrafo, sin relación alguna

---

<sup>44</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 303. El subrayado es mío.

<sup>45</sup> *Theoretical Aspects of Extrasensory Perception*. Ibid., pp. 295-303.

con el anterior, el texto que se ha indicado. Y con dicho párrafo concluye la monografía.

El contenido del último párrafo, como se ha puede observar, hace saber al lector que la pregunta con que se abre el Prefacio no ha podido ser respondida, que la física no da una respuesta definitiva al tema sobre la acción, y que esto no resulta problemático puesto que no es una pregunta propia de la filosofía de la ciencia. También informa de que, a la largo de la obra, las teorías físicas han sido reivindicadas como hechos, pero que el problema de la acción a distancia no es un problema de teorías sino de marcos metafísicos. Y por último, afirma que lo que se ha logrado en *Forces and Fields* es una variación de lo que se pretendía y por tanto, lo que se puede afirmar finalmente es que hay cierto tipo de asunciones, consideradas metafísicas por lo general, que son importantes para la física.

Varias preguntas surgen de modo natural al leer este párrafo como conclusión de una monografía que en su Prefacio y en su Capítulo I planteaba hipótesis muy específicas y de gran interés. ¿Por qué, dedicándose a la filosofía de la ciencia, Hesse escribe una monografía a titulada *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*, la cual se centra en una pregunta que no pertenece, según ella, a la filosofía de la ciencia? ¿Por qué lo único que señala acerca de las teorías científicas es que se afirman como hechos, sin mencionar nada sobre el debate acerca de qué teoría sobre las explicaciones científicas (el positivismo, el realismo



*naïve* o la teoría de modelos) es la que mejor da cuenta de la naturaleza de las teorías científicas –tal y como presentó en el Capítulo I– contestando “no”, de este modo, a la pregunta que se ha indicado con anterioridad? ¿Qué son los “marcos metafísicos”, con los que se asocia ahora el problema de la acción? ¿Es una verdadera aportación el afirmar que las ideas consideradas como metafísicas han sido de valor para la ciencia, teniendo en cuenta que esta afirmación hace referencia a toda la historia de la ciencia y negar dicha afirmación dificultaría bastante dar cuenta de la historia de la ciencia hasta el siglo XIX?

Resulta difícil, si no imposible, responder a estas últimas preguntas solo desde la lectura de *Forces and Fields*. Especialmente, como se ha señalado ya, por la falta de conexión directa con la temática del resto de la obra y por el lugar en el que se sitúa. La única pregunta sobre la que se puede aportar algo de claridad desde el texto de *Forces and Fields* es la pregunta acerca de los “marcos metafísicos”. Por suerte, es el concepto que Hesse conecta con el tema del estatus de la acción, que es el tema que compete a este estudio.

El término ‘marcos metafísicos’ aparece en *Forces and Fields* por primera vez como parte del título del capítulo que recoge las conclusiones de la obra, ‘*The Methaphysical Framework of Physics*’. No obstante, como se ha descrito, dicho capítulo no versa sobre este concepto de un modo claro. De hecho, exceptuando en el título, el término ‘marco metafísico’ no aparece en el texto más que

en el párrafo que se ha citado. Sí que se pueden encontrar, por otra parte, algunos conceptos con los que Hesse asocia dicho marco cuando la autora comenta la postura de Watkins acerca de los enunciados 'verdadero-o-falso'. Como se ha señalado, Watkins considera que dichos enunciados comparten rasgos con enunciados que se consideran como típicos de la metafísica. Pero, para Hesse, ese compartir dichos rasgos hace que el que estos enunciados puedan ser considerados como confirmables no puede tomarse como un criterio formal *"to distinguish between those metaphysical assertions which are **scientifically** acceptable and those which are not"*<sup>46</sup>, quedando descartada para ella la propuesta de Watkins.

Es en este contexto en el que Hesse hace uso, por primera vez en las conclusiones, de su concepción de los 'modelos fundamentales'. Según Hesse, la aceptación de un modo de acción depende del modelo fundamental que se considere explicativo en el momento en que esa aceptación se esté considerando; y los modelos fundamentales de cada época se eligen en función de criterios tan variados como sistemas metafísicos, correspondencia con las teorías confirmadas en un dominio o la simplicidad del modelo propuesto en comparación con los otros. Finalmente concluye, justo antes de comenzar el epígrafe sobre percepción extrasensorial:

---

<sup>46</sup> Ibid., p. 294. El subrayado es mío.

*“The problem of theory-construction is not that of excluding metaphysics, but of finding a sufficiently comprehensive framework of concepts within which specific theories can be proposed and tested”<sup>47</sup>.*

¿Queda con esto aclarado a qué hace referencia Hesse cuando habla de ‘marcos metafísicos’? No, pero al menos evidencia con qué conceptos se relacionan, a saber, los modelos fundamentales por un lado y, por otro, un marco conceptual que sea lo suficientemente comprehensivo para que las teorías que recoja sean científicas (entendido esto como ‘puedan ser testadas’) del cual no se excluye necesariamente la metafísica siempre que el marco en cuestión cumpla los requisitos mencionados.

¿Qué estatuto epistemológico corresponde, por tanto, a los modelos de la acción, de acuerdo con Hesse en su capítulo de conclusiones? Tanto este tema como todas las cuestiones que anteriormente han quedado abiertas se tratarán con detalle en las conclusiones de este estudio. No obstante, por ahora, conviene señalar que del estatus epistemológico de la acción según Hesse se puede afirmar lo siguiente: las teorías sobre la acción (ya sean la de acción por contacto o la de acción a distancia) pueden dar lugar a “buenos” modelos y puede considerarse que, en su intención, son descripciones de los hechos y no solo recursos heurísticos; pero, aunque contienen algunas consecuencias que pueden ser falsables, tienen elementos que no lo son (como es el caso de los modos de

---

<sup>47</sup> Ibid., p. 295.

acción, a saber la acción a distancia y la acción por contacto) y, por este motivo, los enunciados y afirmaciones sobre los modos de acción se consideran metafísicos. Por otro lado, los modelos fundamentales, que son modelos que se consideran explicativos en un momento dado en función de un posible conjunto de criterios como, por ejemplo la simplicidad del modelo, son los que establecen, para cada época, qué teoría puede ser aceptable en tanto que científica, por lo que se podría decir que son los modelos fundamentales los que podrían determinar en cada momento qué teoría de modos de acción se considera científica y cuál metafísica, si fuera el caso. Sin embargo, Hesse, como hemos visto, estableció desde un primer momento que una de las propiedades generales exhibidas por los modelos fundamentales es el tipo de modo de acción entre cuerpos, por lo que la relación modos de acción/modelos fundamentales no es lo suficientemente clara como para sacar consecuencia de ella. Así, al margen de los modelos fundamentales, los enunciados y, por tanto, las teorías de los modos de acción, se consideran metafísicos. Y en relación con los modelos fundamentales, no se puede afirmar qué estatus tienen puesto que la relación entre ambos conceptos no está clara.

¿Cómo seguir avanzando? Antes que nada conviene analizar los diferentes modelos fundamentales que Hesse identifica a lo largo de la historia de la ciencia. Hesse sostiene que los modelos fundamentales que se consideran explicativos llegan a ser tales en función de diversos criterios, que son los que se pueden

determinar mediante el análisis de la práctica científica. Por este motivo, en el próximo epígrafe se analizarán dichos modelos fundamentales en función de los tres roles que según Hesse desempeñan: generalizaciones de bajo nivel, hipótesis de alto nivel y reglas de inferencia.



## CAPÍTULO 2. LOS MODELOS FUNDAMENTALES

*En este capítulo se analizan las diversas enumeraciones de los “modelos fundamentales” que Hesse presenta en su obra, proponiendo una tipología unificada. Al mismo tiempo, se distinguen estos de las analogías y los modelos matemáticos. Posteriormente se presentan, a la luz de lo expuesto por Hesse, los rasgos principales de los periodos de la historia de la ciencia que se corresponden con las analogías, los modelos fundamentales y los modelos matemáticos de la física moderna. Finalmente se analizan qué teorías sobre los modos de acción están vinculadas a cada uno de ellos.*

### 2.1. LOS MODELOS FUNDAMENTALES A LO LARGO DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA SEGÚN MARY HESSE

No resulta fácil realizar un análisis de los modelos que Hesse considera fundamentales a lo largo de la historia de la ciencia. En primer lugar, porque las veces que aparecen nombrados en su obra los modelos fundamentales, no coinciden las clasificaciones. En segundo lugar, porque algunos de los modelos fundamentales que aparecen nombrados no se tratan como tales en ningún otro lugar de la obra. En tercer lugar porque en su relato histórico Hesse utiliza vagamente los términos ‘analogía’, ‘modelo’ y ‘teoría’<sup>48</sup>:

---

<sup>48</sup> De hecho, al presentar por primera vez el término ‘modelos fundamentales’ como una clase de los modelos descriptivos, el texto, que se encuentra en la

unas veces en sentido estricto, otras como equivalentes entre sí y otras en un sentido general que no permite determinar si con ello se implica alguna equivalencia con alguno de los otros términos. Y, por último, porque de los modelos que se indica más de una vez que son fundamentales<sup>49</sup>, no se indica explícitamente cómo se han de entender aplicados a ellos los rasgos que, según Hesse, los definen, a saber, generalizaciones de bajo nivel, hipótesis de alto nivel y reglas de inferencia.

### 2.1.1. Determinación de los modelos fundamentales

En *Forces and Fields* solo se pueden encontrar dos enumeraciones explícitas de los modelos fundamentales. La primera se encuentra precisamente en el párrafo del Capítulo 1 en el que se introducen dichos modelos, se exponen sus características y se plantean como ejemplos los siguientes modelos: “átomos de Demócrito”, “las partículas atractivas y repulsivas de Newton”, la

---

página 28, es el siguiente: “*A particular important class of descriptive models or theories in the science of any given period are those which may be called fundamental*” (El primer subrayado es mío; el segundo, del texto). Esto podría llevarnos a considerar los términos ‘teoría’ y ‘modelo’ como sinónimos si no fuera porque justo en el párrafo anterior (pp. 27-28) define la inteligibilidad como “*The property of theories of embodying models...*”. Puesto que esta última distinción terminológica es recurrente en *Forces and Fields* mientras que la equiparación como sinónimos no vuelve a establecerse explícitamente en otro lugar, en este estudio se entienden ambos términos como diferentes cuando se usan en la obra en sentido estricto.

<sup>49</sup> Aunque algunas veces aparezcan con nombres distintos se puede determinar por el contexto que son los mismos. Se mencionan estos casos más adelante.



“electrodinámica clásica” y la “electrodinámica cuántica”<sup>50</sup>. La segunda vez se encuentra 73 páginas después, cuando se describe la influencia que las teorías físicas del siglo XVII tienen en los desarrollos de la física en los siglos subsiguientes. De acuerdo con Hesse, tres “modelos” surgen en esa época y han sido “*fundamental in physics ever since: particle motion, wave motion, and gravitational attraction*”<sup>51</sup>. Esta última enumeración es la única sistemática de las dos por lo que, a continuación, se analizará el papel que estos desempeñan realmente en el relato de Hesse de la historia de la ciencia.

El primero de los modelos aquí mencionado, el denominado ‘*particle motion*’, vuelve a ser citado solo una vez más como modelo en el capítulo dedicado a la filosofía corpuscular (Capítulo V). Al final de dicho capítulo se describe la filosofía mecánica del filósofo natural Robert Boyle (1627-1691). Esta vez con otra terminología<sup>52</sup> a

---

<sup>50</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 23.

<sup>51</sup> *Ibid.*, p. 101.

<sup>52</sup> Cuando se menciona por primera vez, Hesse denomina a este modelo “movimiento de partículas”. La segunda vez, con la denominación “materia-en-movimiento” podría no estar haciéndose referencia al mismo modelo, puesto que la materia puede o puede no ser “partículas”. De hecho, el mismo Boyle, al comenzar su escrito sobre las hipótesis de la mecánica, indica que esta filosofía es diferente a la de los epicúreos (que sería la de partículas denominadas “átomos”) y a la de los cartesianos (para los cuales la materia sería un continuo). Cfr. Robert Boyle, “About the Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis (Publ. 1674).” in *Selected Philosophical Papers of Robert Boyle*, ed. M. A. Stewart (Indianapolis, IN.: Hackett Publishing Company, 1991), pp. 138-39. No obstante, se puede considerar que Hesse sí

la que usa en la enumeración, Hesse señala que se ha de entender que en los principios de la mecánica de Boyle (o, “corpuscularismo” en términos de Boyle) todos los tipos de cambio presuponen el modelo de “*matter-in-motion*”<sup>53</sup>.

Un segundo modelo, el denominado ‘*gravitational attraction*’, aparece mencionado una vez más en el Capítulo VI dedicado a la teoría de la gravitación. En él son presentadas las diversas propuestas de Newton (1643<sup>54</sup>-1727) sobre los fenómenos naturales; al final del capítulo se señala que la “teoría de la gravitación” puede ser considerada como un modelo, puesto que tienen las características propias de los mismos. En este caso, aunque los términos usados para referirse al modelo no sean los mismos (‘*gravitational attraction*’ y ‘teoría de la gravitación’), la equivalencia no parece cuestionable. No obstante, conviene señalar que en la primera enumeración de modelos fundamentales que realiza Hesse se menciona también un modelo relacionado con Newton, a saber, el modelo de “las partículas atractivas y

---

que realiza una equivalencia entre ambos términos al incluir el modelo de Boyle en el capítulo sobre el corpuscularismo.

<sup>53</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 116.

<sup>54</sup> En relación a Newton se pueden encontrar dos fechas oficiales de nacimiento, el día de Navidad de 1642 y el 4 de Enero de 1643. Se adopta aquí esta última puesto que es la correspondiente al Calendario Gregoriano y, por lo tanto, consistente con el resto de fechas que se indican). En Inglaterra dicho calendario no fue adoptado hasta 1752, por lo que biografías de Newton escritas con anterioridad a dicho año recogen el 25 de diciembre de 1642 como la fecha de nacimiento de Newton.

repulsivas de Newton". La equivalencia terminológica en este caso no solo no es evidente sino que implica una ampliación de lo que se consideraría como modelos fundamentales, ya que las partículas repulsivas no pertenecen, en un sentido canónico, a la teoría de la gravitación expuesta por Newton. Estas partículas, en cambio, sí que aparecen en otras obras de Newton que no se consideran parte de su teoría de la gravitación, como la *Óptica*<sup>55</sup>. Bien es cierto, por otra parte, que los desarrollos posteriores del newtonianismo sí que incluyeron este tipo de partículas con el propósito de aplicar la teoría de la gravitación a otros campos. Atendiendo a esta circunstancia, es decir, desde la interpretación posterior de la obra de Newton, en este estudio se contemplarán los tres términos ('*gravitational attraction*', 'teoría de la gravitación' y 'las partículas atractivas y repulsivas de Newton') como haciendo referencia a un solo modelo fundamental.

El último modelo que aparece en la enumeración sistemática de Hesse es el que denomina '*wave motion*'. Sin embargo, es imposible encontrar en el resto de la obra de Hesse una alusión directa a este modelo<sup>56</sup>. No obstante, si se tiene en cuenta que las características

---

<sup>55</sup> Cfr. Isaac Newton, *Opticks, or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light, Great Mind Series* (New York: Prometheus Books, 2003), Query 31, pp. 355-56.

<sup>56</sup> Se ha señalado anteriormente que una de las dificultades para identificar cuáles son los modelos que Hesse considera fundamentales es el uso ambiguo que Hesse realiza de otros términos, como 'teoría', a la hora de hacer su relato de la historia de la ciencia. El caso del "*wave motion*" es un caso especialmente claro. Primeramente se introduce como modelo.

del movimiento de las teorías de los fluidos elásticos que surgieron en la segunda mitad del siglo XVIII son similares a las del “*wave motion*” –ya que en ambas se entiende el movimiento como vibraciones en un medio–, sí que se puede encontrar otra alusión a este modelo. Además, en otro momento, Hesse señala que las teorías de los fluidos elásticos son, en el siglo XVIII, “*inteligible models*”<sup>57</sup>. De este modo, se puede entender el modelo “*wave motion*” como el modelo fundamental que engloba las explicaciones físicas que consideran que el movimiento es una vibración de un medio.

Esta clasificación de los tres modelos se ve reforzada si se considera la estructura de los capítulos de la obra de Hesse. La enumeración sistemática de los tres modelos considerados “*fundamentals*” tiene lugar al comienzo del Capítulo V, dedicado a la teoría corpuscular. El Capítulo VI recoge el análisis de Hesse acerca de la Teoría de la Gravitación. Y, el Capítulo VII, ‘*Action at a distance*’ atiende a gran variedad de teorías de filósofos pero presenta como principales teorías físicas las relacionadas con los fluidos elásticos. Puesto que en el Capítulo VIII se produce un cambio de temática, resulta adecuado considerar que, con esta

---

Posteriormente se indica la existencia de una “*wave theory*” para explicar el fenómeno de la luz, a saber, la propuesta por Huygens (1629-1695). Y, finalmente “*wave theory*” vuelve a mencionarse a la hora de presentar la teoría de la luz de Young (1773-1829). En cambio, el término ‘*wave*’ no aparece en ningún texto que trate acerca de modelos.

<sup>57</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 187.

estructura expositiva, Hesse pretendía ser consistente con su enumeración de los modelos fundamentales.

Queda aún dar cuenta de los otros tres modelos que aparecen mencionados por Hesse como fundamentales cuando realiza su enumeración de ejemplos de los dichos modelos en el Capítulo I. Estos tres modelos son “átomos de Demócrito” (a), “la electrodinámica clásica” (b) y la electrodinámica cuántica” (c).

(a) “**Átomos de Demócrito**”. No resulta sencillo comprender por qué Hesse propone “átomos de Demócrito” como modelo fundamental<sup>58</sup>. Esto se debe a dos motivos, en primer lugar a que en el resto de su obra Hesse no usa la terminología ‘modelos’ hasta que comienza su análisis de la historia de la ciencia del siglo XVII: solo usa el término ‘analogía’. En segundo lugar porque cuando trata en el Capítulo II las explicaciones que los griegos dan de los fenómenos naturales afirma que hay una “*great variety of analogues used in mythology and in Greek natural philosophy*”<sup>59</sup> y no presenta ninguna de ellas como predominante. Si bien es cierto que, como se ha indicado, Hesse no utiliza siempre los términos analogía y modelo de un modo preciso –algunas veces los utiliza como equivalentes,

---

<sup>58</sup> Digno de ser subrayado es el hecho de que, en el texto de Boyle al que se ha hecho referencia en la nota 51, la mención que hace Boyle en relación a la filosofía griega es usando el término ‘epicureano’. Sin embargo, en el parafraseo de dicho texto que Hesse realiza en la página 117, el término que se atribuye a Boyle es ‘*Democritan atoms*’.

<sup>59</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 30.

---

mientras que otras los usa con un sentido más restrictivo —, el uso del término analogía en los Capítulos II a IV de *Forces and Fields* no es casual. El uso del término ‘analogía’ es, en este caso, un uso consistente, ya que no se alterna en ningún momento con el término ‘modelo’ en ninguno de los capítulos dedicados a la historia de la ciencia anterior al siglo XVII<sup>60</sup>. También es consistente con la concepción de Hesse de que sí hay un razonamiento propio de los modelos científicos y que ese razonamiento es explicativo, y no solo ilustrativo o heurístico. De acuerdo con esta concepción, los modelos tienen que ver con la ciencia y tienen que ver con el hecho de dar una explicación. Pero en la historia de la ciencia anterior al siglo XVII, estas dos condiciones no se dan. En primer lugar, porque con anterioridad a dicho siglo no hay ciencia en sentido estricto: hay explicaciones de los fenómenos naturales. En segundo, porque estas explicaciones no hacen uso de modelos y analogías para convertirse en tales. En su obra *Models and Analogies in Science* Hesse subraya precisamente que la relación

---

<sup>60</sup> La primera vez que aparece de nuevo el término ‘modelo’ es en la página 101, perteneciente ya al capítulo sobre el corpuscularismo del siglo XVII. Es más, si bien en el índice de términos se indica la existencia de una instancia del término ‘modelo’ (en concreto ‘modelo mecánico’) en la página 52, página que se corresponde con el capítulo dedicado a la ciencia en la antigua Grecia, dicho término no aparece. Sí que aparece, en cambio, el de analogía (en concreto, ‘analogía mecánica’).

de las analogías en este periodo no es similar al uso que se hace de ellas y de los modelos con posterioridad.

*"In classical and medieval logic, on the other hand, there is a certain amount of analysis of types of analogy, **but practically no attempt at justification of the validity of analogical arguments** (...and don't) bear much resemblance to analogy as used in reasoning from scientific models"<sup>61</sup>.*

La consistencia en el uso exclusivo del término 'analogía' en los capítulos anteriores al que trata acerca del siglo XVII, y el hecho de que con anterioridad a dicha fecha Hesse no considere que se pueda hablar de modelos, nos permite descartar los "átomos de Demócrito" como modelo fundamental. Sin embargo, el punto de inflexión que marca el siglo XVII en la obra de Hesse y el hecho de que en el Prefacio la autora indique que vio necesario ser más extensa en sus explicaciones acerca de la historia de la ciencia del período pre-científico<sup>62</sup>, hacen necesario un análisis, aunque sea breve, del rol que otorga a las analogías durante este periodo.

(b) "La **electrodinámica** clásica". Hablar de la "electrodinámica clásica" como un ejemplo de modelo fundamental es algo comprensible desde el punto de vista de una posible clasificación temporal de los modelos fundamentales por ser la electrodinámica clásica la teoría que se asocia principalmente con el siglo XIX. No obstante, considerar "la electrodinámica

---

<sup>61</sup> Hesse, *Models and Analogies in Science*, p. 57. El subrayado es mío.

<sup>62</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. vi.

clásica” como modelo fundamental es difícilmente compatible con la enumeración sistemática de los modelos que Hesse realiza, la cual se ha analizado con anterioridad. ¿De dónde proviene esta dificultad? De que la electrodinámica clásica comparte rasgos y es deudora de los tres modelos de la otra enumeración aunque sin agotar ninguno de ellos. Por el momento este punto no se desarrollará más puesto que se tratará extensamente en el Capítulo IV de este estudio. Baste decir que al margen de su presencia en la enumeración de ejemplos no hay ningún texto más que avale el estatus de “la electrodinámica clásica” como modelo fundamental.

(c) La “**electrodinámica cuántica**” considerada como modelo fundamental, aunque por su similitud nominal pueda no parecerlo, es compatible con la enumeración sistemática de modelos fundamentales expuesta por Hesse. Esto es así por dos motivos. En primer lugar, porque las teorías cuánticas, electrodinámica, mecánica, gravitación, etc., que Hesse trata en el Capítulo X, *‘Modern Physics’*, no tratan los fenómenos físicos como procesos de causalidad física, mientras que tratarlos como tales se presupone en los tres modelos fundamentales que se enumeran en la clasificación sistemática; por tanto, dichos modelos y la “electrodinámica cuántica” como modelo fundamental no son comparables entre sí, ya que no pretenden dar cuenta del mismo tipo de procesos y, por tanto, carece de



sentido decir que son incompatibles ya que pertenecen a diferentes esferas explicativas. Y en segundo lugar porque algunas de las teorías cuánticas incorporan simultáneamente el contenido teórico fundamental de los modelos “*wave-motion*” y “*particle-motion*” en lo que se conoce como la concepción dual de la materia ‘onda-corpúsculo’ postulada en 1924 por De Broglie (1892-1987)<sup>63</sup>, descrita en términos matemáticos en 1926 por Schrödinger (1887-1961)<sup>64</sup> y base de la un gran número de teorías físicas cuánticas; en este sentido, en todo caso se podría considerar que la “electrodinámica cuántica” se habría constituido como modelo fundamental relegando a los otros tres modelos a ser solamente descriptivos. No obstante, aunque no sea incompatible con la clasificación sistemática de Hesse de los modelos, el primero de los motivos que se ha aducido para justificar su compatibilidad también determina el motivo por el que en este estudio no se considerará la “electrodinámica cuántica” como modelo fundamental, a saber, los procesos que representaría, si lo fuera, no serían físicamente causales y, por tanto, no serían “*intended as a factual descriptions*”, es decir, no serían modelos descriptivos, tipo al que necesariamente pertenecen los modelos fundamentales.

---

<sup>63</sup> Cfr. Louis De Broglie, "Recherches Sur La Théorie Des Quanta" *Annales de Physique* 10, no. 3 (1925): p. 30.

<sup>64</sup> Cfr. Erwin Schrödinger, "Quantisierung Als Eigenwertproblem" *Annalen der Physik* 384, no. 4 (1926).

¿Cuáles son, por tanto, los modelos fundamentales que Hesse postula en *Forces and Fields*? En sentido estricto los que la autora expone en su enumeración sistemática. Pero antes de indicar los rasgos fundamentales de dichos modelos y sus diferencias con los modelos que no enumera como tales conviene detenerse a clarificar el uso del término ‘mecanicismo’, del que Hesse hace profuso uso en su análisis de los modelos.

### **2.1.2. ¿Por qué el mecanicismo no es un modelo fundamental?**

En sentido estricto el mecanicismo hace referencia a lo que la tradición historiográfica<sup>65</sup> que estudia la Revolución Científica del siglo XVII ha descrito como el modo propio de las explicaciones de los fenómenos naturales en dicha época, a saber, un arquetipo de explicación de los procesos naturales en función de cambios debidos a causas externas y no a poderes causales internos que explicaciones de siglos anteriores le atribuían. Los filósofos naturales de este periodo solo tenían en cuenta dos categorías a la hora de explicar el comportamiento de los fenómenos físicos, a

---

<sup>65</sup> Acerca de la forja de la concepto de ‘mecanicismo’ cfr. Edwin Arthur Burtt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science* (New York: Dover Publications, 2003).; H. Floris Cohen, *The Scientific Revolution: A Historiographical Enquiry* (Chicago: Chicago University Press, 1994)., E.J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, trans. C. Dikshoorn (Oxford: Oxford University Press, 1961). y Richard S. Westfall, *The Construction of Modern Science; Mechanisms and Mechanics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1978).

saber, la materia y el movimiento.

No todas las formulaciones denominadas Filosofía Mecánica eran equivalentes. Sin embargo, aunque surgieron distintas variantes de esta Filosofía, se puede sostener que todas tenían el objetivo común de eliminar la materia de las ‘formas’ y ‘cualidades’ con las que la Escolástica la había impregnado. Entre las diversas propuestas surgidas en el XVII las dos formulaciones individuales principales, y las de mayor influencia, son las filosofías desarrolladas por René Descartes (1596-1650) y por Pierre Gassendi (1592-1655): un mecanicismo del continuo y un mecanicismo corpuscularista respectivamente. En el marco de estas dos formulaciones surgen los tres modelos fundamentales que Hesse presenta en su obra. En concreto, el modelo “*wave theory*” es un modelo mecánico del continuo y los modelos “*particle theory*” and “*gravitational attraction*” son dos modelos mecánicos corpuscularistas (cinemático y dinámico<sup>66</sup> respectivamente). Todas las analogías de las que se hacía uso en los siglos XVII-XIX eran de

---

<sup>66</sup> Las primeras formulaciones del mecanicismo reducían las explicaciones de los fenómenos naturales exclusivamente en función de los parámetros ‘tamaño’, ‘forma’ y ‘movimiento’ (cinemática). No obstante, después del Renacimiento, estos parámetros resultaron ser insuficientes para dar cuenta de las interacciones entre cuerpos y se incluyeron en las explicaciones principios activos, como por ejemplo las fuerzas newtonianas. Para un análisis detallado de las limitaciones del mecanicismo del siglo XVII cfr. Alfred Rupert Hall, *From Galileo to Newton, 1630-1720* (New York: Dover Publications, 1981), pp. 218-20.

un solo tipo, la analogía del mecanismo. Pero anteriormente no había sido así.

El problema físico de cómo unos cuerpos actúan sobre otros es un problema fuertemente vinculado a la posibilidad de distinguir lo material de lo inmaterial. Esta distinción, a su vez, permite establecer una visión de la naturaleza de acuerdo a la cual los fenómenos naturales solo tienen lugar ateniéndose a unos patrones de interacción<sup>67</sup>. De este modo, para dar cuenta de estos fenómenos solo las analogías y modelos pertenecientes al orden de lo inanimado pueden ser seleccionadas como explicativas.

La diferenciación entre lo material y lo inmaterial, sostiene Hesse, fue gradual y progresiva y tuvo lugar durante el periodo que la autora denomina 'ciencia antigua'<sup>68</sup>. Concretamente su origen se encuentra en la ciencia y los métodos con que los griegos antiguos trataban de dar explicaciones alternativas a las explicaciones mitopoiéticas<sup>69</sup> de los procesos naturales. Estas explicaciones alternativas tendían a presuponer alguna entidad

---

<sup>67</sup> *"If the prohibition against action at a distance is expressed in its medieval form: 'matter cannot act where it is not', clearly the problem as to whether this is true or not becomes definite only when we know what is meant by 'matter'": Hesse, Forces and Fields, p. 49.*

<sup>68</sup> *Ibid.*, p. 30.

<sup>69</sup> *En el pensamiento mitopoiético anterior a la ciencia antigua no se diferenciaba lo material de lo espiritual: "It is not that nature is deliberately personified in primitive belief, or that human and animate categories are imposed upon experience of the non-human and inanimate, it is rather that nature is directly experienced as dynamic relationship, and no ultimate distinction between personal and impersonal, animate and inanimate is conceived at all": Ibid., p. 35.*

intermedia que llevara los “poderes” desde el emisor de las “acciones” al receptor de las mismas. Esta presuposición, a su vez, obligaba a preguntarse qué clase de “eventos” intermedios se podían contemplar. O, en palabras de Hesse, “*if something has to travel through the space between agent and recipient, what is the nature of that something?*”<sup>70</sup>, cuestión que se convierte en significativa, como se ha señalado, solo cuando lo material se distingue de un modo explícito de lo no material, o al menos cuando ciertas clases o grados de materia se reconocen.

Los filósofos atomistas (siglos V y IV a.c.) realizaron una primera distinción entre las funciones conscientes de la vida y las que no lo son<sup>71</sup>, asignándose las primeras solo a un grupo de sustancias en vez de a todo tipo de sustancias –a diferencia de los filósofos jónicos que no consideraban que la naturaleza tenía conciencia y vida. Hesse señala, concretamente, que con los atomistas el concepto de “cambio” como “generación” se sustituye por una teoría mecánica y geométrica de las formas y de cómo se disponen los átomos en el que la acción se comunicaba a través de tirones (“*pulling*”) y empujes (“*pushing*”) gracias a unos “ganchos”.

---

<sup>70</sup> Ibid.

<sup>71</sup> Para un estudio detallado del pensamiento de Demócrito y Leucipo y de su filosofía en relación con la del resto de escuelas de la antigua Grecia cfr. David Furley, *The Greek Cosmologists. Volume I. The Formation of the Atomic Theory and Its Earliest Critics* (Surrey: Cambridge University Press, 1987), especialmente pp. 115-46.

Para poder llegar a esta teoría, es decir, para determinar que las cualidades propias de los cuerpos y las partículas son las cualidades geométricas y mecánicas, la influencia de Pitágoras (siglo VI a.c.) y de Parménides (siglo V a.c.) fue determinante. Según Hesse, el primero, con su búsqueda de la armonía en el universo llega a establecer que las propiedades de las cosas son reducibles a las propiedades de los números<sup>72</sup> (germen de la teoría geométrica). El segundo, quien sostiene que lo real es impenetrable y percedero, habría puesto los cimientos de lo que se consideran las cualidades de los cuerpos según la teoría mecánica, a saber, la impenetrabilidad y la transmisión de la acción (este último puesto que el único modo de cambio posible para Parménides es el movimiento).

Una vez que los atomistas han definido con claridad la materia, se distinguen ya dos órdenes con propiedades diferentes: el de lo material y el de lo espiritual. Pero esto no determinó, en la ciencia antigua, que el tipo de analogías de las que se hacía uso a la hora

---

<sup>72</sup> Hesse recoge textos de Pitágoras de los que no se menciona la fuente de la que proceden. Ha sido posible localizarlos en la obra que Sir Thomas Heath publicó en 1921, *A History of Greek Mathematics*. En ella se recopilan textos de los filósofos griegos que trataron acerca de la matemática. El texto que Hesse atribuye a Pitágoras se puede encontrar en la página 67 de esta obra como citado por Aristóteles. Sir Thomas Heath, *A History of Greek Mathematics. Volume I. From Thales to Euclid*, vol. I (Mineola, N. Y.: Dover Publications, 1981). En dichos textos lo que se afirma es que las cosas “son” o “son como” los números. No obstante Hesse, como se indica en el texto, interpreta estos textos como afirmando que son “las propiedades de las cosas” las que son reducibles a “propiedades de los números”, cfr. Hesse, *Forces and Fields*, p. 45.

de describir los fenómenos naturales fueran analogías del orden de lo material. Todo lo contrario, desde la ciencia antigua los fenómenos naturales se describían en términos de analogías diseñadas a partir de cualquier tipo de proceso que resultara familiar en la época, como el habla, los fueles, o la brujería<sup>73</sup>. Incluso, a veces, diseñaban analogías a partir de explicaciones mitopoiéticas. De hecho, tal y como señala Hesse

*“the crucial tests for a mechanical theory of matter which seemed to them to justify the analogies were **not experimental**, but **rational**, that is, the theory itself had to be seen as self-consistent, and if this were so, it needed to have only the most vague and general correspondence with the physical world”<sup>74</sup>.*

El principal exponente de este tipo de racionalidad es Aristóteles (382 a. C. - 322 a.C.) En palabras de Hesse

*“In the discussion of mechanical causation which Aristotle does give, he is content to **assume that all things are what they seem**, and to **generalize from what some things seem to what all things are**. If bodies appear to our observation to be homogenous and indefinitely divisible, the homogeneous and divisible they are, and these are the properties which have to be explained. If it appears to common experience that all kinds of change involve locomotion, them locomotion must be a universally indispensable aspects of change, and if all the most obvious processes that we experience seem to involve a causal agent in contact with the patient, then this too must always be the case, even*

---

<sup>73</sup> Para un análisis detallado de las analogías utilizadas por los filósofos griegos cfr. G.E.R. Lloyd, *Polarity and Analogy. Two Types of Argument in Early Greek Thought*. (London: Cambridge University Press, 1966), especialmente el Capítulo IV. Metaphor and imagery in Greek Cosmological, pp. 210-303.

<sup>74</sup> Hesse, *Forces and Fields*, pp. 59-60. El subrayado es mío.

*if, as in the case of vision and the flight arrows, the mechanism is not immediately obvious*"<sup>75</sup>.

Es más, Hesse afirma también que el principio aristotélico de que el agente debe estar en contacto con el paciente para que se transmita la acción no es un pensamiento al que se llega gracias a un argumento filosófico contundente<sup>76</sup>, puesto que entre sus justificaciones de este principio están presentes nociones tanto de analogías mecánicas como de analogías orgánicas (algo, como precisamente se ha señalado, distintivo de la ciencia antigua). En cambio, sí que tuvo influencia en la ciencia del siglo XVII la preeminencia que Aristóteles otorgaba a la locomoción entre los tipos de movimientos<sup>77</sup>, preeminencia que va a mantenerse en la gran mayoría de las teorías mecánicas de dicho siglo.

¿Por qué conviene aclarar que el mecanicismo en sí mismo no es un modelo? Porque la misma Hesse lo plantea como tal en el párrafo conclusivo del capítulo en el que trata la teoría corpuscular, párrafo en el que se explicita el esquema con el que

---

<sup>75</sup> Ibid., pp. 72-73.

<sup>76</sup> Una posición discrepante sobre la figura de Aristóteles como estudioso del movimiento se puede encontrar en Jean De Groot, *Aristotle's Empiricism: Experience and Mechanics in the Fourth Century B.C.* (Las Vegas: Parmenides Publishing, 2014), especialmente pp. 51-81.

<sup>77</sup> Para un análisis de la cinemática de Aristóteles en la que se trata acerca del rol paradigmático de la locomoción en el pensamiento aristotélico y de la influencia de este rol el resto de su obra cfr. J. Michael White, *The Continuous and the Discrete. Ancient Physical Theories from a Contemporary Perspective.*, Reprint in 2002 ed. (Oxford: Oxford Clarendon Press, 1992), especialmente pp. 7-132.



Mary Hesse ha estructurado su análisis histórico de los modelos de un modo más claro que en el resto de su obra:

*“The transition to **the seventeenth-century world-model** is instructive, for, as we shall see later, an important question for modern physics is whether all future theories must be built upon the **foundations of this model**, or whether a new transformation of the **fundamental analogy** can take place, comparable with those from mythological animism to Aristotelianism, and from both to **mechanism**. Such a transformation would however be more fundamental than the dispute about contact action and action-at-a-distance, **for the classic instance of this dispute**, as we shall now see, took place wholly within the terms of the **analogy of matter-in-motion**”<sup>78</sup>.*

Las principales ideas que este párrafo recoge son centrales para establecer un marco de análisis de los modelos que Hesse considera como fundamentales. Estas ideas son:

- 1 El paso del animismo mitológico al aristotelismo es equivalente al paso de ambos al mecanicismo.
2. Se entiende como mecanicismo el modo de explicar los fenómenos naturales desde una concepción de lo físico consistente en materia y movimiento.
3. El debate sobre los modos de acción tal y como se plantea en la obra de Mary Hesse, lo que en el texto se denomina “caso clásico de esta disputa” tiene lugar en el contexto de los términos del mecanicismo.

---

<sup>78</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 125. El subrayado es mío.

En el epígrafe anterior se ha hecho hincapié en que la clasificación de los modelos fundamentales que Hesse elabora no es explícita y se analizaron las dos enumeraciones que se recogen en su obra. Faltaba aún incorporar los términos de este párrafo para completar dicho análisis. En este párrafo se introducen en conexión con el término ‘modelos fundamentales’ los términos ‘animismo mitológico’, ‘aristotelismo’ y ‘mecanicismo’. El que el animismo mitológico no puede ser un modelo fundamental resulta evidente al no ser no pretender ser, si quiera, una explicación racional. El aristotelismo puede, a su vez, ser también descartado como tal siguiendo la misma argumentación con que en el epígrafe anterior se descartó el modelo de los “átomos de Demócrito”. El mecanicismo, en cambio, pertenece al núcleo central del enfoque de Hesse acerca del debate sobre la transmisión de la acción. Pero al situarlo en el texto como el paso siguiente al aristotelismo<sup>79</sup> (que a su vez es el paso siguiente al animismo mitológico), y como el paso anterior a la física moderna, el considerarlo como un “*world-model*” (término utilizado al inicio de dicho texto) y no como un

---

<sup>79</sup> Teniendo en cuenta que anteriormente Hesse había hablado del modelo “átomos de Demócrito” haciendo referencia a la época de la ciencia antigua y que, como se ha ido exponiendo en este subepígrafe, Hesse sostiene que toda la ciencia antigua tiene en común la falta de interés por las corroboraciones empíricas, se sobreentiende que en este texto Hesse no quiere hacer referencia con el término ‘aristotelismo’ solo a la teoría aristotélica, sino a toda la ciencia antigua que fue recibida en épocas posteriores cuyos principales aportaciones se consideran recopiladas en la doctrina de Aristóteles.

modelo fundamental resulta más consistente con el resto de los expuesto en la obra.

Por todo lo expuesto anteriormente, el análisis de los modelos fundamentales de Hesse del subepígrafe anterior se estructurará del siguiente modo. En primer lugar se expondrán los tipos de analogías pre-científicas del “*world-model*” de los siglos IV a.C a XVI d.C periodo en que las explicaciones de los procesos naturales no se realizaban aún exclusivamente en el “marco teórico” de la “materia en movimiento”<sup>80</sup>. A continuación se enunciarán brevemente<sup>81</sup> los modelos fundamentales del “*world-model*” mecánico, a cuyo ámbito pertenece por excelencia el debate sobre la transmisión de la acción (siglos XVII-XIX<sup>82</sup>). Finalmente se

---

<sup>80</sup> Hesse hace referencia a estos términos (“*matter-in-motion model*” y “*theoretical framework*”) en relación con el mecanicismo al estudiar los principios de Boyle. Hesse, *Forces and Fields*, p. 116.

<sup>81</sup> Esta exposición será breve puesto que estos son los modelos que se analizarán más adelante.

<sup>82</sup> Este periodo es el que se conoce comúnmente como el periodo de la física clásica. “*What is now termed classical physics is an unbroken line of continuous development lasting roughly 300 years, which began in earnest with Galileo, Newton and others and culminated in the completion of analytical dynamics, Maxwell’s theory of electromagnetic field and the inclusion of optics as a consequence of the latter by Hertz. I we also include Boltzmann’s statistical interpretation of the second law of thermodynamics, the list of what constitutes the major parts of classical physics will be fairly complete*”: Walter Heitler, “The Departure from Classical Thought in Modern Physics” in *Albert Einstein Philosopher-Scientist*, ed. Arthur Schilpp (New York: MJF Books, 1970), p.181. La estructura del mundo clásico dice que lo que ocurre en el mundo exterior sigue un desarrollo estrictamente causal gobernado por leyes estrictas del espacio tiempo. Y el espacio tiempo en el que ocurren los eventos es el espacio tiempo absoluto de Newton.

presentarán los modelos matemáticos, los característicos del último “*world-model*” señalado por Hesse, el de la “física moderna”. Estos últimos modelos son los predominantes desde el último tercio del siglo XIX en adelante y, por tanto, posteriores a la época en la que se dan los términos del debate sobre la acción. No obstante, aunque estos términos ya no estén presentes, los conceptos de ‘acción a distancia’ y ‘acción por contacto’ siguen estando presentes en dicha época, aunque con un contenido distinto, como se presentará más adelante.

## **2. 2. ANALOGÍAS Y MODELOS FUNDAMENTALES DE *FORCES AND FIELDS***

Al presentar su obra, Mary Hesse indica, “*I have selected for most detailed discussion those periods of transition in fundamental physics in which new concepts and ideas have been introduced and made scientifically testable*”<sup>83</sup>. Precisamente la estructura de este subepígrafe se centrará en determinar cuáles son las analogías y modelos propios de dichos períodos.

### **2.2.1 Analogías y explicaciones pre-científicas**

Como se ha señalado en el subepígrafe anterior, la ciencia antigua hacía uso de gran variedad de analogías, no habiendo por parte de los pensadores griegos ningún interés en el uso de un tipo

---

<sup>83</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. ii.

específico de las analogías excluyendo al resto de los tipos. Esta arbitrariedad en el uso de las analogías se debe, como ya se ha señalado anteriormente, a que el principal interés de estos pensadores no era dar una explicación detallada de los procesos y fenómenos naturales, sino dar cuenta de la naturaleza de la realidad de un modo consistente e inteligible.

Hesse también justifica otro de los principales motivos del uso que los griegos hicieron de las analogías señalando la importancia que las concepciones antropomórficas tenían en los desarrollos conceptuales del periodo pre-científico:

*“Its chief concern was to understand man, and nature in relation to man, rather than nature as an objective and independent existent in which man is subordinate and dependent. **Physical processes, when they were considered at all, were used as incidental illustrations of general metaphysical concepts.** It was more important to understand how form inhered in matter and how the soul was related to the body than to have accurate theories of flight of projectiles or the action of the vacuum, and because **metaphysical explanations tend to be comprehensive rather than specialized and detailed, anthropomorphic and organic analogies flourished**”<sup>84</sup>.*

De este modo, los principales de tipos de analogías de que se hacían uso en este periodo provenían de la mitología, de fenómenos de la naturaleza no humana, de funciones del cuerpo humano y de funciones que se observaban en la estructura de la sociedad. Entre las analogías más recurrentes en las explicaciones de la ciencia antigua se encuentran las siguientes: la “analogía del

---

<sup>84</sup> Ibid., p. 75. El subrayado es mío.

organismo”<sup>85</sup>, la “analogía de la atracción”<sup>86</sup>, la “*analogy of speech*”<sup>87</sup>, las “analogías de la actividad humana”<sup>88</sup> y las analogías a partir de los artefactos humanos, que eran las más cercanas a los planteamientos mecanicistas posteriores.

## 2.2.2 La época de los modelos fundamentales

La “época del mecanicismo”, de la “ciencia clásica”, la “primera Revolución científica”... todos estos términos hacen referencia al periodo de la ciencia más “física” que se ha dado. Se inicia en el siglo XVI, aunque no se puede hablar con propiedad de su existencia hasta el siglo XVII; las figuras con las que se asocia tienen una gran resonancia en el mundo de la física (Galileo, Newton, etc.); se caracteriza por sus métodos (el método empírico, el método hipotético-deductivo, etc.) y es la época de los modelos fundamentales de Mary Hesse. Esto es así precisamente porque en

---

<sup>85</sup> Según la cual el fenómeno a explicar se consideraría que operaba como un organismo: “*Nature is alive, reproductive and self-moving. This conceptions as used in scientific explanations is what I shall called the ‘analogy of organism’*”: Ibid., p. 31.

<sup>86</sup> Se establecía a partir de la observación de fenómenos familiares como la antipatía y la simpatía entre hombres, y que estaba fuertemente influida por la magia y brujería.

<sup>87</sup> Esta analogía hace referencia a la influencia que las órdenes que un gobernante articula mediante sus palabras son un verdadera fuerza que actúa a distancia sin un medio aparente

<sup>88</sup> Un ejemplo de este tipo de analogías puede encontrarse en Aristóteles, *Física*, 250a. En este pasaje trata dar cuenta de la aporía de Zenón estableciendo una analogía con el modo en que los marineros de un barco consiguen traerlo a tierra.

este periodo las explicaciones físicas no se habían reducido completamente a formulaciones matemáticas, como ocurrirá en la ciencia moderna, pero es un periodo en el que los fundamentos de la ciencia clásica ya estaban presentes (al contrario que en la ciencia antigua). Estos son: la formulación de teorías de manera que pudieran ser refutadas mediante test empíricos, la búsqueda de la precisión matemática y la admisión únicamente de las cualidades mecánicas y geométricas como cualidades de la materia. Pero, en la época de los modelos fundamentales, sobre todo, porque los modelos mecánicos que se tratarán en este epígrafe son los modelos que realmente pueden desempeñar rol que Hesse otorga a dichos modelos.

Los tres modelos mecánicos (en el sentido amplio de lo que anteriormente se ha identificado como “mecanicismo”) son los tres que Hesse establece en sus enumeraciones y que se han determinado en el epígrafe anterior: “*particle motion*”, “*wave motion*”, and “*gravitational attraction*”. A continuación se expondrán sus características principales y, en el caso del modelo “*gravitational attraction*” se detallará la teoría newtoniana de manera que las necesarias alusiones a ella en capítulos posteriores puedan ser contextualizadas.

### 2.2.2.1. El corpuscularismo como modelo fundamental

El modelo fundamental “*particle motion*” de Hess es el que se conoce comúnmente como el modelo corpuscularista<sup>89</sup>. Sus características principales se recogen en el Capítulo V de la obra de Hesse titulado ‘*The Corpuscular Philosophy*’. De acuerdo con este modelo solo se admitirían en física como fundamentales aquellas acciones que producen o tienden a producir el movimiento de locomoción. Además, solo se admitirían como causas del cambio en los cuerpos aquellas que se comunican desde fuera, no aceptándose ningún poder interno de los cuerpos o tendencia para ello.

Este modelo sostiene que todos los cambios físicos se producen *realmente*<sup>90</sup> por la materia en movimiento y supone un avance con

---

<sup>89</sup> Vanzo presenta una definición actual de lo que se entiende por corpuscularismo: “*a view on explanatory natural philosophical principles, namely the view that physical phenomena should be explained in terms of the shape, size, and spatial arrangement of the particles that make up physical bodies, along with the motion of such particles according to the laws of nature*”: Alberto Vanzo, "Corpuscularism and Experimental Philosophy in Domenico Guglielmini's 'Reflections' on Salts" in *The Idea of Principles in Early Modern Thought*, ed. Peter R. Anstey (New York: Routledge, 2017), pp. 148-49. Ver también Vanzo, "Corpuscularism and Experimental Philosophy", Nota al pie 7, p. 163. “*This characterization combines (a) a commitment to corpuscles with (b) a commitment to explaining phenomena in terms of matter moving according to the laws of nature. One can endorse (a) without endorsing (b) and vice versa.*”

<sup>90</sup> El subrayado es de Hesse, *Forces and Fields*, p. 145. Este rasgo de realidad del modelo es tan patente que Hesse llega afirmar que dicho modelo es una especialización del lenguaje ordinario, ya que es muy poco abstracto y muy cercano a los enunciados observacionales. “*Ordinary language contains the necessary concepts for describing matter in motion, and their reference is clear; the*



respecto a modelos similares de épocas anteriores en que el modelo corpuscularista del XVII tiene una referencias empíricas claras, puesto que las teorías que se desarrollan en su contexto se diferencian de las que hacen uso de otros modelos en que se formulan de manera que pueden refutarse mediante test empíricos. Además, el modelo corpuscularista se caracteriza por la búsqueda de una simplicidad entendida como la incorporación tanto de conceptos matemáticos simples –los procedentes de la geometría– como de que cualidades mecánicas fueran descritas en el menor número posible de variables matemáticas. Las tres grandes figuras que desarrollaron este modelo, de acuerdo con Hesse, son Descartes, Thomas Hobbes (1588-1679) y Boyle.

La aportación de Descartes a este modelo consiste en que, con su diferenciación entre la substancia extensa y la substancia pensante, introduce un modelo explicativo que, por primar vez, es detallado y comprensivo. Descartes lleva al atomismo de Gassendi (cuya distinción entre materia y espíritu no era tajante<sup>91</sup>) a su máximo exponente y señala que las únicas cualidades de los cuerpos que se pueden percibir clara y distintamente son la forma,

---

*corpuscular theories are therefore not only intelligible in themselves, but also have a clear reference to empirical situations": Hesse, Forces and Fields, pp. 124-25.*

<sup>91</sup> Acerca de la concepción de "alma corporal" de Gassendi cfr. Emily Michael, "Renaissance Theories of Body, Soul, and Mind" in *Psyche and Soma. Physicians and Metaphysicians on the Mind-Body Problem from Antiquity to Enlightenment*, ed. John P. Wright and Paul Potter (New York: Oxford University Press, 2000), pp. 165-67.

el tamaño y el movimiento. De acuerdo con Descartes, todos los fenómenos físicos naturales, incluidos los de los animales, se pueden explicar de manera deductiva a partir de esas dichas cualidades únicamente<sup>92</sup>. Además, como se verá al tratar los modos de acción propios de este modelo. Descartes postula un *plenum* de materia por lo que dichos fenómenos solo pueden ser explicados en términos de torbellinos de materia, comúnmente conocidos como vórtices.

Thomas Hobbes y Boyle son los otros dos filósofos naturales cuyas teorías Hesse adscribe a este modelo en su origen. Hobbes habría dado el paso que Descartes no dio afirmando que solo hay un tipo de substancia, la materia, y que la mente no es una substancia sino una función de la materia en movimiento como cualquier otro tipo de cualidades de los cuerpos: “ser” para Hobbes, significa “ser cuerpo”<sup>93</sup>. De Boyle Hesse afirma que su obra debería ser considerada el manifiesto mecanicista<sup>94</sup>: en ella Boyle trata de establecer mediante la experimentación los modos de movimiento que dan cuenta de los diferentes procesos físicos teniendo en cuenta que los fenómenos del mundo se producen solo

---

<sup>92</sup> La exposición detallada de cómo toda la física se puede deducir de estos principios se encuentra en René Descartes, *Principia Philosophiae* (Amstelaedami: Ludovicum & Danielelem Elzevirios, 1644).

<sup>93</sup> Thomas Hobbes, *Elementorum Philosophiae Sectione Prima De Corpore* (Londini: Crook, Andrea, 1655), Pars 2, p. 71.

<sup>94</sup> Robert Boyle, *The Works of Robert Boyle*, ed. Michael Hunter and Edward B Davis, 14 vols. (London: Pickering & Chatto, 1999).

por afecciones de la materia siguiendo las leyes de la mecánica. Entre otras cosas Boyle afirma que ninguna explicación puede tener menos de dos principios y que los más primitivos son precisamente materia y movimiento, ya que estos son comprensivos y pueden dar cuenta de los fenómenos a nivel macroscópico y microscópico. Lo que Boyle afirma es que “[w]hatever detailed hypothesis may be found to correspond with the facts, it must be reducible to matter-in-motion- and cannot contradict it”<sup>95</sup>.

#### 2.2.2.2. Las fuerzas centrales como modelo fundamental

El modelo fundamental “*gravitational attraction*”, que Hesse presenta en su Capítulo VI ‘*The Theory of Gravitation*’, es un modelo mecánico cuyo origen se encuentra en la obra de Newton *Principia Mathematica*<sup>96</sup>, obra en la que Newton establece las leyes del movimiento y la ley de la gravedad. Este modelo se conoce generalmente como el modelo de las fuerzas centrales precisamente porque las fuerzas con las que Newton da cuenta de la gravedad son fuerzas centrales, es decir, fuerzas que se dirigen siempre hacia o desde un punto P a otro punto O y solo dependen de la distancia entre dichos puntos.

---

<sup>95</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 115.

<sup>96</sup> Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, ed. S. Pepys, 1 ed. (Londini: Jessu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater, 1687).

---

Un estudio detallado de este modelo es necesario puesto que durante los dos siguientes siglos se trató de extender a todos los fenómenos naturales<sup>97</sup> y puesto que introduce una serie de novedades con respecto al modelo anterior que supusieron un antes y un después a la hora de explicar los fenómenos físicos<sup>98</sup>. Estas novedades son las que trajo consigo la obra de Newton: la introducción del concepto de fuerza en las explicaciones mecanicistas y la matematización de las explicaciones de los fenómenos naturales<sup>99</sup>.

Si bien, como se ha señalado en el epígrafe anterior, en sus orígenes el mecanicismo ya comenzaba ya a incluir conceptos

---

<sup>97</sup> Ya el mismo Newton consideraba que los *Principia* eran el modelo que deberían seguir el resto de los fenómenos en los que había fuerzas involucradas, como la luz, la electricidad o el magnetismo. De hecho, su otra gran obra, *Opticks*, de 1704 responde en parte a esa búsqueda de una formulación deductivo-matemática de las leyes que rigen los fenómenos relacionados con la luz, aunque no llegó a alcanzar el nivel de desarrollo en esa línea que había obtenido en los *Principia*. Isaac Newton, *Opticks: Or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. Also Two Treatises of the Species and Magnitude of Curvilinear Figures* (London: Sam Smith & Benjamin Walford, 1704).

<sup>98</sup> "Relativitäts und Quantenmechanik bilden die Grundlagen des modernen Weltbildes, wie die Newtonsche Mechanik das Fundament der klassischen Naturwissenschaft ist und bleiben wird. In diesem Sinne kann man sagen, daß die Naturwissenschaft mechanistisch und das Weltbild mechanisiert geblieben ist": E.J. Dijksterhuis, *Die Mechanisierung Des Weltbildes* (Heidelberg: Springer-Verlag, 1956), p. 501.

<sup>99</sup> Un análisis exhaustivo de la especificidad de la matematización de la física por parte de Newton puede encontrarse en la Parte Primera "The Newtonian Revolution and the Newtonian Style" de I. Bernard Cohen, *The Newtonian Revolution: With Illustration of the Transformation of Scientific Ideas* (Cambridge: Cambridge University Press, 1980), pp. 3-154.

matemáticos en su oposición a la metafísica de la substancia de Aristóteles, este no era totalmente ajeno a las consideraciones filosóficas, como puede deducirse del hecho de que sus las principales figuras del mecanicismo del XVII, exceptuando a Boyle, son prominentes filósofos. En cambio, el modelo mecánico que propuso Newton en sus *Principia* era principalmente matemático, no filosófico y suponía una clara distinción con los modelos mecánicos del siglo XVII. De hecho, el mismo título de la obra de Newton, *Principia Mathematica*, se presenta en oposición a la obra de Descartes, *Principia Philosophiae*. El fin de Newton era contraponer su Filosofía Natural inductiva y matemática a la Filosofía Natural deductiva de Descartes estableciendo lo que Pulte ha denominado “*the science of the (mathematical) laws of (natural) motion*”<sup>100</sup>.

La exposición de la doctrina de las fuerzas de Newton se inicia en las consideraciones sobre fuerzas entre colisiones de los escritos dinámicos de su *Waste Book*, cuaderno en el que, desde 1664<sup>101</sup>,

---

<sup>100</sup> Helmut Pulte, "Order of Nature and Orders of Science. On the Mathematical Philosophy of Nature and Its Changing Concepts of Science from Newton and Euler to Lagrange and Kant" in *Between Leibniz, Newton and Kant: Philosophy and Science in the Eighteenth Century*, ed. Wolfgang Lefèvre (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001), p. 62.

<sup>101</sup> La única fecha que aparece en los escritos dinámicos del *Waste Book* se encuentra en un margen que reza “Jan. 20th, 1664”, que en la notación actual corresponde al año 1665. Acerca de las variaciones en los calendarios de entre 1500 y 1700 cfr. J. Bruce Brackenridge, *The Key to Newton's Dynamics: The Kepler Problem and the Principia. Containing an English Translation of Sections 1, 2, and 3 of Book One from the First (1687) Edition of Newton's Mathematical*

Newton escribía borradores y notas variadas, y en el que también realizaba cálculos<sup>102</sup>. En el *Waste Book* se constata que Newton consideraba la fuerza como aquello que producía un cambio en el movimiento<sup>103</sup>. En este sentido, la presencia del concepto de 'fuerza' en la obra newtoniana tiene un origen estrictamente mecanicista, ya que los modelos mecánicos son aquellos que dan cuenta del movimiento y de sus leyes.

Es importante señalar, en este punto, que el concepto de 'fuerza' no es similar a los conceptos físicos que con anterioridad a Newton, habían sido utilizados para explicar los fenómenos naturales como la 'masa' o la 'distancia'. La diferencia se encuentra en que la fuerza no es algo medible directamente, por lo que Newton estableció que su valor debía ser determinado a partir de los efectos que producía. Por este motivo los primeros estudios de Newton se centraron en las colisiones, fenómeno que le permitía comparar diferentes medidas de fuerzas comparando los cambios de movimiento que estas producían en un determinado tiempo. El método que diseñó para ello consistía en idealizar el concepto de fuerzas de colisión reduciendo el intervalo de colisión a 0 logrando

---

*Principles of Natural Philosophy* (Berkeley: University of California Press, 1996).

<sup>102</sup> Cambridge University Library, Department of Manuscripts and University Archives, *The Portsmouth Collection* MS Add. 4004. Earl of Portsmouth, *A Catalogue of the Portsmouth Collection of Books and Papers Written by or Belonging to Sir Isaac Newton* (Cambridge: Cambridge University Press, 1888).

<sup>103</sup> Isaac Newton, "Waste Book" in *The Portsmouth Collection*. ULC. MS. Add. 4004 (Cambridge: c. 1664), p. 12, Axioma 103.

así un “impulso instantáneo”. La direccionalidad de este “impulso instantáneo” se introducía estableciendo que la acción de la fuerza motriz era en la misma dirección del cambio de movimiento<sup>104</sup>.

Durante este mismo periodo, la matematización que es característica de los estudios de Newton empezaba ya a perfilarse en sus análisis del movimiento circular. Explicar este tipo de movimiento era un paso necesario para poder explicar los fenómenos naturales relacionados con órbitas. Para ello, Newton hizo uso de tres aproximaciones matemáticas: la aproximación poligonal, la aproximación parabólica y la medida circular<sup>105</sup>. Cada una de ellas suponía una conceptualización distinta de las fuerzas que dan lugar al movimiento circular.

Los principales comentaristas de los primeros escritos<sup>106</sup> de Newton están de acuerdo en que a principios de la década de 1660 Newton consideraba que el movimiento circular era causado por una “tendencia” a alejarse del centro de la órbita del movimiento, es decir, en términos de lo que Huygens denominaba fuerza

---

<sup>104</sup> Para un análisis crítico de la teoría de las fuerzas de Newton cfr. Richard S. Westfall, *Force in Newton's Physics: The Science of Dynamics in the Seventeenth Century History of Science Library* (London: Macdonald and Co and American Elsevier, 1971).

<sup>105</sup> Brackenridge identifica esta última aproximación como lo que actualmente se conoce como método de la curvatura. Cfr. J. Bruce Brackenridge, "Newton's Mature Dynamics: A Crooked Path Made Straight" in *Isaac Newton's Natural Philosophy*, ed. Jed Z. Buchwald and I. Bernard Cohen (Cambridge, Mass.: M.I.T. Press, 2004), p. 106.

<sup>106</sup> I. Bernard Cohen (1914-2003), Alfred Rupert Hall (1920-2009) y Richard S. Westfall (1924-1996).

centrífuga, a saber, una fuerza que se alejaría del centro y que equilibraría a otra que se dirigiría hacia él. Esta concepción del movimiento circular aún basada en el modelo cartesiano<sup>107</sup> se refleja en la aproximación poligonal. La aproximación poligonal es utilizada por Newton por primera vez en una entrada del *Waste Book*. Mediante este método la curva que describe el movimiento a estudiar es aproximada a partir de un segmento de línea recta. Según Newton, para realizar la aproximación poligonal hay que partir de una trayectoria que consista en un cuadrado inscrito en un círculo. En cada vértice de este cuadrado, una bola golpea el círculo con una fuerza hacia fuera y es empujada hacia atrás como en una colisión perfectamente elástica. De este modo, el equilibrio de fuerzas se generaría por la colisión (fuerza que se aleja del centro) y la fuerza de reacción generada (fuerza que se dirige hacia el centro). Newton aumenta el número de lados hasta que forma un polígono de  $n$  lados y finalmente convierte  $n$  en infinito de manera que el polígono se convierte en una fuerza que actúa continuamente.

En 1666 Newton ya analizaba el movimiento circular desde una aproximación parabólica tal y como consta en un manuscrito

---

<sup>107</sup> Descartes ilustra el movimiento circular como el movimiento de una Honda: si uno hace girar una piedra con una honda la sensación es de que la piedra saldría alejándose del centro si no fuera por la cuerda que la mantiene. Descartes, *Principia Philosophiae*, p. 56.



conocido como el "*Vellum Manuscript*"<sup>108</sup>, (ya que las notas manuscritas de Newton estaban en el reverso de un documento legal escrito en pergamino de vitela, *vellum* en inglés), pero que actualmente es conocido como "*On Circular Motion*" precisamente por hacer uso del análisis del movimiento circular para calcular la aceleración centrífuga de un cuerpo en el ecuador de la Tierra. Esta aproximación suponía un cambio conceptual con respecto a la anterior puesto que la aproximación poligonal era estática (producida por un equilibrio de las fuerzas) y se realizaba desde un segmento de la línea recta, mientras que en la aproximación parabólica el movimiento se debe a una fuerza desequilibrada – que produce aceleración– y a un componente tangencial, y se realiza aproximándose a un elemento de una curva circular en la vecindad de un punto. Si la aproximación poligonal estaba influida por los trabajos de Descartes, esta aproximación se basa en los trabajos de Galileo, quien había demostrado que una velocidad inicial combinada con una aceleración constante daba lugar a una curva parabólica<sup>109</sup>. En resumen, en la aproximación parabólica, por tanto, la fuerza ya no se consideraba como una "tendencia" hacia al exterior.

---

<sup>108</sup> Isaac Newton, "Vellum Manuscript" in *UCL MS Add. 3955-4007/ Add. 3958.3 45-47* (Cambridge: 1666).

<sup>109</sup> En el caso del análisis de Newton, la velocidad tangencial es considerada como velocidad inicial y la fuerza constante que actúa a lo largo del radio desde el centro del círculo al punto considerado es considerada como la aceleración constante.

---

En lo que se refiere al método de curvatura, como señala Herivel, en el *Waste Book* se halla un texto sobre el movimiento circular que parece indicar que Newton estaba ya por aquel entonces considerando el método de la curvatura. El texto es el siguiente:

*"If the body b moved in an Ellipsis that its force in each point (if its motion in that point bee given) [will?] be found by a tangent circle of Equal crookedness with that point of the Ellipsis"*<sup>110</sup>.

Siguiendo a Brackenridge<sup>111</sup>, el método de curvatura emplea el concepto de curvatura desarrollado por Newton para medir el "grado de doblez" de una curva. Tal concepto provenía de una técnica en la que el círculo tangente a una curva en un punto mediría lo que Newton llamaba "crookedness", es decir, la curvatura. Como el círculo tangente a una curva en un punto tiene las mismas derivadas primeras y segundas en el punto de la curva cuya curvatura se está midiendo, resultaba muy útil para el estudio de las secciones cónicas, y concretamente en este caso, de la elipse.

Como se ha señalado, en el *Waste Book* Newton consideraba las fuerzas como instantáneas, como el caso del impulso. En cambio,

---

<sup>110</sup> Texto recogido en J. W. Herivel, *The Background to Newton's Principia: A Study of Newton's Dynamical Researches in the Years 1664-84* (Oxford: Clarendon Press, 1965), p. 130.

<sup>111</sup> Brackenridge, "Newton's Mature Dynamics: A Crooked Path Made Straight", pp. 113-16.

en los *Principia*<sup>112</sup> su tratamiento de las fuerzas no es el mismo. En la Primera Ley del Movimiento, a saber, “*Everybody preserves in its state of rest, or of uniform motion in a right line, unless it is compeled to change the state by the forces impressed thereon*”<sup>113</sup>, está tratando una

---

<sup>112</sup> La estructura de los *Principia* es la siguiente. En primer lugar Newton presenta 8 Definiciones de los conceptos que determinan el movimiento (‘cantidad de materia’, ‘cantidad de movimiento’, ‘fuerza innata/*vis insita*’, ‘fuerza impresa’, ‘fuerza centrípeta’, ‘cantidad absoluta de la fuerza centrípeta’, ‘cantidad acelerativa de la fuerza centrípeta’, y ‘cantidad motriz de la fuerza centrípeta’). A continuación presenta las Tres Leyes del Movimiento. Posteriormente se presentan los Tres Libros “Acerca del Movimiento de los Cuerpos”, cada uno de los cuales está subdividido en secciones. El Libro I trata del Movimiento de los cuerpos en el espacio libre (es decir, en el que no hay resistencia) : en su Sección 1 se presenta el marco matemático que va a ser usado en el resto de la obra para las pruebas de los lemas y teoremas; las Secciones 2 y 3 desarrollan las leyes de las fuerzas centrípetas (o fuerzas centrales); en la proposiciones 1, 2 y 3 de la Sección 1 se concluye que las Ley de las áreas de Kepler es una condición tanto necesaria como suficiente para una fuerza dirigida centralmente y actuando sobre un cuerpo con un componente de movimiento inercial; en las proposiciones 11 ,12 y 13 de la Sección 3 se sostiene que los movimientos orbitales elípticos, hiperbólicos y parabólicos implican una fuerza dirigida focalmente inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. El Libro II trata del movimiento de lo cuerpos de diferentes clases de resistencia e incluye temas de naturaleza filosófica como los principios del movimiento ondulatorio o ciertos aspectos de la teoría de los fluidos. El Libro III es el “Sistema del Mundo”; está introducido por las *Reglas del Filosofar* y consiste en 5 secciones: sobre las Causas del Sistema del Mundo, sobre los Errores Lunares, sobre las mareas, sobre la precisión en la medida de los Equinoccios, y sobre los Cometas.

<sup>113</sup> Newton no publicó toda su obra tal y como la conocemos ahora en su primera versión. Cada nueva edición no solo fue añadiendo nuevas partes sino también cambios conceptuales importantes. Se ha escogido para su cita la primera traducción inglesa que incluye todos los cambios de cada edición y explicaciones de los mismos: es la versión de 1846 de Andrew Motte. Isaac

---

fuerza como continua: concretamente la “*vis insita*” o inercia. En cambio, en la Segunda Ley del Movimiento, “*The alteration of motion is ever proportional to the motive force impressed; and is made in the direction of the right line in which that force is impressed*”<sup>114</sup>, la fuerza, en este caso la “fuerza impresa”, es tratada como un impulso. El paso de los impulsos a las fuerzas continuas se encuentra más adelante, en la Proposición 1 del Libro 1 en donde presenta la transición matemática de fuerzas instantáneas a continuas haciendo concebir las fuerzas como secuencias de ímpetus infinitesimales. Esta transición era fundamental porque, si bien el estudio del movimiento curvilíneo podía ser explicado como una sucesión de segmentos con impulsos instantáneos cambiando la dirección y la velocidad del cuerpo entre los segmentos, era necesario dar cuenta de que las fuerzas centrípetas (y, por ende, la fuerza gravitacional) eran constantes<sup>115</sup>.

Mientras que la distinción entre fuerzas instantáneas y fuerzas continuas resulta particularmente relevante para un correcto tratamiento matemático de las mismas, en relación a la física la

---

Newton, *The Mathematical Principles of Natural Philosophy to Which Is Added Newton's System of the World*, trans. Andrew Motte (New York: Daniel Adee, 1846), p. 83.

<sup>114</sup> Isaac Newton, *The Mathematical Principles of Natural Philosophy to Which Is Added Newton's System of the World*, trans. Andrew Motte (New York: Daniel Adee, 1848), p. 83.

<sup>115</sup> Para un análisis detallado de la transformación newtoniana de fuerzas instantáneas y fuerzas continuas, cfr. Herman Erlichson, "Motive Force and Centripetal Force in Newton's Mechanics" *American Journal of Physics* 59, no. 9 (1991).

clasificación principal de fuerzas distingue entre fuerzas externas y fuerzas internas. En los *Principia* las fuerzas internas son aquellas que se resisten al cambio de estado de reposo o movimiento de un cuerpo. Estas fuerzas son la “*vis insita*” o “fuerza inherente” y la “*vis inertiae*” o “fuerza inercial”. Por su parte las fuerzas externas son las que producen un cambio en el estado de movimiento o reposo como, por ejemplo, la gravedad, la electricidad o el magnetismo.

En general, las fuerzas externas, o impresas, pueden ser englobadas bajo uno de los siguientes tipos: el ímpetu, la presión o la fuerza centrípeta<sup>116</sup>. Sobre la importancia de los ímpetus o impulsos en el tratamiento de las fuerzas por parte de Newton ya se ha señalado su rol fundamental en el tratamiento matemático de las fuerzas que causan los movimientos (en general). Dado que las fuerzas de presión no entran dentro del alcance de este estudio conviene tratar, por tanto, a continuación, sobre las fuerzas centrípetas.

---

<sup>116</sup> No está claro por qué Newton decidió escoger los impulsos como primarios y hacer de las fuerzas continuas fuerzas secundarias o derivadas. De hecho, aunque Newton trata matemáticamente las fuerzas centrales como constantes, físicamente las considera como impulsos, según indica el siguiente pasaje de la Introducción a la Sección 11 del Libro I: “*I shall therefore at present go on to treat the centripetal forces as attractions; though perhaps in a physical strictness they may more truly be called impulses. But this propositions are to be considered as purely mathematical; and therefore, laying aside all physical considerations*”: Newton, *Principia*, p. 194.

---

Una vez descartadas las explicaciones de las fuerzas causantes del movimiento circular en términos de “tendencias” al exterior, para el estudio de los movimientos orbitales Newton se centra en el análisis de las fuerzas centrípetas, introducidas en la Definición V: “*A centripetal force is that by which bodies are drawn or impelled, or any way tend, towards a point as to a centre*”<sup>117</sup>. Además, en los *Principia* las fuerzas se abordan, como se ha señalado, desde un tratamiento estrictamente matemático<sup>118</sup>, es decir, desde la consideración de sus diferentes medidas y no desde el estudio de sus causas. Concretamente, la medida de las fuerzas con la que se van a considerar son las recogidas en las Definiciones V, VII y VIII de los *Principia*, a saber, la cantidad absoluta, la cantidad acelerativa y la cantidad motriz. La cantidad absoluta es la medida proporcional a la eficacia de la causa que la propaga, es decir, es proporcional a aquello que lo origina y, por tanto, explicaría, por ejemplo, el hecho de que diferentes imanes tengan diferentes fuerzas magnéticas. Esta medida es proporcional a la “potencia” del cuerpo que lo origina. En cambio, las otras dos medidas son proporcionales, respectivamente, a las velocidades, y a los movimientos que producen en un tiempo dado. La inclusión de la

---

<sup>117</sup> Ibid., p. 74.

<sup>118</sup> “*In mathematics we are to investigate the quantities of forces with their proportions consequent upon any conditions supposed; then when we enter upon physics, we compare those properties with the phenomena of Nature, that we may know what conditions of those forces answer to the several kinds of attractive bodies*”: Ibid., Escolio de Sección 11, Libro I, p. 218.

extensión temporal en estas dos medidas es importante, ya que indica que se está tratando con fuerzas continuas en vez de con impulsos instantáneos. Por una parte la cantidad acelerativa es proporcional a la aceleración y es el efecto de una fuerza que actúa por unidad de masa. Esta medida es de la que trata Newton cuando se refiere al término 'fuerza' sin más. Por su parte, la cantidad motriz es proporcional a la cantidad de movimiento generado en un momento, como, por ejemplo, el peso. Esta última medida es proporcional a la masa porque la cantidad de movimiento es proporcional a la masa. En los *Principia*, Newton hace uso de la cantidad acelerativa en el Libro I, Secciones 1-10. En cambio, a partir de la Sección 11 incluida, cuando habla de fuerza, Newton se refiere a la cantidad motriz.

La fuerza centrípeta es tratada matemáticamente en tres niveles distintos. El primero consiste en, dado un movimiento circular, medir la fuerza centrípeta dirigida al centro del círculo mediante la ley de dependencia entre el radio, el periodo y la fuerza; como herramienta matemática para este análisis es suficiente el conocimiento de la geometría del círculo, ya que la geometría del círculo es suficiente para medir la deflexión (o la diferencia entre la tangente y el círculo). El segundo tratamiento consiste en que, dada una órbita curvilínea, se tiene que evaluar la fuerza centrípeta actuando sobre el cuerpo y hallar la variación de la órbita; en este caso las herramientas matemáticas utilizadas son las siguientes: uno debe interpretar la deflexión como la trayectoria de un

movimiento acelerador, en cuyo caso, la longitud es proporcional al cuadrado del tiempo (de acuerdo con la ley generalizada de la caída libre) siendo el tiempo proporcional al área del sector. Por tanto, en este tratamiento el “juego” entre la geometría y la dinámica es más sutil entre la geometría y el papel de las razones nacientes y desvanecientes del cálculo newtoniano es mayor. El tercer y último tratamiento parte de que, dados un centro de fuerzas y la ley de variación de la fuerza en función de la distancia, hay que determinar el movimiento de un cuerpo lanzado desde un determinado punto con una velocidad dada; aquí la fuerza no se representa geoméricamente y las herramientas matemáticas son más cercanas al lenguaje algebraico-analítico de matemáticos del siglo XVIII como Leonhard Euler (1707-1783) o Daniel Bernoulli (1700-1782)<sup>119</sup>.

Aunque, como se ha indicado, con el término ‘fuerza centrípeta’ se hace referencia a una fuerza central, o propensión hacia un centro, conviene señalar que en la obra de Newton otro término, ‘atracción’ (con todas las connotaciones que este término conlleva), también hace referencia a es este tipo de fuerzas. De hecho, Cohen señala que se podría definir la atracción como un caso generalizado de fuerza centrípeta en los casos en los que el

---

<sup>119</sup> Para un estudio detallado de las similitudes entre la mecánica de Newton y los desarrollos matemáticos de Euler y Bernoulli cfr. O. Darrigol and Uriel Frisch, "From Newton's Mechanics to Euler's Equations" *Physica D: Nonlinear Phenomena* 237, no. 14-17 (2007).



centro no es único<sup>120</sup>. No obstante, consciente de la carga de dicho término, al igual que en el caso otros conceptos, Newton no usa el término ‘atracción’ en un sentido físico. De este modo, para salvaguardar la integridad de su empresa matemática, en el Escolio de la Sección 11 del Libro I, Newton señala que

*“I here use the word attraction in general for any endeavour, of what kind soever [sic], made by bodies to approach each other; whether that endeavour arise from the action of the bodies themselves, as tending mutually to or agitating each other by spirits emitted; or whether it arises from the action of the aether or of the air, or of any medium whatsoever, whether corporeal or incorporeal, any how [sic] impelling bodies placed therein towards each other”<sup>121</sup>.*

El caso paradigmático de atracción en la obra de Newton, es el de la gravedad, que es una atracción entre cuerpos. En un primer momento el interés por la gravedad de Newton era físico, es decir buscaba estudiar la gravedad en tanto que factor cósmico, y trataba de buscar una explicación física a dicha fuerza que no fuera la “atracción”, puesto que Newton no creía en un “poder atractivo”. Para ello, hasta llegó a postular un éter mecánico. Sin embargo, siguiendo a Dobbs, Newton encontró una incompatibilidad entre la demostración de la Proposición 1 del Libro I, en la que se trata la ley general de áreas que se correspondía con la ley de Kepler, y la existencia de un medio que causa resistencia (como el supuesto éter) y, por tanto, determinó que no podía hallar la causa de la

---

<sup>120</sup> Cfr. Cohen, *The Newtonian Revolution*. pág. 173.

<sup>121</sup> Newton, *Principia*, p. 217.

gravedad<sup>122</sup>. Por este motivo Newton decidió dar en los *Principia* solo una descripción matemática de los fenómenos por lo que transformó la 'atracción' de fuerza física a fuerza matemática.

Para poder tratar matemáticamente la atracción lo primero que hay que determinar es que los cuerpos no van a ser considerados como tales sino como centros idealizados de cuerpos materiales. Esto supuso una "revolución" no solo científica, sino también en términos de los modelos fundamentales.

*"Not only had every type of explanation known to the Greeks, with the exception of atomism, been entirely discredited, but the new orthodoxy, an alliance of Cartesianism and atomism, was already in decline. Newton had invented a new analogue in his mathematical theory of central forces and a new analogue is rarer in the history of science than new theories or new methods. By the end of the century a particular type of subject-matter and a particular method of investigation were taking charge of science"*<sup>123</sup>.

### **2.2.2.3. La teoría de campos como modelo fundamental**

El modelo "*wave motion*" es el modelo que sostiene que el movimiento consiste en alteraciones de un medio propagadas esféricamente en frentes de ondas. Bajo este modelo se encuentran las teorías de la transmisión del siglo XVII (o teorías ondulatorias), la teoría de ondas del siglo XIX y algunas interpretaciones de la teoría de campos. Este modelo está sustentado matemáticamente

---

<sup>122</sup> B.J.T. Dobbs, "Newton's Alchemy and His 'Active Principle' of Gravitation" in *Newton's Scientific and Philosophical Legacy*, ed. P.B. Scheurer and G. Debrock (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988), p. 55.

<sup>123</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 74.

por y las ecuaciones de mecánica de fluidos<sup>124</sup> o hidrodinámica propuestas por Euler y Bernoulli.

En el siglo XVII las teorías de la transmisión se proponían como alternativa a las explicaciones de la teoría corpuscularista de las emisiones. El mayor triunfo de esta teoría durante este siglo fue la formulación de Huygens de la teoría ondulatoria de la luz en su *Traité de la Lumière* de 1690<sup>125</sup>. En esta obra Huygens propone una explicación de las leyes de la óptica partiendo de la consideración de que la luz consiste en movimientos de algún tipo de materia. Esta explicación se lleva a cabo en términos de lo que Huygens considera la “verdadera filosofía”, “*dans laquelle on conçoit la cause de tous les effets naturels par des raisons de mécanique*”<sup>126</sup>, que permite conocer realmente los fenómenos físicos. Como señala Hesse, la intuición detrás de esta propuesta es que si los rayos de luz fueran corpúsculos se producirían perturbaciones entre unos y otros al cruzarse<sup>127</sup>. Este nuevo enfoque le permitió explicar las propiedades refractivas del Espato de Islandia (la doble

---

<sup>124</sup> Una descripción más detallada de la Historia de la Mecánica de Fluidos puede encontrarse en Alex D.D. Craik, "The Origins of Water Wave Theory" *Annual Review of Fluid Mechanics* 36, no. 1-28. (2004).

<sup>125</sup> Christiaan Huygens, *Traité De La Lumière, Où Sont Expliquées Les Causes De Ce Qui Luy Arrive Dans La Réflexion Et Dans La Réfraction Et Particulièrement Dans L'étrange Réfraction Du Cristal D'islande* (Leyde: p. Van der AA, 1690).

<sup>126</sup> *Ibid.*, p. 3.

<sup>127</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 120.

refracción)<sup>128</sup>, que era uno de los grandes problemas ópticos de su época. El haber resuelto dicho problema hizo que la recepción de su obra y de su teoría fuera positiva.

Los desarrollos matemáticos del siglo XVIII tienen como problemas astronómicos los que Newton dejó sin resolver: su solución a la precesión de los equinoccios era defectuosa<sup>129</sup>; de entre las perturbaciones de los movimientos celestes solo había considerado las de la luna; e incluso de entre las perturbaciones de ésta, la más importante, la evección –desigualdad periódica en la forma y posición de la órbita de la Luna ocasionada por la atracción del Sol– no había sido investigada<sup>130</sup>. Para solucionar estos problemas un grupo de matemáticos del siglo XVIII, liderados por el astrónomo francés Pierre-Simon Laplace (1749-1827), consideraron que era necesario perfeccionar no solo la ciencia de la mecánica sino también las herramientas que se utilizaban para su estudio<sup>131</sup>. Concretamente, consideraban que en el estado en que se

---

<sup>128</sup> Cfr. Fokko Jan Dijksterhuis, *Lenses and Waves. Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004), pp. 236-53.

<sup>129</sup> Curtis Wilson, "D' Alembert Versus Euler on the Precession of the Equinoxes and the Mechanics of Rigid Bodies" *Archive for History of Exact Sciences* 37, no. 3 (1987): p.1.

<sup>130</sup> Cfr. Michael Nauenberg, *The Reception of Newton's Principia* [E-print] (2015 [cited 16 de abril 2017]).

<sup>131</sup> P.S. Laplace, *Oeuvres Complètes 6. Exposition Du Sytème Du Monde* (Paris: Gauthier-Villars, 1884), p. 469.

encontraba el cálculo diferencial no era posible resolver los grandes problemas de la astronomía.

La geometría analítica y el cálculo infinitesimal del siglo XVII habían posibilitado que los problemas físicos fueran representados matemáticamente. De este modo, en dicho siglo, la relación entre las cantidades físicas había sido expresada en términos de las relaciones entre entidades geométricas. Estas entidades, a su vez, fueron expresadas en el siglo XVIII mediante símbolos algebraicos surgiendo las formulaciones analíticas del cálculo. Francis Jean de la Rond D'Alembert (1717-1783), partiendo del método de cálculo de Leibniz<sup>132</sup> (una teoría algebraica interpretada geoméricamente<sup>133</sup>) desarrolló el cálculo de derivadas parciales para describir los movimiento de los cuerpos en un sistema<sup>134</sup> y Joseph-Louis Lagrange (1749-1813) descubrió el cálculo de variaciones<sup>135</sup> mediante el cual se podían resolver analíticamente problemas de optimización (por ejemplo, encontrar la trayectoria

---

<sup>132</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz, "De Geometria Recondite Et Analysisi Indivisibilium Atque Infinitorum" *Acta Eruditorum* Anno 1686 (1686).

<sup>133</sup> Cfr. Emily Grosholz, "Was Leibniz a Mathematical Revolutionary?" in *Revolutions in Mathematics*, ed. Donald Gillies (New York: Oxford University Press, 1992), 7.2. Calculus and the mechanics, pp. 292-99.

<sup>134</sup> Para una exposición completa de este desarrollo cfr. Craig G. Fraser, "D'Alembert's Principle: The Original Formulation and Application in Jean D'Alembert's *Traite De Dynamique* (1743)" *Centaurus* 28, no. 2 (1985).

<sup>135</sup> Cfr. Sylvia Serfaty, "Lagrange and the Calculus of Variations" *Lettera Matematica* 2, no. 1 (2014): doi.10.1007/s40329-014-0049-x.

más corta entre dos puntos o el principio de Mínima Acción que se nombrará en el epígrafe siguiente).

Otro de los grandes problemas de la mecánica newtoniana es que solo se puede aplicar a puntos ideales de masa sobre los que se ejerce una fuerza. Como indica Hesse al inicio de su Capítulo VIII, '*The Field Theories*', esta no podía aplicarse a cuerpos fluidos o sólidos.

El reto, en este caso, consistía en lograr una correcta traducción entre las ecuaciones del movimiento para masas puntuales y las ecuaciones del continuo. Fue Euler el que estableció el concepto de función de una variable permitiendo que el cálculo geométrico fuera reemplazado por el cálculo de funciones. Esto propició un desarrollo más complejo de las matemáticas físicas que estudiaban los fluidos ideales<sup>136</sup> y los sólidos continuos al tratar estos como la suma de elementos similares a partículas puntuales. Además, Euler desarrolló una teoría del sonido basada en una ecuación de ondas de manera que, junto con sus ecuaciones hidrodinámicas, como destaca Hesse, Euler hizo posible describir la transmisión de la acción a través de medio fluido continuo. Como se tratará en el Capítulo 4 de este estudio, dicho fluido era interpretado como

---

<sup>136</sup> Amable Liñán, "Las Ecuaciones De Euler De La Mecánica De Fluidos" in *La Obra De Euler: Tricentenario Del Nacimiento De Leonhard Euler (1703-1783)*, ed. Alberto Galindo and Manuel López (Madrid: Instituto de España, 2009), pp. 154-58.

“éter” en las teorías que dan cuenta de fenómenos ondulatorios como el calor o la luz.

### 2.2.3 Los modelos matemáticos

Si durante los siglos XVII y XVIII se forjaron los tres modelos fundamentales de Hesse, y durante el siglo XIX (que se tratará en el Capítulo 4) estos modelos fueron utilizados por las diferentes escuelas para dar cuenta nuevos fenómenos físicos relacionados con la electricidad y el magnetismo, en siglo el XX resultaban obsoletos. Ya a finales del siglo XIX los conceptos físicos fundamentales eran cada vez más abstractos y menos mecánicos<sup>137</sup>, y la tensión que Hesse define como *“how far to abstract from the physical situation in order to set up a simple and yet useful mathematical model with a minimum of physical assumptions”*<sup>138</sup>, se fue resolviendo mediante el uso predominante de modelos matemáticos en vez de los modelos mecánicos. El experimento Michelson-Morley de 1887 (Albert Michelson 1852-1931 y Edward Morley 1838-1923) mediante el cual se trataba de determinar la velocidad relativa del

---

<sup>137</sup> *“Before Maxwell, Physical Reality, in so far as it was to represent the processes of nature, was thought of as consisting in material particles, whose variations consist only in movements governed by partial differential equations. Since Maxwell’s time, Physical Reality has been thought of as represented by continuous fields governed by partial differential equations, and not capable of mechanical interpretation.”*: Albert Einstein, "Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality" in *James Clerk Maxwell: A Commemorative Volume 1831-1931*, ed. Cambridge University Press (New York: Cambridge University Press, 1931), p. 71.

<sup>138</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 189.

éter con respecto a la Tierra y el anuncio de Max Planck de la necesidad de asumir que en la emisión o absorción de una radiación la energía es discontinua marcaron el fin de la Física Clásica dando lugar a la Física Moderna. El experimento de Michelson-Morley detonó los desarrollos físicos que posteriormente se conocerían como Teoría de la Relatividad. Por su parte, en el anuncio de Planck está el inicio de la Teoría Cuántica.

Tanto la Teoría de la Relatividad como la Teoría Cuántica abandonaron los modelos mecánicos considerando que solo eran necesarios los modelos matemáticos<sup>139</sup>. De este modo, el problema de la transmisión de la acción se reinterpreta, puesto que el componente de causalidad física que este problema requiere no está presente en los modelos matemáticos. Concretamente, la causalidad en la Teoría de la Relatividad viene determinada por la noción de ‘simultaneidad’ que esta teoría define. Por su parte, en la Teoría Cuántica los fenómenos físicos no son explicados mediante procesos físicos por lo que la concepción de causalidad resulta irrelevante, o en palabras de Alfred Einstein (1931-1955),

*“The latest and most successful creation of the theoretical physics, namely Quantum Mechanics, is fundamentally different in its principles from the two programmes which we will briefly call*

---

<sup>139</sup> En 1924 el historiador Edwin Arthur Burtt afirmaba que había una “metafísica” de la ciencia moderna y que esta consistía en adscribir “*ultimate reality and causal efficacy to the world of mathematics, which world is identified with the real of material bodies moving in space-time*”: Burtt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, p. 303.



*Newton's and Maxwell's. For the quantities that appear in its laws make no claim to describe Physical Reality **itself**, but only **probabilities** for the appearances of a particular physical reality on which our attention is fixed"*<sup>140</sup>.

### **2.2.3.1. La Teoría de la Relatividad**

La física del siglo XIX muestra una clara tendencia hacia las formulaciones en términos de campos en varias de sus áreas como el electromagnetismo. Las ecuaciones de James Clerk Maxwell (1831-1879), las ecuaciones que representan el campo electromagnético, fueron pensadas originariamente para formular matemáticamente la teoría de la electricidad y el magnetismo. Maxwell imaginaba el espacio como un medio, el "éter", de manera que incluso en ausencia de materia los fenómenos eléctricos y magnéticos tenían lugar "en" algo. Una vez se establecieron estas ecuaciones, se descubrió la existencia de ondas electromagnéticas que viajaban a la velocidad de la luz, velocidad que se consideraba como relativa respecto al éter. El éter luminífero como sustancia imponderable que transmite la energía radiante mediante ondas a través del espacio había llegado a ser la doctrina predominante acerca de la luz. Es decir, la teoría estándar sobre la luz consistía en una teoría de ondas, cuyo formalismo matemático eran las ecuaciones de Maxwell y acerca de la cual se

---

<sup>140</sup> Einstein, "Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality", p. 72-73.

---

establecían especulaciones físicas acerca de un *plenum* de éter luminífero.

En 1887 Michelson y Morley realizaron un experimento que tenía como objetivo detectar posibles anomalías en la velocidad de la luz causadas por la influencia del movimiento de la Tierra a través del éter<sup>141</sup>. Este experimento se basa en el fenómeno físico de la percepción de un “viento” cuando un objeto se mueve con respecto a un medio estacionario (en este caso la Tierra en traslación con respecto al éter). Michelson y Morley consideraban que la medida de la velocidad de un rayo de luz que fuera en la dirección del “viento del éter” sería mayor que la medida de la velocidad de un rayo de luz que fuera en dirección contraria el “viento del éter”. En el primer caso la velocidad total sería la suma de la velocidad del “viento del éter” más la velocidad del rayo relativa a dicho “viento”. En el segundo caso la velocidad total sería la velocidad del “viento del éter” a la que habría que restar la velocidad del rayo relativa a dicho “viento” (como en el caso del cálculo de la velocidad, medida desde una orilla, de un nadador que nada en el sentido de la corriente y contracorriente respectivamente)<sup>142</sup>. No obstante, los datos que arrojó su

---

<sup>141</sup> Albert A. Michelson and Edward W. Morley, "Lviii. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether" *Philosophical Magazine* 24, no. 151 (1887).

<sup>142</sup> Para una explicación en notación actual cfr. R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. I: Mainly Mechanics*,

experimento no mostraban ninguna alteración de la velocidad de la luz. Las interpretaciones al resultado de este experimento fueron múltiples<sup>143</sup>, pero finalmente, en el primer tercio del siglo XX, el que dicho experimento era nulo (*null*), es decir, que no concluía la hipótesis que se proponía demostrar, ya había sido aceptado por la comunidad científica.

La principal consecuencia del experimento de Michelson y Morley es el abandono del concepto de éter. Si ya el éter en Maxwell carecía de cualquier atributo mecánico y su única cualidad era la de transmitir las ondas, con este experimento se mostró, en palabras de Hesse,

*"[t]he failure to find acceptable material models for it [the ether] and the realization that only mathematical models were required, and from this point of view, the impossibility of measuring the velocity relative to the aether was merely a confirmation that the aether was fulfilling no function in physical theory"*<sup>144</sup>.

Fue en el contexto de las diferentes interpretaciones del experimento de Michelson y Morley en el que se encuentra el surgimiento de la Teoría de la Relatividad. La interpretación de Einstein del resultado de este experimento le lleva a concluir que los fenómenos relacionados con la electrodinámica y con la

---

*Radiation, and Heat* (Reading, (MA): Addison-Wesley, 1977), epígrafes 15-3 y 15-4.

<sup>143</sup> Un estudio detallado de este debate puede encontrarse en Loyd S. Swenson, *Ethereal Aether. A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930* (Austin: University of Texas Press, 2012), capítulos 7-11.

<sup>144</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 229.

mecánica no poseen propiedades que estén en correspondencia con la idea del 'reposo absoluto' y que las leyes de la electrodinámica y la óptica son válidas para todos los sistemas de referencia en los que las ecuaciones mecánicas se cumplen<sup>145</sup>.

El concepto de 'reposo absoluto' está ligado al de 'sistema de referencia'. Para poder describir los procesos naturales, en física, se ha de tener un sistema de referencia, es decir, un sistema de coordenadas que indiquen la posición en el espacio de un punto y un reloj asociado a ese sistema que nos indique los tiempos de los cambios de posición que tienen lugar en dicho sistema. Si un cuerpo se mantiene estacionario con respecto a un sistema de referencia se dice que está en reposo.

Los sistemas en los que las partículas se mueven libremente con una velocidad constante sin que haya fuerzas que actúen son ellas se denominan sistemas inerciales. De acuerdo con Einstein y su Principio de Relatividad, las ecuaciones del movimiento de Newton son invariantes y mantienen su forma con respecto a las transformaciones entre sistemas inerciales. Es decir, las ecuaciones que describen las leyes del movimiento mantienen su forma en

---

<sup>145</sup> *"Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu Vermutung, daß den Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist."*: Albert Einstein, "Zur Elektrodynamik Bewegter Körper" *Annalen der Physik* 17 (1905): p. 891.

cualquier sistema inercial de referencia<sup>146</sup>. En este contexto ningún sistema de referencia puede ser considerado como “privilegiado”, es decir, la idea de ‘reposo absoluto’ carece de sentido al contrario que en la mecánica clásica.

Por otra parte, en la mecánica clásica se consideraba que las interacciones entre partículas son instantáneas, es decir, si una modifica su posición, la influencia sobre la otra es inmediata. Pero, de hecho, la propagación de las interacciones no es instantánea ya que si un cuerpo cambia, la influencia sobre otro tardará un cierto intervalo de tiempo en tener lugar. El tiempo en el que tarda el segundo cuerpo en sufrir la modificación dividido por la distancia entre los dos cuerpos es lo que se denomina velocidad máxima de propagación de una interacción. En la Teoría de la Relatividad, además, se establece como postulado<sup>147</sup> que la velocidad máxima de transferencia de energía y de materia es la velocidad de la luz y es la misma en todos los sistemas de referencia.

En el contexto de la Teoría de la Relatividad a las interacciones que se propagan de una partícula a otra se les suele denominar ‘señales’. Estas señales “son enviadas” por “una partícula” y “dan información” a la segunda partícula de los cambios que ha experimentado la primera. El que todas las señales conocidas

---

<sup>146</sup> Este principio es definido en estos términos en Albert Einstein, "Über Das Relativitätsprinzip Und Aus Demselben Gezogenen Folgerungen" *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 4 (1907): p. 412.

<sup>147</sup> Cfr. Albert Einstein, "Die Grundlage Der Allgemeinen Relativitätstheorie" *Annalen der Physik* 49 (1916): p. 720.

---

tengan la velocidad límite de la luz llevó a Einstein a realizar una revisión de los conceptos de 'espacio' y 'tiempo' absolutos newtonianos, puesto que consideraba que eran una fuente de incompatibilidades con la teoría de Maxwell<sup>148</sup>.

En el newtonianismo, como se ha indicado anteriormente, se pensaba que todas las velocidades eran posibles, es decir, que una interacción entre cuerpos podía ocurrir de forma instantánea independientemente de la distancia. En la Teoría Especial de la Relatividad, en cambio, la señal luminosa solo puede llegar a aquellos puntos que están a una distancia igual o menor que  $c(t-t_0)$  —siendo  $c$  la velocidad de la luz,  $t$  el tiempo final y  $t_0$ , el tiempo inicial— o solo pueden ser alcanzados por una señal emitida antes que se origine a distancias iguales o menores de  $c(t-t_0)$ . Al espacio que contiene dichos puntos se le denomina 'cono de luz'. Esto establece una conexión muy estrecha entre las nociones de 'espacio-tiempo' y la de causalidad que sostiene que

*"time order, the order of earlier and later, is reducible of causal order; the cause is always earlier than the effect, a relation which cannot be reversed. (...). Since the speed of causal transmission is limited, there exist event of such a kind that neither of them can be the cause or the effect of the other. For events of this kind a time*

---

<sup>148</sup> Dos explicaciones de esta incompatibilidad pueden verse en John Stachel, "Development of the Concepts of Space, Time and Space-Time from Newton to Einstein" in *100 Years of Relativity. Space-Time Structure: Einstein and Beyond.*, ed. Abhay Astekar (Singapore: World Scientific, 2005), p. 14. Y Robert DiSalle, *Understanding Space-Time. The Philosophical Development of Physics from Newton to Einstein* (New York: Cambridge University Press, 2006), pp. 103-04.

*order is not defined, and either of them can be called earlier or later than the other*"<sup>149</sup>.

Uno de los principales problemas que se derivan de lo anterior es que surge la necesidad de establecer cómo tienen lugar las relaciones no-locales<sup>150</sup>, es decir, las que conectan eventos "aquí y ahora" con eventos que son "allí y después". Como señala Hans Reichenbach (1851-1953), el cómo se define que dos eventos son simultáneos se convierte en una cuestión de definición y no de un sistema.

*"That the unit of measurement is a matter of definition is a familiar fact; everybody knows that it does not make any difference whether we measure distances in feet or meters or light-years. However, that the comparison of distances is also a matter of definition is known only to the expert of relativity. This result can also be formulated as the definitional character of congruence. That a **certain distance is congruent to another distance situated at a different place can never be proved to be true**; it can only be maintained in the sense of a definition. More precisely speaking, it can be maintained as true only after a definition of congruence is given; it therefore depends on an original comparison of distances which is a matter of definition. A comparison of distances by means of the transport of solid bodies is but one definition of congruence. Another definition would result if we regarded a rod, once it had been transported to another location as twice as long, thrice transported as three times long, and so on. A further illustration refers to time: that simultaneity of events occurring at distant places is a matter of*

---

<sup>149</sup> Hans Reichenbach, "The Philosophical Significance of Relativity" in *Einstein's Conception of Reality*, ed. Arthur Schilpp (New York: MJF Books, 1970), pp. 303-04.

<sup>150</sup> Las teorías de acciones locales se describen con teoría de campos.

---

*definition was not known before Einstein based his special theory of relativity on this logical discovery*"<sup>151</sup>.

En este contexto los efectos de una causa no es una causa de propagación de acción (como lo es en la teoría de ondas), sino que es una causa cuya única función es que se puedan reconocer señales luminosas y establecer cuál es la conexión entre ellas<sup>152</sup>. Esto es importante puesto que el uso de señales es fundamental para establecer el significado de uno de los principales conceptos de la Teoría de la Relatividad, a saber, la noción de 'simultaneidad'<sup>153</sup>. ¿Cómo define Einstein la 'simultaneidad'? Mediante un experimento mental<sup>154</sup>. En este experimento se considera que el tiempo es el "tiempo que marcan las agujas de mi reloj". De este modo, si se asigna un instante  $t$  a un evento (por ejemplo, el paso de un tren por una estación), puedo reconocer sin problema que el evento ocurre simultáneamente al paso de la

---

<sup>151</sup> Reichenbach, "The Philosophical Significance of Relativity", p. 294. El subrayado es mío.

<sup>152</sup> Si en la teoría de campos se hablaba de una propagación causal (una transmisión de la acción) en la teoría de la relatividad, donde los sistemas son abiertos, de lo que se puede hablar es de conexiones causales.

<sup>153</sup> Para una explicación del cómo se construye la definición de simultaneidad en la Teoría Especial de la Relatividad cfr. Domenico Giulini, *Special Relativity. A First Encounter. 100 Years since Einstein* (New York: Oxford University Press, 2005), pp. 41-46.

<sup>154</sup> Para la definición de 'simultaneidad' (o 'sincronía') que da el propio Einstein cfr. Albert Einstein, "On the Electrodynamics of Moving Bodies. [Einstein's First Paper on the Restricted Theory of Relativity, Originally Published in the *Annalen Der Physik* in 1905.]" in *The Principle of Relativity Original Papers*, ed. Albert Einstein and H. Minkowski (Calcutta: University Press of Calcutta, 1920), pp. 3-5.



aguja de mi reloj por la marca  $t$ , si estoy a una distancia cercana con mi reloj para ver ese evento. Obviamente, esta definición sólo es válida localmente, es decir, no es suficiente si de lo que se trata es de relacionar eventos que ocurren en lugares diferentes, es decir, como si cuando el tren pasara por la estación yo estuviera a muchos kilómetros de distancia). Por tanto, para asignar instantes de tiempo a eventos distantes y establecer una relación entre ellos es necesario conocer cómo sincronizar relojes. Se podría considerar que, en realidad, la sincronización es cosa simple: tomar un reloj y llevarlo de un punto a otro del espacio para sincronizar cada reloj localmente. Pero esta solución conlleva una concepción del tiempo como absoluto en un sentido newtoniano, es decir, presupone que el tiempo del reloj que se ha tomado transcurre igual mientras se mueve entre las dos posiciones. Pero esto no es así, el tiempo es relativo, no absoluto. ¿Cómo llevar a cabo la sincronización entonces? Precisamente con el experimento mental: se suponen dos relojes situados en dos puntos distantes  $A$  y  $B$ ; estos puntos están en reposo uno respecto al otro; desde  $A$  en el instante  $t(A)$  —el que marca el reloj de  $A$ —, parte una señal luminosa hasta  $B$ ; en el instante  $t(B)$  —el que marca el reloj de  $B$ — esta señal se refleja y llega de nuevo a  $A$  en el instante  $t(A')$ ; de estos relojes se dice que están sincronizados si  $t(B) - t(A) = t(A') - t(B)$ , es decir, si el tiempo que tarda la luz en ir de  $A$  a  $B$  y de volver de  $B$  a  $A$  es el mismo según la medición de los dos relojes. Una vez sincronizados los relojes, se puede asignar un instante a un evento en un lugar

leyendo el reloj en dicho lugar, puesto que al estar sincronizado con nuestro reloj, la lectura es la misma. En este sentido, si dos relojes están sincronizados y la lectura de uno de ellos acerca de un evento A coincide con la del otro para un evento B, se dice que dichos eventos son simultáneos.

En 1916 Einstein enunció su Teoría General de la Relatividad<sup>155</sup> en la que aplicaba los conceptos de la Teoría Especial de la Relatividad para explicar la atracción entre masas. Puesto que según la Relatividad Especial la acción causal entre cuerpos no puede propagarse con velocidad mayor que la de la luz, surgen la pregunta de cuánto tiempo tardaría una masa en “notar” la influencia gravitatoria de otra masa que cambia de posición. En el newtonianismo la respuesta es que esa influencia es instantánea, pero esta no puede ser la respuesta en la Teoría de la Relatividad. La propuesta de Einstein, por tanto, consistía en desarrollar una teoría de campos de la gravedad que satisficiera el principio relativista de que la velocidad de la luz es la misma en cualquier sistema de referencia. El modo de llevar a cabo esta respuesta es similar al paso que lleva a cabo Einstein al revisar los conceptos de ‘espacio’ y ‘tiempo’ de la física clásica dotándoles de un nuevo significado. Ahora, en la Teoría General, el concepto que adquiere

---

<sup>155</sup> Cfr. Albert Einstein, "The Generalised Principle of Relativity [A. Einstein's Second Paper on the Generalised Principle First Published in 1916]" in *The Principle of Relativity Original Papers*, ed. Albert Einstein and H. Minkowski (Calcutta: University Press of Calcutta, 1920).

nuevos tintes es el de “campo” que pasa a equipararse con la geometría del espacio-tiempo<sup>156</sup>. Esta asimilación de la gravedad con la geometría marca un cambio radical en el rol de los modelos en las explicaciones científicas. Como afirma Hesse, en el caso de la teoría electromagnética de campos el modelo era la versión matematizada del modelo “*wave motion*”<sup>157</sup>; en cambio, en la teoría de la relatividad la geometría en sí misma es el modelo<sup>158</sup>, un modelo que ya no es físico y en el que un concepto fundamental para los modelos fundamentales de Hesse, como es el de ‘causalidad’ ha sido definido en términos abstractos alejados completamente de los términos con que se vinculaba en la física clásica.

### 2.2.3.2. La Teoría Cuántica

Como se ha indicado, en 1900<sup>159</sup> Planck presentó sus estudios acerca de la ley de distribución de energía radiante postulando que

---

<sup>156</sup> Acerca de la geometría relativista del espacio-tiempo cfr. H. Minkowski, "Principle of Relativity [H. Minkowski's Original Paper on the Restricted Principle of Relativity First Published in 1909.]" in *The Principle of Relativity Original Papers*, ed. Albert Einstein and H. Minkowski (Calcutta: University Press of Calcutta, 1920). Minkowski formalizó la Teoría Especial de la Relatividad y propuso el espacio-tiempo como un marco de cuatro dimensiones.

<sup>157</sup> En este texto en concreto Hesse denomina a este modelo ‘*fluid-flow*’, el cual, como se ha señalado, cae bajo la categoría de los “*wave models*”.

<sup>158</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 250.

<sup>159</sup> Max Planck, "Zur Theorie Des Gesetzes Der Energieverteilung Im Normalspectrum" *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900).

---

la radiación está compuesta de pequeños “elementos” (los actualmente conocidos como ‘cuanta’) de energía, es decir, los valores de la energía son discretos y solo pueden ser múltiplos de dichos “elementos”<sup>160</sup>. A partir de esta propuesta tienen lugar los desarrollos de la Mecánica Cuántica. La propuesta de Planck fue confirmada por Einstein en un artículo acerca de la generación y la conversión de la luz<sup>161</sup> quien sostenía que en determinadas circunstancias la luz radiante se comportaba como si consistiera de partículas (cuantas indivisibles) a las cuales se les podía adscribir energía y cantidad de movimiento –que son ambas las características de las partículas en sentido de la física clásica.

En 1924 De Broglie presentó un artículo en el que sostenía que las partículas fundamentales (en concreto las partículas emitidas en los procesos radioactivos) podían comportarse como ondas en

---

<sup>160</sup> En términos más técnicos la propuesta de Planck era la de una interpretación del fenómeno de la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en condiciones de equilibrio a una temperatura definida, fenómeno del que no se podía explicar con la física clásica. Haciendo uso del segundo principio de la termodinámica encontró una ecuación que daba cuenta de los datos experimentales que se tenían de dicho fenómeno hasta ese momento. Es en esa fórmula en la que aparecen por primera vez la constante  $h$ , “cuanto elemental de acción”. Para un estudio del contexto de la propuesta de Planck cfr. Luis J. Boya, "The Thermal Radiation Formula of Planck (1900)" *Revista de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*. 58 (2003).

<sup>161</sup> Albert Einstein, "Über Einen Die Erzeugung Und Verwandlung Des Lichtes Betreffenden Heuristischen Gesichtspunkt" *Annalen der Physik* 17, no. 6 (1905): doi. 10.1002/andp.19053220607.

determinadas ocasiones<sup>162</sup>. Esta hipótesis, corroborada experimentalmente en 1927 por los físicos Clinton Davisson y Lester Germer, mostraba que no solo el comportamiento dual de onda-partícula era algo que tenía lugar en algunos casos específicos de luz radiante sino que esta dualidad era también un rasgo fundamental de la materia. Las ecuaciones que describían las propiedades ondulatorias de la materia fueron publicadas por Schrödinger en 1926<sup>163</sup>. Como el mismo Schrödinger indica, las ecuaciones que propone las desarrolló sin hacer referencia ni a las modificaciones que la relatividad había hecho a la mecánica clásica ni a las acciones de un campo magnético sobre un átomo, sino que habían sido deducidas desde el principio de Hamilton<sup>164</sup>. El principio de Hamilton es un principio de mínima acción que sostiene que el movimiento de un sistema conservativo se puede determinar mediante la integral de la diferencia de la energía cinética y la energía potencial de dicho sistema, y que esa cantidad varía de manera que el valor de esa integral es siempre el

---

<sup>162</sup> Louis De Broglie, "A Tentative Theory of Light Quanta" *Philosophical Magazine* 47, no. 278 (1924).

<sup>163</sup> "The theory which is reported in the following pages is based on the very interesting and fundamental researches of L. de Broglie' on what he called "phase-waves" ("ondes de phase") and thought to be associated with the motion of material points, especially with the motion of an electron or proton": Erwin Schrödinger, "An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules" *Physical Review* 28, no. 6 (1926): p. 1049, doi. 10.103/PhysRev.28.49.

<sup>164</sup> Ibid.: p. 1069 y p. 50 respectivamente.

mínimo<sup>165</sup>. Es decir, es un desarrollo matemático que no parte de conceptos físicos.

En la mecánica clásica el estado de un sistema físico viene dado por “el espacio de fases”, que puede entenderse como el espacio que contiene todas las posibles soluciones de las ecuaciones de movimiento en ese sistema. Las cantidades observables—las variables dinámicas que pueden ser medidas— son funciones de las variables que definen las coordenadas de dicho espacio, es decir, de las coordenadas generalizadas y de los momentos. Por ejemplo, un observable es la energía, que determina cómo un estado evoluciona a lo largo del tiempo mediante las ecuaciones de Hamilton. En cambio, en la Mecánica Cuántica el estado de un sistema se entiende como un objeto matemático: un vector en un espacio vectorial complejo de dimensiones infinitas (se denomina así porque los números escalares a los que está asociado ese espacio vectorial son números complejos). Además, el tratamiento de las cantidades observables es completamente distinto en la Mecánica Cuántica que en la clásica, en esta última los observables —es decir, las magnitudes con sentido físico— son operadores lineales que actúan en dicho espacio con la característica de que son autoadjuntos. No se trata en este estudio de determinar el significado de estas nociones, sino solo indicar su carácter

---

<sup>165</sup> Para un desarrollo del principio de Hamilton ver A. Bedford, *Hamilton's Principle in Continuum Mechanics* (San Francisco, CA: Pitman Advanced Publishing Program, 1985), pp. 12-15.

estrictamente matemático y complejo<sup>166</sup> y que el hecho de que no cumplan la propiedad conmutativa “*our intuitions about how physics worl are violated, as we can no longer simultaneously assign numerical values to the observables*”<sup>167</sup>. Este límite a los valores que pueden medirse simultáneamente lo enunció en 1927 Werner Heisenberg<sup>168</sup> (1901-1976) y actualmente se conoce como el Principio de Incertidumbre. Precisamente por estos límites “*there is no causal action of one state on the other in the sense that an individual transition can be predicted*”<sup>169</sup>, por lo que la que hablar de causalidad en este contexto carece de sentido ya que no se pueden relacionar unos estados con otros –se pueden relacionar, en el mejor de los casos, probabilísticamente.

### 2.3. MODOS DE ACCIÓN EN LAS ANALOGÍAS Y MODELOS

Una de los principales debates de la filosofía natural hasta el siglo XVII acerca de cómo tienen lugar los cambios en los fenómenos naturales es el debate acerca del modo de acción que

---

<sup>166</sup> Para el lector interesado en una explicación detallada de este punto cfr. Stéphane Attal, "Operator and Spectral Theory. Lectures on Quantum Noise Theory" (Institut Camille Jordan, Université Lyon 1), <http://math.univ-lyon1.fr/~attal/chapters.html>.

<sup>167</sup> Peter Woit, *Quantum Theory, Groups and Representations. An Introduction*. (Dordrecht: Springer, 2017), p. 2. doi. 10.1007/978-3-319-64612-1.

<sup>168</sup> Werner Heisenberg, "Über Den Anschaulichen Inhalt Der Quantentheoretischen Kinematik Und Mechanik" *Zeitschrift für Physik* 43, no. 3-4 (1927): pp. 174-79. doi.10.1007/BF01397280.

<sup>169</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 272.

explica dichos procesos. Los dos modos que se plantean como alternativas en el debate son la acción por contacto y la acción a distancia. La acción por contacto es aquella en la que la transmisión de la acción tiene lugar entre dos cuerpos cuyas superficies están en contacto. La acción a distancia, por el contrario, es el modo de acción en el que un cuerpo afecta a otro a distancia sin ninguna entidad intermedia que “lleve” la acción desde el cuerpo que la produce al cuerpo que al recibe.

Por lo general, desde Aristóteles hasta el siglo XVIII la tendencia general era negar la acción a distancia, por mor de la común aceptación del axioma escolástico de origen desconocido, “*matter cannot act where it is not*” – también conocido como Principio de Presencialidad<sup>170</sup>, a saber, que la presencialidad es necesaria por la acción. El filósofo Immanuel Kant (1724-1804) fue el primero en proponer como primaria la acción a distancia y no la acción por contacto en su obra de 1786 *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (Parte II. Enunciado 6, Teorema 7)<sup>171</sup>, lo que propició que algunos físicos posteriores incorporaran teorías que presuponían la acción a distancia no solo desde una planteamiento matemático, sino también físico.

---

<sup>170</sup> James Tallarico, "Action at a Distance" *The Thomist: A Speculative Quarterly Review* 25, no. 2 (1962): p. 253.

<sup>171</sup> “Die aller Materie wesentliche Anziehung ist eine unmittelbare Wirkung derselben auf andere durch den leeren Raum”. Immanuel Kant, *Metaphysische Anfangsgründe Der Naturwissenschaft* (Riga: Johann Friedrich Hartknoch, 1786), p. 60.



Como señala Hesse, el debate sobre los modos de acción no es un debate aislado. Las cuestiones acerca de qué modo de acción puede tener lugar y cuál no, es algo que depende del contexto en el que dicho tipo de transmisión se establece como explicativo de un proceso natural, es decir, del contexto de la analogía o modelo presupuesto por la teoría que trata de explicar tal fenómeno<sup>172</sup>. A pesar de que sus orígenes conceptuales se encuentran en Aristóteles, el adagio "*matter cannot act where it is not*" cobró pleno sentido una vez que se tuvo una concepción diferenciada de qué es la materia, es decir, en la época de los modelos fundamentales.

En este epígrafe se expondrán las diversas propuestas acerca de los modos de acción que tuvieron lugar en la época de los modelos fundamentales, haciendo especial hincapié en el motivo por el que cada teoría optó por considerar como explicativo uno u otro. Estos motivos son muy variados: porque el modelo que presupone el modo contrario al que se defiende no llega a explicar determinados fenómenos, porque se quiere rechazar un concepto que está fuertemente vinculado con un modo de acción o porque se quiere rechazar una teoría concreta que implica un modelo, etc. Como puede observarse, los motivos pueden tener origen metafísico, epistemológico o de "eficacia" científica. Es más, cuanto más se avanza en la Historia de la Ciencia, los motivos metafísicos tienen cada vez menos peso, peso que ganarían los motivos más

---

<sup>172</sup> Cfr. Hesse, *Forces and Fields*, p. 30.

---

relacionados directamente con la ciencia en su función explicativa y predictiva.

Antes de tratar los modos de acción en los modelos fundamentales conviene detenerse en algunos aspectos de cómo se entendía la acción en épocas anteriores al siglo XVII ya que la influencia de, por una parte, la doctrina aristotélica y, por otra, las explicaciones animistas o espiritualistas anteriores al mecanicismo, determinaron en gran medida la preferencia por la acción por contacto en las teorías de la época de los modelos fundamentales<sup>173</sup>. Por último, si bien se ha señalado que en la época de los modelos matemáticos el debate de los modos de acción carece de sentido, resulta de interés, al menos, mencionar aquellas teorías que trataron de retener la terminología de este debate, analizando por qué.

---

<sup>173</sup> Como señala Hesse, una vez que la diferencia entre lo real y lo no real, lo material y lo no material, etc. quedó establecida en el pensamiento de la antigüedad griega las analogías tendieron a considerar que el cambio de movimiento era el producto de la acción de un átomo sobre otro y, dado que *“it is evident that no action can be transmitted **through** the non real except by passage of the real, so if there is no action at a distance, interaction can take place only by collisions of atoms and no **via** any other kind of medium”*. Sobre la posibilidad de que se tomara en consideración en este periodo que la acción tiene lugar a distancia Hesse subraya *“it does not seem logically impossible to conceive of action ‘jumping’ across the void from one atom to another, but the conception would clearly be difficult, for the only quality of an atom that can be changed is its motion, and we have very little experience of one body changing the motion of another at a distance”*: Ibid., pp. 45-46.

### 2.3.1 Modos de acción en las analogías y modelos pre-científicas

Las explicaciones de la época pre-mecanicista agrupan dos tipos de explicaciones diferentes: las analogías pre-científicas y los modelos sistemáticos, que se diferencian de las primeras en que poseen algunas características científicas, como la experimentación, en la exposición de sus teorías.

Afirmar hasta qué punto alguna de las analogías pre-científicas implican acciones a distancia es algo difícil, puesto que la mayoría de sus enunciaciones no son sistemáticas y no hacen explícitos estos aspectos. Por este motivo, Hesse señala que el único modo de plantearse qué explicaciones sobre la acción se aceptan en el contexto de dichas analogías es buscar explicaciones que sugieran algún tipo de continuidad espacial de causas cuando con tales explicaciones se intenta dar cuenta un fenómeno que aparentemente es a distancia<sup>174</sup>: si esto fuera el caso, a saber, que fenómenos que parecen ser a distancia se explican en términos de acciones continuas sí se puede establecer que la explicación del fenómeno en cuestión trata de negar la acción a distancia. Para ilustrar este punto, Hesse como ejemplo la “analogía del discurso” que aparece en el *Fedro*<sup>175</sup> de Platón. En esta obra, la explicación de

---

<sup>174</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 34.

<sup>175</sup> Plato, "Parmenides, Philebus, Symposium, Phaedrus" in *Platonis Opera. Tomus II*, ed. Ionnes Burnet (New York: Oxford University Press, 1901), 235c-d, p. 34.

---

cómo la palabra actúa sobre el oyente (fenómeno que aparentemente ocurre a distancia) tiene como explicación que la respiración que el hablante emite con la palabra llenaría físicamente los pulmones del oyente (explicación de transmisión por contacto).

De las propuestas de la época pre-científica la de mayor interés para este estudio es la doctrina aristotélica sobre el cambio. Esta propuesta no solo es explícita, detallada y deductivamente sistemática<sup>176</sup>, sino que además se constituyó como referente en los siglos posteriores<sup>177</sup>. Son varias las obras, como se indicará, en las que Aristóteles trata el problema del cambio en relación con la acción. De hecho, las temáticas vinculadas con esta doctrina se pueden agrupar en torno a cuatro grandes principios los cuales Aristóteles, o bien asumió, o bien trató de probar. Estos cuatro principios son: (1). la negación del vacío, (2). que todo movimiento tiene una causa del mismo, (3). que el móvil debe estar en contacto

---

<sup>176</sup> *"It was his solution of this primary Greek problem which fixed for succeeding centuries the standard ways of describing matter and change and forms of action between bodies, not perhaps this solution was intrinsically so much more satisfactory than others, but because of the sheer weight and impressiveness of his logical method"*: Hesse, *Forces and Fields*, p.60.

<sup>177</sup> *"On grounds of consistency and reasonableness it was not the thorough-going mechanical philosophy of the atomism that had the greatest subsequent influence, but the theory of Aristotle. This itself contained elements of mechanism, at least in its accounts of local motion, but Aristotle found reasons for rejecting many of the tenets of atomists, particularly their assertion that there is void, and their denial of all causes and forms of interaction other than mechanical"*: Ibid., p. 60.

con lo movido, y (4). que por cada movimiento hay un primer motor inmóvil.

Con respecto al debate acerca del primer principio, la existencia del vacío, Aristóteles presenta dos argumentos negativos (es decir, en contra de su existencia) y uno positivo (es decir, a favor de su existencia). En el caso de los argumentos negativos Aristóteles trata de dar cuenta de las principales teorías que sostienen la necesidad que exista el vacío como condición de posibilidad del movimiento y como condición de posibilidad de la rarefacción, respectivamente. Uno de los argumentos que proponen Demócrito y Leucipo<sup>178</sup> es que el vacío es necesario para que pueda haber movimiento. Pero el primer argumento positivo de Aristóteles en relación con la existencia del vacío establece que esto no es así indicando que *plenum* el movimiento puede tener lugar y lo hace mediante antiperístasis, a saber, mediante el cambio de dos cuerpos que reemplazan en uno al otro (“*ἀμα γὰρ ἐνδέχεται ὑπεξίεναι ἀλλήλοι*”). Además señala que hay más tipos de cambio que los cambios cuantitativos señalados por Demócrito y Leucipo, entre los que se encuentra el cambio cualitativo (“*ἀλλοιου γὰρ τὸ πλήρες ἐνδέχεται*”)<sup>179</sup> el cual no requiere necesariamente de la existencia del vacío. El segundo argumento

---

<sup>178</sup> Los textos de estos filósofos que hacen referencia al vacío pueden encontrarse en Forrest E. Baird, *Philosophical Classics, Volume I: Ancient Philosophy*, 6 ed. (New York: Routledge, 2016), pp. 40-42.

<sup>179</sup> Aristóteles, *Física. Edición Bilingüe*, trans. Ute Schmidt (México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2001), 241a28.

---

negativo se encuentra en la *Física* a continuación del anterior. En él Aristóteles sostiene que tampoco es necesario que exista el vacío para poder explicar la compresión o la rarefacción. Como señala Harold H. Joachim, comentarista de Aristóteles, este argumento se sustenta sobre una concepción muy concreta de la materia (*ύλη*) –concepción que él indica como sintetizando el texto 217a21-217b28 de la *Física*. Esta concepción se identifica con la descripción “*δύναμις τῶν ἐναντίων*”, es decir, es una concepción de la materia que entiende esta como capaz de volverse más grande, más pequeña o, por ejemplo, más densa, pero no densa en el sentido de que tenga más o menos “poros” dentro, como podría entenderse, sino en el sentido de que la materia de Aristóteles es “*capable of filling space with all possible degrees of intensity or capable of expanding and contracting without a break in its continuity*”<sup>180</sup>.

El argumento positivo acerca del vacío tiene como base el concepto aristotélico de ‘lugar natural’, es decir, el lugar cuerpos al que los cuerpos tienden por naturaleza, lugar que es “hacia” o “alejándose” del centro de la Tierra. Que los cuerpos tiendan a su lugar natural es, para Aristóteles, incompatible con la existencia

---

<sup>180</sup> Aristóteles, *Aristotle on Coming-to-Be & Passing-Away. A Revised Text with Introduction and Commentary by Harold H. Joachim* (Oxford: Oxford Clarendon Press, 1922), p. 124. Como señala Hesse, esta concepción de la material no puede ser comparada con la que la que la hidrodinámica moderna sostiene de los fluidos incompresibles ya que esta última conlleva una asociación entre densidad y movimiento de la materia que es contraria a la propuesta de Aristóteles. Cfr. Hesse, *Forces and Fields*, p. 65.

del vacío, porque si este existiera, los cuerpos no podrían saber cuál es su lugar en un cosmos en el que este se determina por “arribas” y “abajos”<sup>181</sup>.

El ‘lugar natural’ de los cuerpos es también una noción relacionada con el segundo principio de los cuatro que se han enunciado, a saber, todo movimiento tiene una causa del mismo. Concretamente, en los movimientos de los no vivos la causa está, como se acaba de indicar, en la cosa natural misma que tiende hacia su ‘lugar natural’. Por su parte, en el caso de los seres vivos la causa del movimiento está en el alma. Este principio está fuertemente vinculado con el tercero ya que si el movimiento no es natural, debe haber un móvil externo que lo ponga en movimiento como se enuncia en el tercer principio.

Que el contacto es el modo de la causalidad eficiente es la afirmación que subyace al tercer principio que, como se ha señalado, tiene el siguiente enunciado: el móvil debe estar en contacto con lo movido, a saber, si el movimiento no es natural debe haber un móvil externo. La noción de ‘estar en contacto’ (*τὸ ἄπτεσθαι*) de Aristóteles es una noción estrechamente vinculada a las de ‘ser consecutivo’ (*τὸ ἐφεξῆς*), ‘ser contiguo’ (*τὸ ἐξόμενον*) y ser ‘continuo’ (*συνεχές*). Según Aristóteles se dice que algo es

---

<sup>181</sup> Sobre el debate acerca de la noción de “lugar natural” y su relación con el debate acerca del vacío cfr. Helen S. Lang, *The Order of Nature in Aristotle's Physics: Place and the Elements* (New York: Cambridge University Press, 1998), pp. 67-78.

---

consecutivo cuando sucede a otro (en posición, en lugar) y entre ellos no hay nada del mismo género<sup>182</sup>. Un caso específico de ‘ser consecutivo’ es ‘ser contiguo’, a saber, cuando dos cosas que son consecutivas tienen alguno de sus límites en el mismo sitio<sup>183</sup>, es decir, cuando están en contacto. Si, además, los límites que están en contacto se ‘convierten en uno’, entonces se habla de ‘ser continuo’<sup>184</sup>. La principal diferencia entre ser continuo y ser consecutivo es que en el primer caso cuando las dos cosas se mueven lo hacen juntas mientras que en el caso de la contigüidad cada uno al separarse tiene un movimiento diferente.

Esta relación que Aristóteles establece entre la continuidad y estar en contacto es una de las principales herencias legadas por el filósofo a las teorías sobre los modos de acción de siglos posteriores. Concretamente el hecho de que lo que mueve debe estar en contacto continuo con el cuerpo movido. A este principio Aristóteles llega mediante generalización<sup>185</sup> de hechos empíricos<sup>186</sup> y no a partir de una demostración deductiva. Concretamente,

---

<sup>182</sup> Aristóteles, *Física*. Edición Bilingüe, 226b34-27a6.

<sup>183</sup> Ibid.226b21-23}

<sup>184</sup> Ibid., 227a10-17.

<sup>185</sup> “Aristotle presumably regards the necessity for contact-action as intuitively given in sense-experience, and hence according to his own principle he is able to universalize it”: Hesse, *Forces and Fields*, p. 68.

<sup>186</sup> Aristóteles argumenta desde fenómenos de la experiencia común y no desde principios a priori. Es lo que él denomina ‘inducción’. Sobre la ‘inducción’ en la obra de Aristóteles cfr. Aristóteles, *Aristotle's Prior and Posterior Analytics. A Revised Text with Introduction and Commentary by W. D. Ross*, 2 ed. (Oxford: Clarendon Press, 1957), pp. 47.51.



Aristóteles establece este principio a partir de la experiencia de los sentidos, concretamente desde el rol primordial que otorga al sentido de tacto (*ἄφη*)<sup>187</sup> porque, como subraya Hesse

*"[f]or Aristotle, touch is the primary sense upon which all the others depend. Thus, seeing, hearing, and smelling although they seem to take place at a distance, are possible only because there is a medium between the object and the sense organ which is modified by the object and modifies the organs by contact"*<sup>188</sup>.

El último principio aristotélico, a saber, por cada movimiento hay un primer motor inmóvil conviene destacar la importancia de que el caso del primer motor inmóvil de Aristóteles es el único que no actúa por contacto. Esto se debe a que, si de todo cuerpo que está en contacto con otro se puede decir que ambos se "tocan y son tocados" por el otro, esta afirmación no puede realizarse acerca del primer motor que está en contacto con lo que mueve, pero no "es tocado". Puesto que en este ámbito las analogías de mecanismos no resultan adecuadas, Aristóteles utiliza analogías de la acción humana como acción por fines (causalidad final en vez de eficiente) para ilustrar esta particularidad del Primer Motor. No obstante, incluso aunque en este caso específico el estar en contacto no pueda ser un requisito, sí lo es la conectividad y, por tanto, la presencia de la substancia que ejerce el movimiento. Resulta difícil determinar hasta qué punto el compromiso de Aristóteles con el

---

<sup>187</sup> Acerca de la concepción aristotélica del tacto cfr. Cynthia Freeland, "Aristotle on the Sense of Touch" in *Essays on Aristotle's De Anima*, ed. Amélie Oksenberg Rorty and Martha C. Nussbaum (Oxford: Clarendon Press, 1995).

<sup>188</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 62.

---

contacto para la transmisión del movimiento era debido a su propia concepción de la materia, su método de generalización a partir de la experiencia y su establecimiento del sentido del tacto como primario y no debido a una convicción acerca de este modo de acción. En cualquier caso, el principio “la materia no puede actuar donde no está<sup>189</sup>” se adoptó como resumen de estos cuatro principios aristotélicos y se constituyó en el principal dogma de la acción por contacto (o acción continua).

En este periodo anterior al de los modelos fundamentales, como subraya Hesse<sup>190</sup>, la acción a distancia ser rechazaba casi universalmente por lo que, además de la doctrina aristotélica, pocas doctrinas más tuvieron impacto en desarrollos posteriores. Una de estas excepciones es la doctrina de la multiplicación de las especies de Roger Bacon (1214-1292), doctrina que, en cierto modo puede considerarse como una “prototeoría” de las teorías pertenecientes al modelo fundamental de campos (o teorías de transmisión de fuerzas a través del espacio). En su obra *De Multiplicatione Specierum*<sup>191</sup> Bacon plantea su doctrina para explicar las transmisiones de fuerza. Siguiendo a J. H. Bridgnes, traductor y comentarista de sus *scriptum principales* (entre los que se incluye el

---

<sup>189</sup> De hecho, si en este adagio no se menciona el contacto es precisamente para poder incorporar el cuatro principio.

<sup>190</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 81.

<sup>191</sup> Roger Bacon, *Specula Mathematica in Qua, De Specierum Multiplicatione, Earundemque in Inferioribus Virtute Agitur* (Francofurti: Wolfgang Richter, 1614), pp. 168-205.

Tratado sobre la Multiplicación de la especie), el término '*species*' es el término escogido por Bacon para describir la emanación continua de fuerza por parte de un cuerpo en todas las direcciones<sup>192</sup>. Esta doctrina tiene en común varios puntos fundamentales con las teorías del medio continuo (ondulatoria, de ondas y de campos). En primer lugar, las '*species*' de Bacon no son emitidas por el cuerpo que actúa, al igual que la teoría de ondas se opone a las teorías por emisión. En segundo lugar, el modo de actuar de las '*species*' es similar al modo en el que la transmisión de la acción se explica en algunas concepciones de la teoría de campos, a saber, el agente estimula una actividad potencial del medio (que en el caso de Bacon sería material), haciendo llegar la actividad al cuerpo paciente. Es más, las '*species*' son de naturaleza corpórea, pero no de la de los cuerpos entre los cuales se propaga la acción (ya que, de otro modo, al generarse, estos cuerpos terminarían deshaciéndose), sino de la del medio. Y, por último, que la propagación de las '*species*' tiene lugar en el tiempo<sup>193</sup>.

Con anterioridad a los modelos fundamentales solo un fenómeno se podía considerar como un serio candidato a la acción a distancia, a saber, el fenómeno de atracción de minerales como la magnetita o el ámbar. Varios intentos habían tratado de dar cuenta de este fenómeno explicándolo a partir de movimientos en el

---

<sup>192</sup> J. H. Bridgnes, ed., *The 'Opus Majus' of Roger Bacon*, 2 vols., vol. 1 (London: Williams and Norgate, 1900), p. lxxv.

<sup>193</sup> *Ibid.*, p. clxxxix.

---

aire<sup>194</sup>. Sin embargo el filósofo natural William Gilbert (1544-1603) en su obra *De Magnete*<sup>195</sup> mostró que nada corpóreo pasaba desde los minerales al cuerpo atraído situando una llama entre ambos, llama que no se vio perturbada por ningún movimiento del aire. Ante esta situación Gilbert optó por explicar esta acción mediante un proceso de eliminación entre los dos tipos de acción disponibles en su momento, a saber, la acción por contacto de algún cuerpo y la acción por un alma inmaterial. Habiendo quedado la primera opción eliminada experimentalmente, solo hubiera quedado considerar que era una acción inmaterial procedente de un alma. No obstante, al ser un fenómeno de la naturaleza, Gilbert termina afirmando que sí que debe pasar algo entre los cuerpos

*"[q]uoniam enim nulla action a materia fieri potest nisi per contactum, eléctrica haec non viderunt tangere, sed ut necesse erat demittitur aliquid ab uno ad aliud, quod proxime tangat, eius incitationis principiúsit"*<sup>196</sup>.

A este "algo" lo denomina 'aliento'. Este 'aliento' parte de los minerales y a través de unos efluvias que actúan sobre un radio concreto de distancia, se llega al cuerpo atraído y se unen ambos. Por tanto, para Gilbert, incluso los fenómenos de atracción, cohesión, etc., aunque requieren algún tipo de fuerza atractiva, que él adscribe a la tendencia sustancias similares a unirse, solo se

---

<sup>194</sup> Hesse, *Forces and Fields*, pp. 87-88.

<sup>195</sup> William Gilbert, *De Magnete, Magneticisque Corporibus, Et De Magno Magnete Tellure*, 1 ed. (London: Peter Short, 1600).

<sup>196</sup> *Ibid.*, pp. 56-57.

manifiesta cuando el efluvia del cuerpo atractivo toca de hecho aquello que es atraído.

### **2.3.2. Modos de acción en la época de los modelos fundamentales**

Es característico de la física, como se ha señalado, que solo son consideradas como candidatas a explicaciones fundamentales las acciones que producen o tienden a producir movimiento. El resto de acciones, que llevan cambios de otras propiedades como la temperatura, se reducen a explicaciones en términos de movimiento. Esta restricción es incluso mayor a comienzos de la física clásica puesto que en dicho momento solo se consideraban como aceptables las explicaciones de los movimientos que son generadas por algo externo. De este modo, durante los dos primeros siglos del periodo de los modelos fundamentales (siglos XVII y XVIII), fuertemente vinculados al mecanicismo, se asume que los constituyentes de la naturaleza son las sustancias que tienen las propiedades de la materia tal y como se observan ordinariamente: posición, extensión en el espacio, persistencia en el tiempo, impenetrabilidad etc. Mary Hesse, en su artículo "*Action at distance in Classical Physics*" enumera los tipos de acción propios de este periodo y su relación tanto con los modelos físicos como con las formulaciones matemáticas de los mismos:

*"Fundamental actions between parts of matter and aether were conceived in three different ways: as **impacts**, as actions in a*

---

*continuous medium, and as actions at a distance. Each of these exhibits itself to common sense observation in a familiar type of mechanical process with may be called the physical model of the action, and each gave rise during the seventeenth and eighteenth centuries to a characteristic type of mathematical theory*<sup>197</sup>.

Como puede verse, los tres modos en que Hesse señala que se considera la acción se relacionan intrínsecamente con cada uno de los modelos que se han señalado como fundamentales: el impacto, con el corpuscularismo; las acciones en un medio continuo, con el modelo de campos entendido en un sentido amplio (es decir, cualquier comunicación por presión directa o movimiento de ondas, la hidrodinámica de Bernoulli y, en el XIX, la teoría de los sólidos elásticos continuos); y las acciones a distancia, con el modelo de fuerzas centrales. De cada uno de estos tres se tratará a continuación.

### 2.3.2.1. Modos de acción en el modelo corpuscular

El principal modo de acción en el modelo corpuscular en sus orígenes en el siglo XVII es el impacto, ya sea en el vacío o en ausencia de él. En este siglo los modos de acción dependían de los sistemas que se proponían como explicativos, ya que, como se indicó, los sistemas deductivos eran los principales tipos de explicación en este periodo. El "Sistema" con mayúsculas es el cartesiano que postula un *plenun* de materia en el que el

---

<sup>197</sup> Mary Hesse, "Action at a Distance in Classical Physics" *Isis* 46, no. 4 (1955): p. 338. El subrayado es mío.

movimiento solo puede consistir en vórtices (un tipo de anillos) que se mueven unos respecto a otros por una presión instantánea<sup>198</sup>. Aunque Hobbes sostiene una filosofía diferente a la de Descartes en lo que se refiere al tipo de sustancias que permite –puesto que para él no hay una sustancia corpórea y otra cognoscente sino que la segunda sería una función de la materia– en relación a qué tipo de transmisión de acción tiene lugar entre las posibles en el mecanicismo de su época en su ya mencionada obra *De Corpore*, Hobbes concuerda con Descartes en que debe ser por contacto<sup>199</sup> y en que no es posible el vacío.

Como oponente a la teoría mecánica de Descartes encontramos la teoría de Boyle. En su escrito de 1674 "*The Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis*"<sup>200</sup> dice que su teoría mecánica no es la de Descartes y, en cambio, considera que la materia la componen partículas, aunque se desconozca su naturaleza.

---

<sup>198</sup> Acerca de la teoría de los vórtices de Descartes cfr. E.J. Aiton, "The Cartesian Vortex Theory" in *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics. Part A: Tycho Brahe to Newton*, ed. René Taton and Curtis Wilson (Cambridge: Cambridge University Press, 1989), pp. 207-21.

<sup>199</sup> Esta concepción de movimiento como un continuo cambio de lugar no es la única concepción de movimiento en Hobbes. Para un análisis completo de la teoría de movimiento de Hobbes, tanto de esta concepción como de la concepción del movimiento como causa universal cfr. Jan H. Blits, "Hobbesian Dualism: Hobbes's Theory of Motion" *The Southern Journal of Philosophy* 28, no. 2 (1990).

<sup>200</sup> Robert Boyle, "About the Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis [Publ. 1674]." in *Selected Philosophical Papers of Robert Boyle*, ed. M. A. Stewart (Indianapolis, IN.: Hackett Publishing Company, 1991).

El modo de acción que no tiene cabida en ningún caso es la acción a distancia puesto que, como señala Hesse los corpuscularistas

*"had no doubt that action must be transmitted by contact and not at a distance, and this was a direct result of the association of action at a distance with souls, sympathies and antipathies, and other organic analogues"*<sup>201</sup>.

### 2.3.2.2. Modos de acción en el modelo de fuerzas centrales

La controversia acerca de la acción a distancia cambió de tercio en el siglo XVII con la enunciación de la ley de la gravitación por parte de Newton. ¿Por qué? En gran medida porque daba cuenta de uno de los dos fenómenos más difíciles de reconciliar con la acción por contacto, a saber, la caída de los cuerpos, (siendo el segundo el magnetismo). Y por otro, porque con su doctrina Newton empezó a priorizar la parte matemática de los teorías frente a las explicaciones físicas de los procesos.

El fenómeno de la caída de los cuerpos volvió a estar en el centro de las consideraciones acerca de los fenómenos naturales cuando el astrónomo Nicolás Copérnico (1473-1543) señaló que el Sol era el centro del universo<sup>202</sup> y no la Tierra, por lo que la

---

<sup>201</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 118.

<sup>202</sup> Copérnico estableció su heliocentrismo en el Libro I de su *Nicolás Copérnico, De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Norimbergae: Iohannum Petreium, 1543). Sobre cómo se desarrolló la teoría heliocéntrica de Copérnico cfr. Bernard R. Goldstein, "Copernicus and the Origin of His Helioncentric System" *Journal for the History of Astronomy* 33, no. 3 (2002): especialmente pp. 220-22.



explicación aristotélica del 'lugar natural' para la caída de los cuerpos ya no podía ser tomada en consideración, puesto que esta solo cobraba sentido en el contexto de la astronomía Ptolemaica en la que le Tierra era el centro. Además, el establecimiento por parte de Johannes Kepler (1571-1630) de las leyes del movimiento de los planetas alrededor del Sol habían establecido las condiciones que toda explicación que tratara de dar cuenta de la caída de los cuerpos o de los movimientos planetarios debía de cumplir. Pero Newton encontró una incompatibilidad entre la demostración de la Proposición 1<sup>203</sup> de la Sección 2 del Libro I de los *Principia*<sup>204</sup> (como se señaló en el subepígrafe anterior), en la que se trata la ley general de áreas que se corresponde con la segunda ley de de Kepler, y la existencia de un medio que causa resistencia (como el supuesto éter) y, como señala Dobbs, esto hizo a Newton abandonar también su asunción de que la fuerza sólo puede ser transmitida de un cuerpo a otro por contacto<sup>205</sup>.

Newton, por tanto, procede en sus investigaciones distinguiendo en todo momento las propiedades matemáticas de las fuerzas de sus causas físicas. Ya en el Escolio a la Proposición 59 de la Sección 11 del Libro I señala, como se ha indicado, que considera que el término 'atracción' designa cualquier '*endeavour*'

---

<sup>203</sup> Para un análisis del alcance de esta proposición cfr. Bruce Pourciau, "Newton's Argument for Proposition 1 of the Principia" *Archive for History of Exact Sciences* 57, no. 4 (2003).

<sup>204</sup> Newton, *Principia*, pp. 103-05.

<sup>205</sup> Dobbs, "Newton's Alchemy and His 'Active Principle' of Gravitation", p. 55.

de manera que, en su enunciación de la teoría de la gravitación, Newton parece dar a entender que los cuerpos pueden actuar unos sobre otros. Aunque al principio esta teoría, contraria al pensamiento establecido, tuvo sus detractores, en torno a 1800 la acción a distancia reemplazó a la acción por contacto como la herramienta de preferencia para dar cuenta de los fenómenos naturales<sup>206</sup>, gracias a las herramientas matemáticas que los matemáticos franceses de finales del siglo XVIII permitieron aplicar el análisis matemático a la física.

Entre los intentos de dar cuenta de la gravedad en términos de acción por contacto desde la filosofía natural conviene destacar el de un discípulo de Galileo conocido como Gilles Personne de Roberval (1602-1675). En su obra de 1644 *Aristarchii Samii de Mundi Systemata*, explica la gravedad (Roberval lo expone en término de por qué las estrellas no caen unas sobre otras) suponiendo que el universo está lleno de partes de un éter fluido que tienen propiedades de atracción mutua de manera que tienden a moverse hacia el centro de gravedad del todo. Con respecto a los fenómenos astronómicos sostiene que todas las partes de la tierra, el sol o los planetas tienen esta propiedad.

También los filósofos de la época desempeñaron un papel en este debate. De hecho, Kant, “*in spite of his preference for continuity*

---

<sup>206</sup> Henk W. Regt, *Understanding Scientific Understanding* (New York: Oxford University Press, 2017), Sección Contextuality and Historical Dynamics. To be published in October.

*he accepted action at a distance*"<sup>207</sup>, por su admiración de la obra de Newton, fue el primero en considerar la acción a distancia como la acción fundamental. Kant trata acerca de la acción de los cuerpos físicos en su obra de 1786 *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*<sup>208</sup> que dedica a descubrir las formas *a priori* bajo las cuales los conceptos empíricos, como la materia, pueden ser conocidos. De hecho, para Kant, la ciencia física la constituyen el concepto empírico 'materia' y los principios *a priori* bajo los cuales puede ser conocida<sup>209</sup>. La única propiedad de este concepto 'materia' en cuanto que su aspecto dinámico<sup>210</sup> es su impenetrabilidad y esa propiedad es algo que no es *a priori*, sino

---

<sup>207</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 171.

<sup>208</sup> Kant, *Metaphysische Anfangsgründe Der Naturwissenschaft*.

<sup>209</sup> Para Hesse, la propiedad de Kant no se presenta como suficientemente consistente "*Kant, (...) prefers to regard impenetrability as due to a primitive repulsive force by which matter extends itself over a given space and hinders the entry of any other matter into that space. The status of this conception is not entirely clear in the Anfangsgrunde, for although Kant mentions several reasons for preferring the conception of relative impenetrability of atoms, none for these are strong enough to show that impenetrability **must** be conceived as relative, and this cannot therefore have the status of an a priori principle*": Hesse, *Forces and Fields*, p. 173.

<sup>210</sup> Que es el aspecto que concierne a este estudio y que se encuentra en el Capítulo 2. En su obra, tal y como indica en el Prólogo) se dedica el Capítulo 1 (Foronomía) a considerar el movimiento como puro *quantum* dejando de lado su cualidad de móvil; el Capítulo 2 (Dinámica) a estudiar la 'fuerza motriz primordial' que es la perteneciente a la cualidad de 'materia'; Capítulo 3 (Mecánica) a tomar en consideración la materia provista de esta cualidad en virtud de su propio movimiento; y el último capítulo (Fenomenología) únicamente se dirige a determinar el movimiento o el reposo con relación al modo de, es decir, como fenómeno del sentido externo.

---

que es algo dado por la sensación. Los motivos que da para realizar esta afirmación es que la atracción newtoniana (una fuerza) se puede mostrar y está sujeta a leyes de variación, pero la impenetrabilidad como absoluto no se conoce, por tanto, es la fuerza repulsiva la que es una propiedad original y fundamental de la materia; es decir, la fuerza repulsiva es la propiedad que hace posible la impenetrabilidad. En este sentido, se puede decir que para Kant los conceptos de 'fuerza' y 'materia' se hacen equivalentes.

Las fuerzas repulsivas y atractivas no tienen un estatus equivalente para Kant. Las primeras, no actúan a distancia, actúan necesariamente donde están, concretamente por contacto entre las superficies de los cuerpos y están limitadas por ellos<sup>211</sup>. En caso de actuar sobre una materia distante lo harían por medio de una materia que esté en medio. En cambio, las fuerzas atractivas pueden actuar sin un medio, de hecho, actúan a distancia<sup>212</sup> "inmediatamente" a través del espacio vacío. De estas fuerzas se dice que penetran el espacio sin llenarlo. De esto modo, Kant la erige como fundamental incluso a costa de que sea asimétrica<sup>213</sup>.

---

<sup>211</sup> No olvidemos que esta fuerza es la que se constituye en condición de posibilidad de la impenetrabilidad.

<sup>212</sup> Kant, *Metaphysische Anfangsgründe Der Naturwissenschaft*, pp. 59-60.

<sup>213</sup> La afirmación de Kant de que la fuerza atractiva es más primitiva que la repulsiva no está exente de polémica. Para un análisis detallado de esta afirmación cfr. Michael Friedman, *Kant's Construction of Nature. A Reading of the Metaphysical Foundations of Natural Science* (New York: Cambridge University Press, 2013), pp. 203-06.

Al tomar la fuerza atractiva a distancia como primaria Kant solo tiene que contestar a las críticas a esta concepción. Para él, la objeción más importante "*wider die unmittelbare Wirkung in die Ferne ist: daß eine Materie doch nicht da, wo sei nicht ist, unmittelbar wirken könne*"<sup>214</sup>. No obstante, para Kant, que algo pueda actuar donde no está no es algo que sea contradictorio en sí mismo, puesto que, incluso por contacto, todo actúa en algo que está "fuera de sí" y, por tanto, donde no está. Es decir, Kant considera que el punto de contacto no es parte del cuerpo<sup>215</sup>, es decir, considera el punto de contacto en términos físicos y no matemáticos.

Al contrario que Kant, Leibniz era contrario a admitir la acción a distancia, no por ninguna motivación proveniente de la física, sino porque contradecía dos de los fundamentos de su filosofía, a saber, la no existencia del vacío y el principio de continuidad<sup>216</sup>, de acuerdo con cual las acciones tienen lugar sin cambios bruscos, sino de un modo continuo.

No obstante el mismo argumento de la continuidad de Leibniz es usado por el matemático y astrónomo croata Ruđer Josip Bošković (1711-1783) para llegar establecer precisamente lo contrario, a saber, que la continuidad requiere de la acción a

---

<sup>214</sup> Kant, *Metaphysische Anfangsgründe Der Naturwissenschaft*, p. 62.

<sup>215</sup> En la misma línea que Aristóteles consideró que el continuo eran cuerpos en contacto que se habían "hecho uno", algo que no generaba el mero contacto sino algo más.

<sup>216</sup> Cfr. Timothy Crockett, "Continuity in Leibniz's Mature Metaphysics" *Philosophical Studies* 94, no. 1/2 (1988).

---

distancia. En su *Theoria Philosophiae Naturalis* de 1758<sup>217</sup> Bošković deriva su metafísica de los principios de Leibniz, principios que integra con la física de Newton y que aplica a todos los fenómenos físicos, es decir, trata de subsumir bajo un función continua de fuerzas la gravedad a distancias finitas, las fuerzas repulsivas que producen los impulsos ordinarias, la cohesión y las fuerzas atractivas y repulsivas de la electricidad.

Bošković sostiene que la materia son en puntos idénticos sin extensión que solo tienen como propiedades la inercia y la capacidad de ejercer fuerzas unos sobre otros con una magnitud que solo depende de sus distancias mutuas. Estos puntos serían una versión en el espacio físico de las Mónadas (unidades últimas de la realidad) de Leibniz. Hesse señala el contraste en el uso de la ley de la continuidad por parte de Bošković y Leibniz señalando que

*“Bošković invokes a Leibnizian law of continuity to show that even the impact of bodies must ultimately involve forces at a distance. He agrees with Leibniz that if the ultimate particles of matter are finite, there would be a discontinuous change of density at their boundaries, and that if they came into absolute contact, their velocities of would change discontinuously and an infinite force would be required. But instead of invoking an infinite regression of elastic parts, he concludes that the primary elements of matter must be simple points”<sup>218</sup>.*

---

<sup>217</sup> Ruggero Giuseppe Boscovich, *Theoria Philosophiae Naturalis* (Vienna: Officina Libraria Kaliwodiana, 1758).

<sup>218</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 164.

Lo más novedoso de la propuesta de Bošković es el hecho de reemplazar la noción de ‘partículas con extensión’ por la de ‘puntos matemáticos con inercia’, lo que, unido a su comparación de la acción de entre estos puntos con la que ocurre en las terminaciones de los muelles, según Hesse<sup>219</sup>, sugieren un modo de plantear el mundo físico en el que la fuerza es más fundamental que la materia.

### 2.3.2.3. Modos de acción en el modelo de campos

En el modelo de campos los modos de acción evolucionan a lo largo de los siglos, siglos en los que las diferentes teorías sobre la acción continua se hacen más sofisticadas. En la segunda mitad del siglo XVII estas teorías son las de la transmisión y, al menos en el caso de la luz, habían desplazado a las teorías de la emisión. Esto tuvo lugar puesto que las primeras permitían más posibilidades para explicar propiedades de la luz como la variación de la frecuencia y la amplitud. La principal teoría de la transmisión es la de Robert Hooke (1635-1703) quien en su obra de 1678 *De Potentia Restitutiva*<sup>220</sup> sostiene que la materia consiste en partes que están en continua vibración y que la extensión de un cuerpo se debe a la amplitud de esa vibración. Estas vibraciones se comunican de una partícula a otra por el impacto de sus oscilaciones finales. Además,

---

<sup>219</sup> Ibid., p. 166.

<sup>220</sup> Robert Hooke, *Lectures De Potentia Restitutiva or of Spring* (London: John Martyn, 1678).

la *Micrographia*<sup>221</sup> (1665) había establecido ya la equiparación entre vibraciones y el calor y había afinado que la luz se transmite por vibraciones que llegan a grandes distancias y que lo hacen (rasgo fundamental de las teorías de la transmisión continua) en poco tiempo pero no de manera instantánea.

En el siglo XVII el gran logro de las teorías del *plenum*, o teorías del continuo, fue la formulación de la teoría de ondas para explicar la luz propuesta por Huygens. Este filósofo natural rechaza las teorías corpusculares porque la velocidad a la que pueden desplazarse es muy pequeña y porque, de existir las emisiones alterarían unas a otras. Según Huygens, por tanto, "*L'on ne sçauroit douter que la lumiere ne consiste dans le mouvement de certain matiere*"<sup>222</sup>, de modo que el aire propaga el sonido y la luz es propagada por un éter sutil que penetra los cuerpos.

Siguiendo a Huygens se volvió común explicar los fenómenos físicos en términos de materia burda (*gross*) y de fluidos sutiles cuyas partículas ejercían atracciones y repulsiones mutuas. Por ejemplo Benjamin Franklin (1706-1790) introdujo el concepto de fluido eléctrico en una carta en 1747<sup>223</sup>, un fluido elástico cuyas

---

<sup>221</sup> Robert Hooke, *Micrographia; or, Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses. With Observations and Inquiries Thereupon* (London: Jo. Martyn and Ja. Allestry, printers of the Royal Society, 1665).

<sup>222</sup> Huygens, *Traité De La Lumière*, p. 2.

<sup>223</sup> Cfr. Roderick W. Home, "Franklin's Electrical Atmospheres" *The British Journal for the History of Science* 6, no. 2 (1972): doi:10.1017/S0007087400012255.



partes son mutuamente repulsivas y que es atraído por la materia ordinaria. Otros fluidos de la época son el flogistón o el calórico<sup>224</sup>.

El gran avance de las teorías de los fluidos con respecto al siglo XVII es que representan hasta qué punto se podía hablar de fuerzas sin tener que introducirlas con ciertas disculpas, como tuvo que hacer Newton, rebudiándolas en su viabilidad matemática. Y en el siglo XIX, como veremos en el Capítulo 4 los aspectos matemáticos de estas teorías empezaron a ser dominantes por la demanda de una precisión y falsabilidad que otras teorías no proveían a la hora de dar cuenta de fenómenos como la electricidad o el magnetismo, entre otros.

### **2.3.3. Modos de acción en los modelos matemáticos**

Hablar de modelos de acción en los modelos matemáticos resulta paradójico puesto que, como se ha señalado, estos modelos pertenecen a una concepción de lo que es una explicación científica que no incluye los modos de acción como algo de que se deba dar cuenta. No obstante, la terminología relacionada con los modos de acción, a saber, acción continua/por contacto y acción a distancia, está presente en estos modelos aunque su contenido no sea el mismo al que hemos venido haciendo referencia hasta ahora.

---

<sup>224</sup> Un análisis detallado acerca de los fluidos imponderables puede encontrarse en Giuliano Pancaldi, "The Physics of Imponderable Fluids" in *The Oxford Handbook of the History of Physics*, ed. Jed Z. Buchwald and Robert Fox (Oxford: Oxford University Press, 2013).

De hecho, las teorías de la ciencia moderna que hacen referencias específicas acerca de los modos de acción se contemplan suelen ser aquellas que hacen uso del término 'acción a distancia'. Una vez que la velocidad de luz queda establecida como la velocidad máxima de propagación son precisamente estas teorías las que más problemáticas resultan puesto que, hasta dicho momento, la acción a distancia se identificaba con la acción instantánea.

Uno de los más prominentes defensores de la acción a distancia en las teorías relativistas es el astrofísico Edward Arthur Milne (1896-1950). La teoría de Milne surge en el contexto de la primera época de la teoría de la relatividad general de Einstein, en la que presentar variantes de esta teoría no era algo atípico. La teoría de Milne construye un sistema gravitatorio relativista sin el recurso a la curvatura del espacio ni a ninguna teoría de la gravitación específica (dos de las características más destacadas de la teoría de Einstein). Según él, esta propuesta sería mejor que la teoría 'general' de la relatividad de Einstein puesto que esta última adopta, sin justificación, una ley de la gravitación (o ecuación de campos) que incorpora el esquema newtoniano de la gravitación. Él propone, por su parte, un sistema gravitatorio construido en el espacio plano y en el tiempo newtoniano de cada observador, que resulta ser un sistema de densidad de partículas no-cero y que se mueven sin restricciones.

*“We could, **if we wished**, analyze our changes of motion in **terms of action at a distance**. We should, again, be at liberty to consider such actions at a distance as propagated instantaneously, or as propagated with the speed of light; the results of the analysis would be different in the two cases. For example, we might find that in one mode of analysis we could introduce a constant parameter  $\gamma$  which we could call a constant of gravitation; on the other modes of analysis we might find the same parameter to be effectively dependent on the time, and effect which might be described as arising from the ‘influences’ of distant particles retarded by a finite time of propagation. Actually the analysis of our statistical system contains only the constants  $C$  and  $\eta_1$  both connected with the function  $\psi$  defining the distribution considered”<sup>225</sup>.*

Esta propuesta de Milne parte de descripciones de eventos y fenómenos que pueden ser hechos por un observador único (*single*) con sus propios instrumentos, y luego busca las condiciones que deben satisfacer cierto conjunto de fenómenos cuando las descripciones de observadores diferentes son comparadas. La principal diferencia de esta propuesta con respecto a la de Einstein es que en esta última los eventos se presentan a partir de coordenadas que el observador no ha descrito mientras que en la teoría de Milne se toman como coordenadas las newtonianas<sup>226</sup>. No obstante, los observadores en esta teoría también tienen que

---

<sup>225</sup> E. A. Milne, *Relativity, Gravitation and the World-Structure* (Oxford: Clarendon Press, 1935), p. 276. El subrayado es mío.

<sup>226</sup> “The general theory is stated first in terms of concepts and a conceptual symbolism, and the laws of the structure are stated in the same conceptual terms. In the kinematic treatment, too, we start by choosing a space – the ordinary space of physics for each observer. We relate different observers’ different spaces. But we begin with no theory of world-structure, nor do we assume the existence of ‘laws of nature’. We begin with the observations that could be made and worked up towards to the regularities that these observations, to be compatible, must satisfy”: *Ibid.*, p. 346.

adoptar un sistema congruente de coordenadas ya que si no, no se aplica el principio de la relatividad. En palabras de Milne:

*"The system was completely 'relativistic' in the only significant sense of the Word, namely that its members, describing their experiences according to the same rules for combining observations, had identical experiences – or rather superposable experiences"*<sup>227</sup>.

Milne tampoco asigna a la gravedad un valor causal, como no lo hizo Einstein. Pero la postura de Milne es incluso más positivista si cabe que la de Einstein, ya que no admite la existencia de constantes universales en la naturaleza. Por ejemplo para Milne la 'constante universal' de Einstein

*"was supposed to be a genuine constant of nature, though introduced empirically. In our kinematic treatment of gravitational problems no constant of nature are introduced at all"*<sup>228</sup>.

La propuesta de Milne, por tanto, elimina de su sistema las leyes de la naturaleza, las coordenadas del espacio tiempo y la geometría (al considerar el espacio como plano). Todo ello para evitar lo que él considera que son asunciones injustificadas por parte de Einstein. Esto le permite no circunscribir el movimiento de las partículas de su sistema a ninguna restricción y, por tanto, postular la acción a distancia. Sin embargo, así establecida la 'acción a distancia' no postula ningún modo de acción sino solo la no restricción en los movimientos de las partículas en un sistema dado.

---

<sup>227</sup> Ibid., p. 273.

<sup>228</sup> Ibid., p. 294.

En el caso de la mecánica cuántica, la acción continua, en el sentido de las teorías clásicas de campos, queda prohibida por la existencia de formulaciones que toman el principio de incertidumbre como absoluto ya que si se insiste en describir los interfenómenos ("*interpolation within the world of phenomena*"<sup>229</sup>) en términos o bien de partículas o bien de ondas, a lo único a lo que se llega, como señala Hesse, es a un tipo de acción discontinua espuria. También afirma que si se usaran ambos modelos a la vez, lo que sería

*"a unsatisfactory situation of having to use both of two contradictory models, and this cannot be regarded as more than a temporary conceptual device unless we are prepared to abandon the whole standpoint that modes are potentially true or false descriptions, that is, that relative to some empirical evidence, a decision can be made between contradictory models regarded as more than a temporary conceptual device unless we are prepared to abandon the whole standpoint that modes are potentially true or false descriptions, that is, that relative to some empirical evidence, a decision can be made between contradictory models"*<sup>230</sup>.

Por tanto, en consonancia con Reichenbach, la postura de la física moderna es una posición restrictiva según la cual la cuántica no hace afirmación alguna acerca de los interfenómenos sino solo de los estados que son descritos en términos observables y que serían, potencialmente, fenómenos. Pero entre dichos fenómeno no hay una acción causal, por lo que el debate sobre los modos de acción entre los fenómenos es, cuanto menos, irrelevante.

---

<sup>229</sup> Hans Reichenbach, *Philosophical Foundations of Quantum Mechanics* (Berkeley: University of California Press, 1944), p. 21.

<sup>230</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 271.



## CAPÍTULO 3. LAS EXPLICACIONES CIENTÍFICAS EN EL DEBATE ACTUAL

*En este capítulo se expone la evolución del debate acerca de las explicaciones científicas desde el periodo en que Hesse enunció su teoría de modelos hasta la actualidad. De entre las nuevas propuestas se presentará como alternativa a la propuesta de Hesse, la propuesta de modelos de Nancy Nersessian. Desde esta propuesta se despejarán los principales problemas que Hesse plantea para relegar los modos de acción al campo de lo metafísico.*

### 3.1. EL CONTEXTO FILOSÓFICO DE LA TEORÍA DE MODELOS DE HESSE

Desde 1954 Hesse comienza a realizar estudios acerca del estatus de las afirmaciones sobre las acciones entre cuerpos. En el *Bulletin of the British Society for the History of Science* se recoge un *abstract* de una conferencia de Hesse (Leeds, 13 de Marzo de 1954)<sup>231</sup> en la que se afirma claramente su interés por esta problemática. En dicha conferencia se señala que hay dos tipos de afirmaciones en las ciencias físicas. Por un lado están las

---

<sup>231</sup> "Action at a Distance (Abstract)" *Bulletin of the British Society for the History of Science* 1, no. 10. Supplement Number 8 (1954).

afirmaciones observacionales que son directamente testables. Por otro, las no-observacionales, carentes de un contenido empírico que se pueda testar de un modo directo<sup>232</sup>. El que ya en esta conferencia Hesse destaque que las afirmaciones acerca de cómo se comunica la acción entre cuerpos son claros ejemplos de afirmaciones no-observacionales será determinante para las conclusiones sobre esta temática que presentará en su monografía. Precisamente por lo que se acaba de subrayar, cuando, a continuación, Hesse plantea cuál es el estatus lógico de este tipo de afirmaciones, las no-observacionales, utiliza como ejemplo la siguiente afirmación "*Action is communicated between the fundamental particles of matter by their mutual impact*"<sup>233</sup>.

En respuesta a la pregunta sobre el estatus de esta afirmación Hesse presenta cuatro posibles interpretaciones: la 'realista' que considera que dicha afirmación es una descripción de un hecho empírico; la respuesta que plantea que, al ser no-observacional, esta afirmación carece de significado; la respuesta 'formalista' que considera que esta afirmación solo puede tener significado si es formalizada mediante un cálculo matemático a partir del cual se puedan deducir afirmaciones observacionales; y la interpretación de esta afirmación como una descripción analógica, según la cual la se describiría un modelo de lo macroscópico, en este caso el

---

<sup>232</sup> Esta distinción es la propia de la teoría positivista de las explicaciones científicas que se tratará en el próximo epígrafe.

<sup>233</sup> "Action at a Distance (Abstract)": p. 257.



impacto, para explicar un fenómeno de lo microscópico, en este caso las acciones comunicadas entre las partículas fundamentales. Hesse toma postura a favor de esta última marcando con ello el rumbo de la investigación en el resto de sus trabajos.

Hesse considera que el estatus lógico de las afirmaciones se ha de analizar en el contexto en el que fueron usadas. En este caso, esto conlleva un estudio de la historia del concepto que está involucrado: el de acción. Por este motivo, Hesse realiza un primer análisis historiográfico del debate acerca de la transmisión de la acción que ser irá ampliando en obras posteriores. Sus primeras aproximaciones a la historia de este concepto parten de los tres diferentes tipos de acción que se debaten desde el siglo XVII: la acción por impacto, la acción en un medio continuo y la acción a distancia para. Además, se centran en el estudio de dos hitos de la evolución de dicho concepto: la interpretación realista que dicho concepto tuvo en su origen y el abandono de dicha interpretación debido a la influencia de los dos hombres de ciencia, Faraday y Maxwell, en el siglo XIX.

El siguiente estudio de Hesse en relación al problema de la transmisión de la acción es un artículo publicado en 1955 bajo el título "*Action at a Distance in Classical Physics*"<sup>234</sup>. En este artículo, además del estudio de cómo se entiende la acción a distancia en la física clásica tratando en profundidad lo que las interpretaciones

---

<sup>234</sup> Hesse, "Action at a Distance".

---

físicas de Faraday de las teorías de la acción supusieron para las interpretaciones de los modelos físicos<sup>235</sup>, introduce como paradigma de explicación científica para dar cuenta de dicho estudio el de las explicaciones analógicas, en concreto, las que hacen uso de modelos. Aún más, es importante subrayar también que en este artículo se inserta otra temática que tendrá una especial relevancia en su obra *magna* sobre este tema —el ya mencionado libro *Forces and Fields*—: la cuestión acerca de los principios metafísicos que tuvieron influencia en las explicaciones de la ciencia clásica. De hecho, comienza su artículo con una breve descripción de los antecedentes históricos de los siguientes principios: “*matter cannot act where it is not*”, “*the conservation of motion*”, “*so wise, so worthy of supreme Being*” y la “*law of continuity*”. Si bien el análisis en profundidad de los orígenes de estos principios se realizará en su monografía de 1962, las claves de dicho análisis se establecen ya en este artículo: se han de reinterpretar las controversias que generaron y se ha de establecer su relación con los diferentes modelos que dan cuenta de cómo se transmite la acción.

Recogiendo todo lo anterior Hesse presenta el problema de la acción a distancia en el *Prefacio* de *Forces and Fields* como el problema que puede ilustrar el rol de las analogías y modelos en física si se analizan las respuestas que se le ha dado a lo largo de la

---

<sup>235</sup> A este menester dedica dos secciones del artículo, que se analizarán en el capítulo 6, en el que se analizarán los modelos británicos acerca de la acción.

historia de la física<sup>236</sup> a si dicha acción es o no posible. El motivo de emprender tal tarea, según Hesse, es precisamente el de reivindicar cuán fundamental es dicho rol —el de los modelos— en las explicaciones científicas.

Ya desde el primer capítulo subraya que, a lo largo de la historia de la ciencia, han estado presentes dos visiones acerca de qué son las teorías científicas: la propuesta empírica —que ella rastrea hasta la *Navaja de Ockham*— y la propuesta realista —cuyo origen Hesse sitúa en la filosofía natural que deriva de Aristóteles. Según Hesse<sup>237</sup>, la principal característica de la visión empirista o positivista de la ciencia es que esta visión sostiene que los compromisos que se asumen con una teoría han de ser los mínimos que permitan una correlación con los resultados experimentales y predicciones. Por su parte, el rasgo distintivo de la visión realista es que ésta se comprometería con que las teorías son descripciones de las realidades físicas. Si la oposición entre ambas visiones está presente desde los orígenes de lo que consideramos ciencia en la actualidad, Hesse recalca que, en los momentos de cambios radicales en la ciencia, esta disyuntiva se pone especialmente de manifiesto. Esto es el caso, por ejemplo, de la ruptura que se produjo en el modo de hacer ciencia hasta finales del siglo XIX y con posterioridad a dicha fecha, ruptura tan brusca que su influencia alcanzó todos los debates de la filosofía de la ciencia.

---

<sup>236</sup> Cfr. Hesse, *Forces and Fields*, p. v.

<sup>237</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 2.

En cierto sentido puede considerarse que la aparición de la filosofía de la ciencia como tal fue propulsada por dicha ruptura, especialmente si se tiene en consideración que una de las principales cuestiones a la que dieron lugar estos cambios en la ciencia fue precisamente el de cuál es el estatus de las teorías científicas. Por este motivo, en el primer capítulo de *Forces and Fields*, que introduce el contexto conceptual de su posterior análisis historiográfico en los capítulos posteriores de dicha obra, Hesse detalla la evolución que ha sufrido la respuesta acerca de dicho estatus.

Comienza con el “operacionalismo”, propuesta que tiene como origen la obra del físico Arthur Eddington (1882-1944) y que interpreta los conceptos físicos como cantidades físicas definidas mediante operaciones. En palabras de Eddington: “A physical quantity is defined by a series of operations and calculations of which it is the result”<sup>238</sup>. Como siguiente propuesta en la evolución histórica de la teoría de las explicaciones científicas, Hesse presenta los desarrollos que se derivaron de los trabajos del Círculo de Viena: el modelo hipotético-deductivo y la “teoría del diccionario”. Por último, introducirá lo que ella propone como la propuesta que mejor da cuenta del estatus de las teorías científicas: la teoría de los

---

<sup>238</sup> Arthur Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity* (Cambridge: Cambridge University Press, 1923), p. 3. Sobre el operacionalismo de Eddington cfr. Clive M. Kilmister, *Eddington's Search for a Fundamental Theory Key to the Universe* (Cambridge: Cambridge University Press, 1994), pp. 49-52.

modelos. ¿Cómo justifica esta elección? Precisamente porque sus análisis de la historia de la ciencia, del quehacer científico y de los debates de los propios científicos, evidencian la persistencia de los científicos en hablar de modelos cuando se ocupan de tareas teóricas<sup>239</sup>.

Una vez establecido el marco en el que se enmarca la obra de Hesse conviene explicitar el propósito de este capítulo. Este propósito es doble. En primer lugar, se contextualizará el debate en el que Hesse encuadra su análisis del estudio de la acción, es decir, el debate acerca de las explicaciones científicas el cual, en la actualidad, no se reduce a las propuestas que Hesse presenta en el primer capítulo de su obra. Al hilo del establecimiento de este debate se irán haciendo referencias a las propuestas a las que Hesse hace explícita mención en dicho capítulo, como el “operacionalismo” o el modelo hipotético-deductivo. En segundo lugar, se explicitarán las cuestiones de la filosofía de la ciencia que subyacen a dicho debate y el estado de la cuestión actual del debate acerca de los modelos. A continuación se introducirán las propuestas actuales que se consideran más adecuadas para solventar el problema principal de la obra de Hesse con respecto al estatus de las teorías acerca de la transmisión de la acción. Este problema, tal como se expone en la introducción, radica en el hecho de que dichas afirmaciones hayan de relegarse, según

---

<sup>239</sup> Cfr. Hesse, *Forces and Fields*, p. 22.

establece Hesse, al ámbito de la metafísica porque no pueden ser falsadas empíricamente. También se expondrá el rol que, en la actualidad, desempeñan los modelos en las teorías científicas. Para ellos se presentarán diferentes tipologías de modelos que se compararán con la de Hesse. En este último apartado se hará especial hincapié en la propuesta de Nancy Nersessian quien, desde el ámbito de las ciencias cognitivas, propuso en 2009 los modelos como el razonamiento científico genuino.

### 3.2. LAS TEORÍAS DE LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA

No se trata en este epígrafe de realizar un estudio exhaustivo acerca del estatus de las explicaciones científicas, no solo por la cantidad y la relevancia de los estudios que ya han llevado a cabo esta tarea<sup>240</sup>, sino también porque no es el propósito del presente trabajo tratar este debate. Por tanto, en este epígrafe se realizará una introducción a la problemática de dicho debate y se señalarán los diversos hitos que la han marcado. Con ello se pretende dotar de contexto a la obra de Hesse y su propuesta.

---

<sup>240</sup> Entre ellas conviene destacar Wesley C. Salmon, *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World* (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1984)., Peter Godfrey-Smith, *Theory and Reality. An Introduction to the Philosophy of Science, Science and Its Conceptual Foundations* (Chicago: University of Chicago Press, 2003). o Alan Richardson and Thomas Uebel, eds., *The Cambridge Companion to Logical Empiricism* (New York: Cambridge University Press, 2007).

Se puede presentar el debate acerca del estatus de las explicaciones científicas como un grupo de problemas acerca de en qué consiste "explicar" científicamente. Algunos de estos problemas, que irán haciéndose presentes a lo largo de este texto, son: ¿cómo es posible pasar de un nivel básico de explicación a uno de mayor nivel? ¿cuál es la función propia de una explicación? – representar, predecir describir, etc. – ¿cuál es la relación entre lo que se entiende en ciencia por explicación y la comprensión ('*understanding*') que se logra con ella? y ¿cuáles son las características estructurales de una teoría explicativa en virtud de las cuales se da dicha comprensión?

### 3.2.1 La *Received View*

En la introducción a la segunda edición de su obra *The Structure of Scientific Theories*<sup>241</sup>, el filósofo de la ciencia Frederick Suppe presenta los orígenes de lo que en la actualidad se considera como la interpretación estándar (a partir de ahora *Received View*) de las teorías de las explicaciones científicas. La interpretación estándar se considera tal por la independencia epistemológica de la que ha gozado: sobrevivió a sus orígenes, el positivismo lógico, incluso cuando éste se rechazó.

El positivismo lógico surgió académicamente como reacción a las propuestas de Hegel y los neo-hegelianos quienes explicaban

---

<sup>241</sup> Frederick Suppe, ed., *The Structure of Scientific Theories*, 2nd ed. (Urbana: University of Illinois Press, 1977).

los fenómenos naturales en términos de entidades abstractas las cuales, además, eran consideradas como metafísicas. La reacción a esta vinculación entre ciencia y metafísica provino del positivismo lógico, que trataba de dar una “garantía” al conocimiento vinculándolo a nuevos parámetros no relacionados con lo metafísico. La propuesta generada por esta reacción fue la que estableció los cimientos de la *Received View*. No obstante, conviene señalar que antes de que el positivismo lógico se estableciera como tal, se habían formulado ya alternativas a los excesos del neohegelianismo. Estos planteamientos se dieron en el contexto de dos corrientes neokantianas, que si bien no fueron las que finalmente cristalizaron como propuestas estándar, tuvieron una importante influencia en el positivismo lógico. La primera de ellas son los desarrollos del filósofo Herman Cohen (1842-1918) y la escuela de Marburgo, desarrollos que trataban de dar cuenta del crecimiento del conocimiento científico a partir de los modelos mecánicos materiales de la década de 1870, que solo permitían descripciones de fenómenos y no postulaban entidades abstractas. La segunda es la propuesta del físico Ernst Mach (1818-1916)<sup>242</sup>

---

<sup>242</sup> Mach expuso sus reflexiones sobre el método de las ciencias en la parte dedicada a la enseñanza de las ciencias (pp. 282-285 de la referencia posterior) del discurso que pronunció el 16 de Abril de 1886 ante la Delegación Alemana de la Asociación de profesores de la Escuela Media, “On Instruction in the Classics and the Sciences”. Cfr. Ernest Mach, *Popular Scientific Lectures*, trans. Thomas J. McCormack, *Cambridge Library Collection* (Cambridge: Cambridge University Press, 2014; reprint, from the original of 1895, Chicago: Open Court Publishing), pp. 259-97. Sobre este discurso como



quien consideraba la ciencia como una reflexión sobre los hechos y negaba los principios kantianos de que dichos hechos se nos dieran a la conciencia a través de la sensación y de la existencia de unos elementos *a priori*. Según Mach, en cambio, las afirmaciones científicas habían de ser verificables empíricamente a través de las sensaciones, por lo que las afirmaciones científicas se redujeron solo a las que trataban acerca de sensaciones. Su propuesta conllevaba un problema: que la ciencia incorpora una serie de elementos que no son reducibles a sensaciones: las relaciones entre sus conceptos. En concreto, las relaciones matemáticas son las que más dificultad presentan a la hora de reducirse a sensaciones. A pesar de que estas propuestas no se consolidaran, la necesidad de que, desde el neokantianismo, la ciencia no postulara entidades abstractas (Cohen) y estuviera estrechamente vinculada con las sensaciones (Mach), fue un aspecto que determinó lo que posteriormente se convirtió en la proposición estándar. La influencia de Mach tuvo incluso más alcance. El surgimiento de la nueva física en el siglo XX reafirmaba la negación que Mach había realizado de la existencia de un espacio y tiempo absolutos (los *a priori* kantianos ya mencionados) a partir de las propuestas de Einstein. Esto conllevó que surgieran algunas otras propuestas del neokantismo que trataron de dar cuenta de las nuevas teorías. En el siglo XX ya no se trataba de explicar la ciencia del sentido común,

---

referente del planteamiento positivista Cfr. Bruce Mazlish, *The Uncertain Sciences* (New Haven: Yale University Press, 1998), p. 63.

puesto que las nuevas teorías lo retaban, sino de preguntarse explícitamente por la propia naturaleza de las teorías científicas. Sin embargo, con la nueva ciencia también se debilitaba la propuesta de Mach –en tanto que ésta consideraba como necesaria la verificación de las teorías a través de sensaciones– puesto que en la nueva ciencia era necesaria la acomodación de los desarrollos matemáticos abstractos que estaban en su fundamento. Recogiendo el rechazo del neokantianismo a las relaciones entre ciencia y metafísica, fueron finalmente los desarrollos de la Escuela de Berlín y el Círculo de Viena –los cuales contaban tanto con miembros filósofos como con miembros científicos–, los que establecieron como criterio de significatividad de las teorías científicas la verificabilidad. La introducción de las matemáticas en el esquema de verificabilidad fue algo que realizó el científico Henri Poincaré (1854-1912). Según Poincaré, las teorías caracterizan las regularidades de los fenómenos, o leyes científicas, mediante términos teóricos. Al ser estos términos convenciones usadas para referirse a los fenómenos<sup>243</sup>, pueden ser explícitamente definidos mediante un lenguaje fenoménico y verificable (*phenomenal language*) del que los símbolos matemáticos serían una abreviación. De este modo, las leyes matemáticas –que son

---

<sup>243</sup> Henri Poincaré, *Science and Hypothesis* (New York: The Walter Scott Publishing Co, 1905), p. xx del Prefacio del Autor y p. 5.

aquellas que expresan relaciones matemáticas— no representarían más que las relaciones que se dan entre fenómenos<sup>244</sup>.

La *Received View* es fruto, precisamente, de todo lo expuesto con anterioridad. En concreto, se puede considerar como una epistemología particular (la del conocimiento científico) dentro de una propuesta que pretendía constituirse como una epistemología general que distinguiría el verdadero conocimiento del pseudoconocimiento (el positivismo lógico). El tener como foco de estudio el conocimiento científico es lo que le habría permitido a la *Received View* consolidarse incluso cuando el positivismo lógico se descartó como epistemología general desde la consideración de que no todo conocimiento es científico. No obstante, el positivismo sí era adecuado, como afirma el filósofo de la ciencia Frederick Suppe<sup>245</sup>, en el contexto de un análisis del conocimiento científico, y se constituyó como una parte de la filosofía que lidiaba con dicho subconjunto específico del conocimiento.

En la *Received View*, las propuestas de Mach y Poincaré fueron revisadas a la luz del proyecto logicista de Gottlob Frege (1848-1925), Georg Cantor (1848-1948) y Bertrand Russell (1872-1970), proyecto que trata de fundamentar las matemáticas en términos lógicos estableciendo la lógica como la esencia de la matemática.

---

<sup>244</sup> Conviene subrayar en este punto que esta propuesta es la que se corresponde con la que Hesse denomina en su obra “operacionalismo”.

<sup>245</sup> Frederick Suppe, "Introduction: The Search for Philosophical Understanding of Scientific Theories" in *The Structure of Scientific Theories*, ed. Frederick Suppe (Urbana: University of Illinois Press, 1977), p. 6, nota al pie.

---

Como resultado de esta revisión, el germen de la *Received View* se fraguó de tal manera que las teorías científicas se establecieron como lo que posteriormente el filósofo Hilary Putnam (1926-2013) denominaría “*partially interpreted calculi*”<sup>246</sup>. Este germen sostiene que una teoría científica apropiadamente formulada consiste en un sistema axiomático matemático (lógica de predicados con la igualdad) cuyas afirmaciones se interpretan mediante la sintaxis del cálculo –que se establece como lo que determina las pruebas lógicas validas– y el lenguaje fisicalista. Por su parte, los términos no lógicos se clasifican en dos tipos: los términos observacionales, que son interpretados mediante el lenguaje fisicalista, y los términos teoréticos que se consideran sin interpretar y que califican como descripciones abreviadas de los fenómenos. En este contexto, las leyes científicas serían lo que en una teoría así descrita, se formulan como axiomas. Siguiendo el análisis de Suppe<sup>247</sup>, las definiciones de los términos teoréticos se alcanzarían

---

<sup>246</sup> Putnam uso estos términos en referencia a la ‘Received View’ por primera vez en una charla en una recepción para Carnap en el “Congreso Internacional de Lógica, Metodología y Filosofía de la Ciencia” de 1960, tal como él indica en su autobiografía. Hilary Putnam, "Intellectual Autobiography of Hilary Putnam" in *The Philosophy of Hilary Putnam*, ed. Randall E. Auxier, Douglas R. Anderson, and Lewis Edwin Hahn (Chicago, Illinois: Open Court, 2015), p. 53. Acerca de si la interpretación de Putnam se corresponde con la ‘Received View’, cfr. los artículos Brent Mundy, "Scientific Theory as Partially Interpreted Calculus" *Erkenntnis* 27, no. 2 (1987). y Brent Mundy, "Scientific Theory as Partially Interpreted Calculus II" *Erkenntnis* 28, no. 2 (1988).

<sup>247</sup> Cfr. Suppe, "Introduction: The Search for Philosophical Understanding of Scientific Theories", p. 12.

partiendo de la axiomatización de la teoría mediante explicitaciones de las relaciones entre los términos teóricos y los observacionales, es decir, mediante lo que en denominación estándar se llaman 'reglas de correspondencia'<sup>248</sup>. Las funciones de las reglas de correspondencia en las teorías científicas serían esenciales: definen los términos teóricos pero además garantizan su significatividad. Además dichas reglas son las que especifican cuáles son los procedimientos empíricos permitidos para aplicar una teoría a un grupo de fenómenos. Por ejemplo, en el caso del operacionalismo, las "reglas" permitidas son aquellas que definen un concepto como un conjunto de operaciones<sup>249</sup>.

Dos problemas pueden ser detectados en esta propuesta de qué son las teorías científicas. En primer lugar, al evolucionar las prácticas científicas surgen nuevos métodos experimentalmente válidos y legítimos. Esto implica la necesidad de acomodarlos en el sistema axiomático, lo cual conlleva la necesidad de modificar las

---

<sup>248</sup> Sobre las *reglas de correspondencia* en relación con los términos teóricos véase Raimo Tuomela, *Theoretical Concepts*, vol. 10, *Library of Exact Philosophy* (Wien: Springer-Verlag, 1973), p. 143.

<sup>249</sup> La definición paradigmática de los conceptos científicos como operaciones es la que dio el físico Percy W. Bridgman al ilustrar cómo se obtiene operacionalmente la definición de longitud "*The concept of length involves as much as nothing more than the set of operations by which length is determined*" Percy W Bridgman, *The Logic of Modern Physics* (New York: The Macmillan Company, 1927), p. 5. Sobre la importancia de esta definición de Bridgman en el análisis del concepto de 'medida' desde la filosofía de la ciencia ver Hasok Chang and Nancy Cartwright, "Measurement" in *The Routledge Companion to the Philosophy of Science*, ed. Martin Curd and Stathis Psillos (New York: Routledge, 2008), pp. 367-68.

reglas y tiene como consecuencia una variación en la significatividad de los términos de una teoría. Por otro lado, y en un nivel de problematicidad más básico, incluso si todos los métodos empíricos permitidos han sido acomodados en una teoría, el requerimiento de que los términos teóricos tengan que ser definidos operacionalmente, resulta cuestionable puesto que podría derivar en que un término pueda tener más de una definición, en concreto, tantas como procesos para determinarlo.

El artículo que marcó la época de lo que canónicamente se conoce como la *Received View* de las teorías de las explicaciones científicas es el artículo de 1948 de Carl G. Hempel (1905-1997) y Paul Oppenheim (1885-1977), "*Studies in the Logic of Explanation*". Con él se estableció un consenso acerca de lo que eran las explicaciones científicas, ya que, como en el mismo comienzo del artículo se indica, no había un acuerdo acerca de cuáles eran las características de dichas explicaciones:

*"To explain the phenomena in the world of our experience, to answer the question "why"? rather than only the question "what"?, is one of the foremost objectives of all rational inquiry; and especially, scientific research in its various branches strives to go beyond a mere description of the phenomena it investigates. While there is rather general agreement about this chief objective of science, there exists considerable difference of opinion as to the function and the essential characteristics of scientific explanation"*<sup>250</sup>.

---

<sup>250</sup> Carl G. Hempel and Paul Oppenheim, "Studies in the Logic of Explanation" *Philosophy of Science* 15, no. 2 (1948): p. 135.

Como en este párrafo se señala, la ciencia tendría como propósito algo más que describir los fenómenos de la naturaleza: explicar por qué suceden estos. Este tipo de enfoque resulta llamativo si se tiene en cuenta que la tradición empirista que consideraba que lo propio de la ciencia eran las descripciones de la naturaleza, mientras que las “explicaciones” era algo que correspondían al campo de la metafísica. No obstante, el tratar de “explicaciones” en un contexto positivista se consideraba un buen modo de dar cuenta de las regularidades y las leyes con las que lidia la ciencia sin necesidad de acudir a “entidades abstractas” o “causas ocultas” propias de la metafísica.

El modelo de explicación propuesto por Hempel en el artículo señalado es el modelo Nomológico-Deductivo (ND). Según este modelo, las explicaciones serían argumentaciones, es decir, serían de carácter deductivo. Por ejemplo, un hecho es explicado por una ley científica si este se deriva de las afirmaciones de dicha ley científica. Por otra parte, según este modelo, la estructura de las explicaciones científicas sería la misma que la de sus predicciones (el otro gran ámbito de competencia de la ciencia): la sistematización deductiva<sup>251</sup>. Posteriormente el mismo Hempel introdujo otro modelo, el Inductivo-Estadístico (IS), entre otras razones para dar cuenta de la explicación de los fenómenos que no

---

<sup>251</sup> *“Scientific laws have the function of establishing systematic connections among the data of our experience, so as to make possible the derivation of some of those data from others”*: Ibid.: p. 164.

---

estaban 'bajo el paraguas' de una ley científica. En palabras de Hempel, este modelo también sería nomológico, porque presupondría las leyes generales, pero sería inductivo puesto que no daría una forma universal a sus afirmaciones, sino de alta probabilidad de que se dé un fenómeno a partir de una inducción desde un tipo concreto de eventos y las leyes estadísticas<sup>252</sup>. Como se ha indicado, no es función de este estudio un análisis exhaustivo del modelo de Hempel, sino presentar su propuesta para introducir, posteriormente, las alternativas a la misma. Basta, por tanto, con señalar que tanto en el ND como en el IS las explicaciones se entienden como argumentos, es decir, como algo que se puede esperar en virtud de unos hechos, y que Hempel desarrolló IS debido a la aparición en 1958 del Volumen II de los *Minnesota Studies in Philosophy of Science*<sup>253</sup> en el que varios autores realizaron afirmaciones muy críticas acerca de que las explicaciones no pudieran tener menos certeza que la proveniente de un modelo deductivo, que es la certeza máxima.

---

<sup>252</sup> Cfr. Carl G. Hempel, "Two Models of Scientific Explanation" in *Philosophy of Science: Contemporary Readings*, ed. Yuri Balashov and Alexander Rosenberg (Routledge, 2002), p. 51. En este texto que se publicó originalmente en Robert Garland Colodny, ed., *Frontiers of Science and Philosophy* (Pittsburgh: the University of Pittsburgh Press, 1962), pp. 9-33 se encuentra la explicación detallada de Hempel de ambos modelos. Robert Garland Colodny, ed., *Frontiers of Science and Philosophy* (Pittsburgh: The University of Pittsburgh Press, 1962), pp. 9-33.

<sup>253</sup> Herbert Feigl, Michael Scriven, and Grover Maxwell, eds., *Concepts, Theories, and the Mind-Body Problem*, vol. II, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1958).



### 3.2.2. Alternativas a la *Received View*

El número de propuestas alternativas a la *Received View* – considerada esta de ahora en adelante como la transmitida por Hempel – es variado y numeroso. Tanto, que no parece haber un acuerdo claro acerca de qué propuestas son alternativas reales a la *Received View* o cuáles, en el fondo, son solo desarrollos suyos de algún tipo. De hecho, este problema se da precisamente en torno a las teorías de los modelos propuesta de Mary Hesse: los seguidores, o los herederos de sus principales propuestas, la presentan como una alternativa; otros, como Suppe, sostienen que la teoría de los modelos sería otra –siendo que la primera sería la del cálculo– interpretación parcial<sup>254</sup> dentro de una concepción amplia de la *Received View*. Para Suppe, en el caso de la teoría de los modelos, la variación con respecto a la *Received Vie'* sería que los términos no observacionales, en vez de interpretarse mediante el lenguaje fisicalista, se interpretarían mediante el lenguaje científico natural. El mismo Suppe solo acepta como verdaderas alternativas a la *Received View* las teorías que son aproximaciones semánticas –siendo que la *Received View* es una aproximación sintáctica–, las que son análisis descriptivos de las teorías que concluyen en un escepticismo sobre que haya algo común entre dichas teorías –lo cual es una alternativa porque realiza una

---

<sup>254</sup> Suppe, "Introduction: The Search for Philosophical Understanding of Scientific Theories", p. 95.

---

enmienda al principio por el cual se establece la *Received View* —, o los análisis que presentan una perspectiva conceptual<sup>255</sup> o *Weltanschauung* de la que dependerían el significado de los términos.

De entre las diferentes clasificaciones y categorizaciones acerca de las diferentes propuestas alternativas a la *Received View*<sup>256</sup> a continuación realizaremos una que responde precisamente a un problema al que la *Received View* se enfrenta y que está intrínsecamente relacionada con los motivos por los que Hesse propone su teoría de los modelos. Este problema consiste en que la *Received View* no permite distinguir desde su propuesta inductiva las generalizaciones universales que son semejantes a leyes, es decir, que tienen la fuerza regulativa de una ley, de las generalizaciones que son accidentales. Concretamente el filósofo de la ciencia Wesley Salmon (1925-2001), uno de los críticos de la *Received View* señala como necesario para una teoría de las explicaciones científicas, que las generalizaciones que esta permite tengan trascendencia modal, es decir, que determinen qué es

---

<sup>255</sup> A pesar de que Suppe considera que los análisis desde un *Weltanschauung* son especialmente provechosos, considera que están demasiado vinculados a constructos metafísicos. Entre los autores que Suppe incluye en este grupo se encuentran Toulmin, Kuhn o Feyerabend. La inclusión de estos autores en dicha concepción no está exenta de polémica. *Ibid.*, p. 120 y pp. 234-35.

<sup>256</sup> De entre ellas conviene destacar, por la repercusión que tuvieron en estudios posteriores, la de Suppe, ya señalada, y la de Wesley Salmon (modal, epistemic and ontic): Wesley C. Salmon, *Four Decades of Scientific Explanation* (Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2006), p. 118.

posible o imposible en el mundo físico, o no podrían diferenciarse las teorías científicas de otro tipo de teorías<sup>257</sup>.

A continuación se presentan las diferentes propuestas alternativas a la *Received View* en los momentos en que fueron propuestas –muchas de ellas han sufrido modificaciones posteriores, e incluso algunas han sido abandonadas por aquellos que las propusieron. Lo que se subrayará, de cada una, sin intentar ser exhaustivos, será algunas de las repercusiones posteriores que ha tenido.

### 3.2.2.1. Teorías causales

El principal referente entre las teorías causales de las explicaciones científicas es la propuesta de Wesley Salmon. Habiendo trabajado durante años en el desarrollo del concepto de relevancia estadística necesario para la teoría IS, Salmon comenzó a trabajar en otras propuestas<sup>258</sup> debido a tres problemas que él encontraba en la *Received View*. El primero es precisamente el hecho de que desde las relaciones de relevancia estadística no se puede dar cuenta del modo en que explicaciones científicas de

---

<sup>257</sup> Philip Kitcher and Wesley C. Salmon, eds., *Scientific Explanation*, vol. XIII, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989), p. 14.

<sup>258</sup> El mismo Salmon detalla parte de este proceso en Wesley C. Salmon, "Scientific Explanation: Causation and Unification" *Critica* 22, no. 66 (1990): pp. 7-8.

---

gran importancia hacen referencia a entidades inobservables<sup>259</sup>. El segundo se relaciona con la necesidad de dar cuenta de la diferencia entre leyes y generalizaciones accidentales, como se ha dicho anteriormente. El tercero es la “paradoja de la transitividad”: el hecho de que no hay una transitividad entre las explicaciones de las teorías y sus predicciones<sup>260</sup> y la *Received View* no puede dar cuenta de este hecho. El primero de estos problemas llevó a Salmon a comenzar su estudio de los mecanismos causales<sup>261</sup>; el segundo, a realizar una distinción entre procesos causales y pseudo-procesos; y el tercero a dar importancia a las inferencias que no se realizan desde leyes, sino desde instancias particulares a otras instancias particulares<sup>262</sup>.

---

<sup>259</sup> Para la crítica de Salmon a los límites de las teorías estadísticas y la importancia de los estudios sobre causalidad véase Wesley C. Salmon, "Why Ask "Why"?. An Inquiry Concerning Scientific Explanation" in *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association*, vol. 51, n° 6. (San Francisco, California: American Philosophical Association, 1978), pp. 683-705.

<sup>260</sup> Según la *Received View*, sí que habría transitividad, la diferencia entre una explicación científica y una predicción científica, en términos de su esquema lógico, sería una diferencia pragmática. El contraejemplo que Salmon trae a colación en los escritos en los que trata este tema, es el hecho de que en la época de Newton los cambios en aparatos como los barómetros predecían cuestiones meteorológicas, pero no por ello daban una explicación de las mismas.

<sup>261</sup> Kitcher and Salmon, eds., *Scientific Explanation*, p. 106.

<sup>262</sup> Este hecho es uno de los principales problemas que Salmon encontraba en el modelo de la Relevancia Estadística. Para el análisis de Salmon al respecto véase el texto de Salmon en Timothy McGrew, Marc Alspector-Kelly, and Fritz Allhoff, eds., *Philosophy of Science. A Historical Anthology* (Malden: Wiley-Blackwell, 2009), pp. 536-50.

El modelo que propone Salmon es el siguiente: se puede afirmar que existe una interacción causal cuando dos procesos se cruzan y como resultado de su intersección, estos procesos se ven modificados. A partir de aquí se puede definir como un proceso causal aquel que es capaz de transmitir una marca, es decir, de modificar otro proceso cuando entra en interacción con él<sup>263</sup>. Esta marca tiene dos características fundamentales: transmite información y no necesita de intervenciones adicionales para persistir en el proceso una vez se ha dado la interacción.

El concepto de transmisión es un concepto fundamental para Salmon, ya que remite de un modo intuitivo a la idea de estructura, la idea de que lo que se transmite en un proceso que se ha visto modificado es una estructura. En palabras de Salmon, “[p]rocesses that can transmit marks *actually do transmit their own structure*”<sup>264</sup>. Por tanto, para Salmon, una explicación científica es aquella que revela cuál es el mecanismo que hace posible el proceso que se está tratando de explicar. ¿Incluyen las explicaciones científicas tal como las define Salmon referencias a las entidades inobservables? Salmon se cuestionó el estatus de

---

<sup>263</sup> Cfr. Salmon, "Scientific Explanation: Causation and Unification": p. 7.

<sup>264</sup> Kitcher and Salmon, eds., *Scientific Explanation*, p. 110. Esta concepción varió en algunos aspectos a lo largo del debate posterior que supuso, pero estas variaciones no son sustancialmente relevantes para el propósito de este estudio. La respuesta a las dos críticas más importantes puede leerse en Wesley C. Salmon, "Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques" *Philosophy of Science* 64, no. 3 (1997). El subrayado es de Salmon.

dichas entidades en la práctica científica: en su discurso están presentes. Pero desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia trató de evitar tanto las explicaciones sobre las entidades inobservables que las consideraban meramente instrumentales, como las consideraciones realistas que afirmaban de un modo directo su existencia. Su propuesta señala que el estudio de los fenómenos observables rara vez revela los mecanismos causales presentes en la naturaleza y, por este motivo, los esfuerzos por buscar explicaciones causales suelen llevar más allá del campo de los fenómenos observables. Sin embargo, esta postura de Salmon no implica la afirmación de la existencia de dichas entidades inobservables, lo que la propuesta implica es que el conocimiento de los inobservables sería por inferencia teórica a partir del conocimiento descriptivo. Para Salmon "*there is no logical necessity in the fact that causal mechanisms involve unobservable; that is just the way our world happens to work*"<sup>265</sup>. La teoría óptica de Salmon establece que las explicaciones describen características de la estructura del mundo por lo que afirma la existencia de un pequeño número de mecanismos fundamentales<sup>266</sup> que están gobernados por leyes globales. Por tanto, la teoría causal de Salmon otorga un rol en las explicaciones científicas a las entidades

---

<sup>265</sup> Kitcher and Salmon, eds., *Scientific Explanation*, p. 133.

<sup>266</sup> Algunos autores identifican estos mecanismos fundamentales de Salmon con las leyes fundamentales de la física. Cfr. Stuart Glennan, "Rethinking Mechanistic Explanation" *Philosophy of Science* 69, no. S3 (2002): p. 351.

inobservables, pero las interpreta desde el empirismo. Esta teoría establece que las leyes están vinculadas con mecanismos causales del mundo de manera que le permite evitar la paradoja de la transitividad al tener en cuenta la temporalidad de los procesos.

Más recientemente han surgido otras teoría causales que tratan de dar cuenta de fenómenos científicos de la biología o las ciencias sociales, como la de James Woodward<sup>267</sup> o la de Michael Strevens<sup>268</sup>, las cuales también estas se mantienen neutrales en relación a cualquier implicación o interpretación metafísica y, por tanto, son consideradas como realistas.

### 3.2.2.2. Teorías de modelos

La propuesta de Mary Hesse se presenta como una evolución a partir de la *Received View* ya que sus primeros artículos lidiaban con cuestiones específicas de esta interpretación de la ciencia —la de su época—, cuestiones que ponía en entredicho, como hizo, por ejemplo, al debatir sobre el operacionalismo a partir de la teoría

---

<sup>267</sup> James Woodward, *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*, *Oxford Studies in Philosophy of Science* (Oxford: Oxford University Press, 2003). Woodward propone una teoría de la causación manipulativa (en la que la manipulación de los hechos desempeña un papel fundamental) que no se basa en dependencias metafísicas, como el resto de las teorías que siguen esta propuesta, sino en un modelo probabilístico bayesiano.

<sup>268</sup> Michael Strevens, *Depth: An Account of Scientific Explanation* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2008). En esta obra Strevens amplía la teoría de la explicación causal más allá de la relevancia explicativa de la misma y desarrolla su propuesta, la teoría 'Kairética', para dar cuenta de explicaciones científicas más allá de las de la física.

---

cuántica de Paul Dirac (1902-1984)<sup>269</sup>. Con la teoría de los modelos se consolida, finalmente, como una alternativa. Los inicios de esta última se presentan en su artículo "*Models in Physics*"<sup>270</sup>. En dicho artículo se introduce dos ideas fundamentales: que las teorías científicas tienen un componente hipotético (y no solo deductivo como el ND), componente que no tiene relación inmediata con las observaciones; y que las deducciones se realizan a partir de dicho componente. Este artículo contiene un párrafo que resulta programático para el resto de la trayectoria intelectual de Hesse:

*"The main point that emerges from such a description of theories is that there can be no set of rules given for the procedure of scientific discovery – a hypothesis is not produced by a deductive machine by feeding experimental observations into it: it is a product of **creative imagination**, of a mind which absorbs the experimental data until it sees them fall into a **patterns**, giving the scientific theorist the **sense** that he is **penetrating** the flux of the phenomena to **real structure of nature**"<sup>271</sup>.*

De este texto cabe destacar, en primer lugar, que introduce el componente de "creatividad" del descubrimiento científico; en segundo lugar, que se subraya la existencia de unos patrones sin los cuales los datos de las observaciones no tendrían interpretación; y, en tercer lugar, que se establece una primera interpretación de la relación de estos patrones con el mundo físico: la idea de que hay una "sensación" de que están relacionados. No

---

<sup>269</sup> Mary Hesse, "Operational Definition and Analogy in Physical Theories" *The British Journal of the Philosophy of Science* 2, no. 8 (1952).

<sup>270</sup> Hesse, "Models in Physics".

<sup>271</sup> *Ibid.*: p. 198. El subrayado es mío.



todos los componentes presentes en este párrafo, como veremos a lo largo de este estudio, se corresponderán con la propuesta final de Hesse sobre los modelos, pero la intuición detrás de todos ellos está presente de un modo u otro en todas sus propuestas, especialmente los componentes que enuncia como principios que se derivan del análisis del uso de los modelos que realiza en el artículo:

Al presentar su teoría de los modelos Hesse establece el principio de que

*“[m]athematical formalisms, when used as hypotheses in the description of physical phenomena, may function like the mechanical models of an earlier stage in physics, without having themselves any mechanical or other physical interpretation”<sup>272</sup>.*

Hesse sostiene, por tanto, que se puede extender el uso del término ‘modelo’ desde los ejemplos de las ciencias del XIX a los formalismos matemáticos de las ciencias posteriores. ¿Podría hacerse uso de otro término para referirse tanto a los modelos como a los formalismos matemáticos? Posiblemente. La misma Hesse lo plantea en este artículo: *“It remains to decide the linguistic point, as to whether such abstract mathematical hypothesis are to be called ‘models’”<sup>273</sup>.* La elección de ese término por parte de Hesse determinó todo un debate posterior acerca del rol que estos desempeñan en las explicaciones científicas. ¿En base a qué realiza dicha elección? En base al hecho de que, al igual que los modelos

---

<sup>272</sup> Ibid.: pp. 198-99.

<sup>273</sup> Ibid.: p. 200.

físicos del siglo xix permitían desarrollos posteriores de las explicaciones más allá de la deducción de los hechos conocidos, así ocurre con las hipótesis de matemática abstracta de la ciencia moderna. En definitiva, Hesse introduce los modelos como elementos determinantes de las explicaciones científicas en tanto que gracias a ellos se pueden realizarse predicciones. De este modo, si bien Hesse comparte con la *Received View* su estructura hipotética-deductiva, su propuesta de cómo son posibles las predicciones se presenta como una alternativa a la misma puesto que en ella los ‘modelos’ y todo lo que considerarlos como imprescindibles a las teorías científicas conlleva, como veremos más adelante, es algo irrenunciable.

Un segundo principio que Hesse establece es que “[m]ost physicists do not regard models as literal descriptions of nature but as standing in a relation of analogy to nature”<sup>274</sup>. Este principio indica que el “sense” de haber penetrado la estructura real de la naturaleza no es entendido por Hesse con como un conocimiento de la naturaleza real.

Ya se ha señalado al comienzo de esta sección que para Suppe la propuesta de Hesse no sería una verdadera alternativa a la *Received View*<sup>275</sup>, sino una interpretación parcial de la misma en

---

<sup>274</sup> Ibid.: p. 201.

<sup>275</sup> No es únicamente Suppe el que considera que la propuesta de Hesse no es una alternativa. En la p. 381 del artículo “*The Metaphorical Conception of Scientific Explanation*”, sobre el que se tratará en el epígrafe posterior, la

términos del lenguaje científico natural. Pero conviene indicar ahora, en el contexto ya de la propuesta específica de Hesse, la crítica directa que Suppe le dirige –que se extiende también, puesto que las equipara con respecto al estatus de los modelos, a la teoría del filósofo Ernest Nagel (1901-1985)<sup>276</sup>. Según esta crítica, si bien es aceptable que los modelos tengan un papel heurístico en las explicaciones científicas, no es así que sean “*essential and integral components of theories*”<sup>277</sup>. Por tanto, sostiene que Hesse necesitaría una propuesta más fuerte acerca de qué son las explicaciones científicas para sostener el papel irrenunciable de los modelos en las mismas. Si bien la crítica de Suppe no es muy sólida, no es tan importante traer a colación dicha crítica por el hecho de que la

---

historiadora de la ciencia Maria Rentetzi. La autora afirma que Hesse considera que el modelo ND deber ser “*modified*” y “*supplemented*”, recogiendo una frase literal de una conferencia de 1962 reimpresa en un artículo “The explanatory function of metaphor” en Hesse, *Models and Analogies in Science*, pp. 157-77. Cfr. Maria Rentetzi, “The Metaphorical Conception of Scientific Explanation: Rereading Mary Hesse” *Journal for General Philosophy of Science* 36 (2005): p. 381. No obstante, Rentetzi concluye que, por tanto, Hesse no pretende superar dicha teoría, cuestión que es interpretación propia de Rentetzi puesto que dicha conferencia seminal sobre el uso de las metáforas no recoge posteriores comentarios de Hesse acerca de su propuesta de la función de las analogías en la ciencia, por ejemplo, en Mary Hesse, *The Structure of Scientific Inference* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1974), pp. 213-22.

<sup>276</sup> Cfr. Ernest Nagel, *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanations* (London: Routledge, 1961). Véanse páginas 90-117 en las que se presenta la propuesta de Nagel de la Received View en la que propone los ‘modelos’ como interpretaciones semánticas.

<sup>277</sup> Suppe, ed., *The Structure of Scientific Theories*, p. 99. El subrayado es de Suppe.

---

haga él y de qué modo la hace-es más, Suppe se retractó posteriormente de esta postura frente a los modelos en 1998 y afirmó que estos eran más “básicos” que las teorías<sup>278</sup> – sino por el hecho de qué aspecto del debate sobre los modelos resalta, es decir, hay un cierto consenso en que los modelos desempeñan un papel importante en las teorías científicas, pero el estatus de este rol no está claro.

En 1963 Hesse presenta una obra en la que establece explícitamente los principios de su propuesta de teoría de las explicaciones científicas, “*Models and analogies in Science*”<sup>279</sup>. En ella sostiene que, contrariamente al valor que el físico Pierre Duhem (1861-1916) otorga a los modelos en las explicaciones científicas, estos son parte integral de las mismas. Duhem considera que los modelos distraen al científico de su verdadero cometido de la ciencia como sistematizante y considera que su correspondería a unos “*esprits imaginatifs*”<sup>280</sup>. En su obra Hesse presenta al físico y

---

<sup>278</sup> Frederick Suppe, "Understanding Scientific Theories: An Assessment of Developments, 1969-1998" *Philosophy of Science* 67. Supplement. Proceedings of the 1998 Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association (1998): p. 110.

<sup>279</sup> La edición que se usará es la de 1966 de la University of Notre Dame Press, que incorpora al final otros dos ensayos de Hesse sobre la lógica de la Analogía en Aristóteles. Hesse, *Models and Analogies in Science*.

<sup>280</sup> Pierre Duhem, *La Théorie Physique. Son Objet Et Sa Structure* (Paris: Chevalier & Rivière, 1906), p. 88. La referencia que Hesse usa de la obra de Duhem es la que se indica en la Bibliografía de su obra en la página 178. Ahí Hesse afirma que el *locus classicus* de la disputa es la obra de Duhem *The Aim and Structure of Physical Theory* (Princeton: 1954) e indica que la primera

filósofo de la ciencia Norman Robert Campbell (1880-1949) como defensor de que son necesarios para las explicaciones en la ciencia<sup>281</sup>, puesto que es gracias a ellos que la ciencia puede ser predictiva. No obstante, el debate entre ambos acerca de los modelos está acotado al ámbito del debate sobre los modelos mecánicos, modelos que Hesse considera difícilmente acomodables a la física del siglo xx. De hecho, señala que el hecho de que no haya modelos ‘inteligibles’ de la física cuántica es una refutación del papel preponderante de los modelos que Campbell sí parece sugerir.

Hesse presenta en su artículo en forma de diálogo las cuestiones que este debate suscita para luego analizarlas en una sección posterior dedicada a las “analogías materiales”, aquellas en la que los análogos no tienen una identidad estructural sino ciertas propiedades en común que son observables<sup>282</sup>. En palabras de Hesse:

*“If a scientific theory is to give an ‘explanation’ of experimental data, it is necessary for the theory to be understood in terms of some model or some analogy with events or objects already familiar? Does “explanation” imply an account of the new familiar and*

---

publicación fue como *La Théorie physique* en 1914. Este dato es erróneo: la primera edición tuvo lugar en 1906. Este dato es relevante puesto que en ese periodo el desarrollo de las teorías de la ciencia moderna obtuvo importantes avances, sobre todo en el campo de la mecánica cuántica.

<sup>281</sup> Robert Norman Campbell, *Physics. The Elements* (Cambridge: Cambridge University Press, 1920).

<sup>282</sup> La clasificación que Hesse realiza de los tipos de modelos tanto en esta obra como en *Forces and Fields* se tratará en un epígrafe posterior de este capítulo.

---

*intelligible, or does it involve only a correlation of data according to some other criteria, such as a mathematical economy or elegance*"<sup>283</sup>.

Con este párrafo, con el que Hesse inicia su introducción al debate sobre los modelos, se establecen los términos en que va a realizar su propia propuesta tanto en esta obra como en la de 1974 *The Structure of Scientific Inference*. A continuación se establecerán los principales puntos de dicha propuesta. Según Hesse, los modelos permiten realizar predicciones sobre fenómenos puesto que permiten ampliar conocimiento científico mediante extensiones entre lo que ya se conoce y los fenómenos que son análogos a estos. Los argumentos a partir de analogías requieren que haya una cierta causalidad entre los términos que caracterizan un análogo para comprometerse con las predicciones "*and hence the relevant relations are causal, at least in the sense on implying a tendency to co-occur*". Algunos de estos términos hacen referencias a propiedades necesarias para que se pueda establecer una analogía

*"and the network of causal relations thus established will make the occurrence of one property at least tend, subject to the presence of other properties or event, to promote or inhibit the occurrence of another"*<sup>284</sup>.

De entre los posibles modos de analizar la "tendencia a co-ocurrir", Hesse escoge realiza un análisis que recoge desde la interpretación de Hume a hasta llegar a la interpretación modal. Si bien afirma que no es determinante el tipo de análisis causal que se

---

<sup>283</sup> Hesse, *Models and Analogies in Science*, p. 1.

<sup>284</sup> *Ibid.*, p. 78.

realice –siempre y cuando esta sea aceptable en términos científicos–, en la teoría de modelos lo que sí se ha de asumir es que el *mismo* sentido de relación causal que se toma del modelo es la que se transfiere a lo que se quiere explicar (*explicandum*)<sup>285</sup>. Además, Hesse sostiene que es necesario que los caracteres o propiedades en juego en dicho modelo no sean “ocultos” o entidades teóricas sino “observables”, puesto que es debido a estas características por las que se reconocen las similitudes de sistemas que causalmente pueden ser distintos.

Los anteriores aspectos de las características de las explicaciones por modelos determinan las bases sobre las que la argumentación analógica es atacada: que las similitudes son demasiado superficiales o que la relación causal asumida es inapropiada para la cuestión que se está tratando. Para contestar a estas críticas Hesse indica que se podría considerar como aceptable una teoría causal si cumple los mismos criterios que se pide para que una teoría científica sea satisfactoria, siendo el requisito mínimo la co-ocurrencia frecuente de ciertos factores que son en sí mismos diferentes pero que

*“the use of analogical argument presupposes a stronger causal relation than mere co-occurrence (...) but it does not presuppose that the actual causal relation is known”*<sup>286</sup>.

---

<sup>285</sup> Ibid., p. 79.

<sup>286</sup> Ibid., p. 84.

Por tanto, Hesse admite que si la relación de conexión entre los caracteres que se afirman como comunes no es una conexión causal científicamente aceptable, el argumento analógico no sería válido. A estos dos requisitos que se han puesto a los modelos materiales<sup>287</sup>, a saber, poder predictivo (es decir, falsabilidad fuerte para predecir nuevos predicados observacionales) y cierta clase de justificación en términos de los criterios de elección usuales para seleccionar teorías que dependen de los modelos, Hesse considera que se debe añadir la afirmación de que los modelos materiales son esenciales para las teorías.

El razonamiento analógico también tiene una función a la hora de adscribir algo en sí mismo no observable a entidades teóricas u observacionales. El modo de realizar esta adscripción es inferir los términos no observables desde otra entidad a partir de un razonamiento analógico. Según Hesse lo que no es observable puede ser

*“introduced as new observation predicates by assuming them to recognizable empirical situations where descriptions have not been required in prescientific language (...) Such introduction of novel terms will of course share the characteristic of all observation predicate of being dependent for their functions on observed associations or laws as well as direct empirical recognitions”<sup>288</sup>.*

De este modo, el hecho de que un mismo predicado (Hesse concretamente pone el ejemplo de carga) tenga diferentes implicaciones en su relación con las leyes en contextos teóricos

---

<sup>287</sup> Cfr. Ibid., pp. 128-29.

<sup>288</sup> Hesse, *The Structure of Scientific Inference*, p. 30.



distintos es algo que queda muy bien representado con la teoría de modelos.

Queda finalmente presentar las características que, según Hesse, caracterizan a un modelo<sup>289</sup>. Como ya se ha señalado, un modelo presenta una serie de propiedades que se adscriben desde el modelo a aquello a lo que el modelo hace referencia: es la denominada “analogía positiva”. Por otro lado, hay propiedades del modelo que no se pueden encontrar en aquello de lo que se considera modelo, que es lo que se denomina “analogía negativa”. Por último, hay un conjunto de propiedades del modelo que no se puede determinar si pertenecen al conjunto de las positivas o de las negativas y que son las que permiten realizar predicciones: es lo que se denomina la “analogía neutra”. Los modelos se diferencian de lo que en la *Received View* se denominan teorías, puesto que los modelos, como sistema explicativo, incluyen aspectos que no han sido interpretados en términos de “observables”. Además, la “analogía neutra” permite extender las teorías al cuestionarse si las propiedades que constituyen dicho conjunto son positivas o negativas. Esto implica también el diseño de nuevos experimentos para testar dichas respuestas, lo cual permite el crecimiento de una teoría y da cuenta de la predictividad de las explicaciones científicas. En definitiva, la teoría de los modelos subraya que

---

<sup>289</sup> Hesse, *Models and Analogies in Science*, p. 8.

valorar qué teoría es mejor no se puede hacer deductivamente sino teniendo en cuenta tanto factores lógicos como no lógicos.

### 3.2.2.3. Unificacionismo y pragmatismo

Las interpretaciones unificacionistas son aquellas según las cuales los fenómenos que tienen lugar se derivan a partir de una teoría que unifica fenómenos diversos. Parte de sus defensores, además consideran que esto implica que dicho evento es parte de un patrón de eventos del universo. El unificacionismo conlleva identificar cuáles son los mecanismos que unifican de modo máximo nuestro entendimiento de los fenómenos diversos, es decir, cuáles son los criterios de simplicidad y alcance. Filósofos de la ciencia actuales como Strevens explicitan una de las principales ventajas de esta interpretación: la posibilidad de dar cuenta de las explicaciones que se dan en términos del logro del equilibrio de un sistema en el que los procesos causales son irrelevantes o las teorías en las que parte de los procesos se idealizan (por ejemplo en la clásica los procesos cuánticos)<sup>290</sup>. El poder unificador crecería, por tanto, en función de la generalidad, la simplicidad y la cohesión, de manera que permitiría distinguir entre patrones reales y fenómenos unidos sin patrón o patrones de todos los posibles fenómenos.

---

<sup>290</sup> Michael Strevens, "The Causal and Unification Approaches to Explanation Unified-Casually" *Noûs* 38, no. 1 (2004): p. 157.

La teoría más elaborada de esta interpretación es la del filósofo Philip Kitcher quien postula que nuestras afirmaciones acerca de las causas están basadas en último término en patrones de unificación. Su artículo programático "*Explanatory Unification*"<sup>291</sup> presenta los dos propósitos que debe tener una explicación científica: que la ciencia no solo acumula conocimientos sino que incrementa nuestra comprensión del mundo y que una teoría de las explicaciones científicas debe poder arbitrar entre teorías pasadas y presentes<sup>292</sup>. Para Kitcher, la propuesta de la *Received View*<sup>293</sup>, según la cual se derivan descripciones de los fenómenos a partir de un conjunto de premisas que incorporan unas leyes, no es acorde con lo que él considera como "comprensión". Para él, la intuición detrás de lo que es la "comprensión" de un fenómeno sería más acorde con una propuesta que diera cuenta de las explicaciones en términos de unificaciones. A partir del análisis de la aceptación del newtonianismo y el darwinismo, Kitcher concluye lo esencial que es la búsqueda de un patrón de argumentación "*if one accepts an argument as explanatory, one is thereby committed to accepting as explanatory other arguments which instantiate the same pattern*"<sup>294</sup>. La similaridad entre argumentos con el mismo patrón, cuestión que ilustra mediante newtonianismo,

---

<sup>291</sup> El mismo autor clasifica su propuesta como "programática" en la p. 508. Philip Kitcher, "Explanatory Unification" *Philosophy of Science* 48 (1981).

<sup>292</sup> Este debate se conoce como el '*theory change*'.

<sup>293</sup> Kitcher denomina esta propuesta el '*covering law model*'.

<sup>294</sup> Kitcher, "Explanatory Unification": p. 516.

hace referencia, en este caso a similaridad en la estructura lógica y/o similaridad en los términos de vocabulario no lógico. Por tanto, se considera que hay un conjunto de argumentos que es el que mejor unifica y sistematiza un conjunto de afirmaciones ya aceptadas.

Sin entrar en detalle en cómo se logra ese conjunto de argumentos<sup>295</sup> conviene subrayar que Kitcher busca el poder unificador (“*unifying power*”) de las explicaciones a partir de un conjunto de patrones de argumentación. Además ese poder, como puede extraerse del ejemplo del newtonianismo o el darwinismo, se logra al generar un número grande de afirmaciones aceptadas como conclusiones de argumentos aceptables, y que son las que instancian unos pocos y estrictos patrones. La ejemplificación que realizar de Kitcher desde el newtonianismo es la siguiente:

*“The pattern of argument which derives a specification of the positions of bodies as explicit functions of time from a specification of the forces acting on those nodes is, indeed, central to Newtonian explanations. But not every argument used in Newtonian explanations instantiates this pattern. Some Newtonian derivations consist of an argument instantiating the pattern followed by further derivations from the conclusion”<sup>296</sup>.*

Por tanto, en el unificacionismo, usando unos pocos patrones de argumentación en la derivación de muchas creencias, minimizamos el número de tipos de premisas que tenemos que

---

<sup>295</sup> Kitcher detalla el proceso en Ibid.: pp. 519-22.

<sup>296</sup> Ibid.: pp. 520-21.

tomar como no-derivadas de los fenómenos. Es decir, se reduce el número de hechos que se deben tomar como brutos, a saber,

*"science advances our understanding of nature by showing us to derive descriptions of many phenomena, using the same patterns of derivation again and again, and, in demonstrating this, it teaches us how to reduce the number of types of facts we have to accept as ultimate (or brute)"<sup>297</sup>.*

Kitcher presenta su aproximación en confrontación con la propuesta de los mecanismos causales de Salmon y que considera que no se puede dar cuenta de mecanismos básicos a no ser que sea identificando qué mecanismo básicos unifican maximizadamente nuestra comprensión de los diversos fenómenos. Esta interpretación desde la unificación implica una aproximación pragmatista a las explicaciones, porque trata de caracterizar los actos explicativos como el problema fundamental<sup>298</sup>. Kitcher considera que, en este sentido, las aportaciones de Bas van Fraassen, principal representante del pragmatismo, son muy relevantes aunque no sean suficientes para poder dar cuenta de las explicaciones científicas. Por tanto, conviene ahora introducir la interpretación pragmatista del filósofo van Fraassen.

---

<sup>297</sup> Philip Kitcher, "Explanatory Unification and the Causal Structure of the World" in *Scientific Explanation*, ed. Philip Kitcher and Wesley C. Salmon, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989), p. 432.

<sup>298</sup> *Ibid.*, p. 412.

---

Van Fraassen sostiene que las teorías de la explicación han considerado que el poder explicativo de una teoría es una virtud. Esto se deriva de haber mantenido que una explicación es una relación entre una hipótesis o teoría y los hechos, y que el poder explicativo de una teoría no se puede separar de un modo lógico de otras virtudes posibles de la teoría. Van Fraassen, concretamente, propone la de la aceptabilidad:

*"My answer did separate acceptance of the theory from its explanatory power. Of course, the second can be a reason for the first; but that requires their separation"*<sup>299</sup>.

Para van Fraassen, una explicación es la respuesta que se da a una *"why-questions"* y esto tiene lugar mediante una triada: el tema de la cuestión que incluye el *background* de conocimiento que se tiene; las propuestas alternativas a dicha cuestión; y la relación de relevancia explicativa que es la que determina cuál de las alternativas que compiten como respuesta es la explicación a la *'why-question'*<sup>300</sup>. En este contexto se considera que una proposición es relevante para el significado de esta triada cuando esta proposición es portadora de un relación de relevancia explicativa entre el tema del que se está tratando –en un contexto dado– y una de las propuestas alternativas que compiten entre sí. El énfasis

---

<sup>299</sup> Bas van Fraassen, "The Pragmatics of Explanation" *American Philosophical Quarterly* 14, no. 2 (1977): p. 143.

<sup>300</sup> Sobre la teoría de van Fraassen de las *'Why-questions'* véase Bas van Fraassen, *The Scientific Image*, ed. L. Jonathan Cohen, *Clarendon Library of Logic and Philosophy* (New York: Oxford University Press, 1980), pp. 141-46.

van Fraassen lo pone en señalar que las explicaciones no pueden ser deductivas puesto que son relativas al contexto en que se dan. Por tanto, su crítica al modelo ND proviene de afirmar que este no tiene en cuenta este contexto y es lo que le hace 'caer' en la paradoja de la transitividad.

Una vez establecida la propuesta de explicación científica de van Fraassen, se puede volver a la teoría crítica de Kitcher a esta propuesta pragmática. La crítica sostiene que la teoría de van Fraassen no pone suficientes restricciones a las relaciones que pueden ser relaciones relevantes, puesto que no evita la presencia de relaciones que puedan ser no relevantes en ningún contexto. Si bien van Fraassen señala que sí que podría decirse que hay algún tipo de restricciones, como el que se consideran relaciones de relevancia explicativa las que hacen a la teoría más aceptable o como las que hacen que la respuesta a una pregunta sea más probable que otra o incluso las que surgen de comparar unas con otras<sup>301</sup>, Kitcher considera necesario tener una teoría clara sobre qué es una relación de relevancia genuina y que dicha aclaración es relevante porque tal relación es una de las más propias de lo que es de una teoría de la explicación.

Por otra parte Kitcher también critica la solución de van Fraassen a la paradoja de la transitividad al considera que el incluir el contexto no solventa el problema de la asimetría explicación-

---

<sup>301</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 151.

predicción, precisamente porque la propuesta de van Fraassen no permite determinar cuál es la respuesta a la pregunta<sup>302</sup>. Pone el ejemplo, debatido en la literatura de este tema, de qué contestar a una pregunta acerca del porqué de la altura de un palo, indicando que se necesita para tener una cierta longitud de sombra. En este caso, la longitud de la sombra es causalmente dependiente de la altura del palo, pero la altura no lo es de la longitud de la sombra, por lo que, aunque la "*why-question*" quede contestada, la paradoja de la transitividad no sea solventada.

Kitcher también pone en entredicho las teorías causales. Considera que la teoría causal no refleja lo que ocurre con las respuestas a "*why-questions*" sobre proposiciones singulares que son explicadas de un modo no causal. Como ejemplo presenta la explicación del teorema de que una función con derivadas de todos los órdenes que obtienen valores de signos opuestos al final de un intervalo tienen un cero *en* el intervalo. Las explicaciones de que determinan una curva sin cortes no convencieron al matemático Bernard Bolzano (1781-1848) de que esa fuera la razón de que ocurra la presencia del valor 0, puesto que esa explicación sería extraña a lo que son los números. Adelantándose a una posible refutación desde la teoría causal, Kitcher sostiene que no se puede argumentar en este caso que la geometría es causalmente irrelevante para los números. Él afirma que el concepto de lo que

---

<sup>302</sup> Cfr. Kitcher, "Explanatory Unification and Causal Structure", pp. 414-15.



es una dependencia correcta de las explicaciones va más allá. Para Kitcher las explicaciones causales donde la explicación de una proposición singular que se deriva de encontrar un mecanismo fundamental serían explicaciones *bottom up*. Él las define como

*“the ability to discern causal relations in specific episodes, and see theoretical explanation as stitching together results about the causation of individual states and events”<sup>303</sup>.*

En este contexto las explicaciones se entienden como ‘unificaciones’. En palabras de Kitcher:

*“The heart of the view that I shall develop (...) is that successful explanations earn that title because they belong to a set of explanations, the explanatory store. Intuitively, the explanatory store associated with science at a particular time contains those derivations which collectively provide the best systematization of our beliefs. Science supplies us with explanations whose worth cannot be appreciated by considering them one-by-one but only by seeing how they form part of a systematic picture of the order of nature”<sup>304</sup>.*

Para finalizar esta sección conviene subrayar dos aspectos: que como fondo de estas dos propuestas está el hecho de que la distinción entre descripción y explicación no solo afecta al valor intelectual de la teoría sino que también lo hace al valor práctico; y que el debate sobre las teorías de las explicaciones científicas tiene como fin la búsqueda de una teoría de las explicaciones que dé cuenta de qué significa que las teorías científicas “explican”. Salmon lo resume del siguiente modo:

---

<sup>303</sup> Ibid., p. 430.

<sup>304</sup> Ibid.

---

*“Our understanding is increased (1) when we obtain knowledge of the hidden mechanisms, causal or other, that produce the phenomena we seek to explain, (2) when our knowledge of the world is so organized that we can comprehend what we know under a smaller number of assumptions than previously, and (3) when we supply missing bits of descriptive knowledge that answer why-questions and remove us from particular shorts of intellectual predicaments. Which of these is the function of scientific explanation? None uniquely qualifies, I should say: all three are admissible”<sup>305</sup>.*

### 3.3. LOS MODELOS EN EL DEBATE ACTUAL

El debate acerca del valor epistémico de los modelos en las explicaciones científicas sigue aún presente en la actualidad, si bien su enfoque ha variado con respecto al momento en el que Hesse o Nagel propusieron que el rol de los modelos en las explicaciones científicas era lógicamente esencial y no solo heurístico. A partir de la década de 1990 el interés de este debate comenzó a centrarse en el uso real de los modelos en la práctica científica. En concreto, en 2009 se publicó una monografía, *Scientific Models in Philosophy of Science*<sup>306</sup>, acerca de los modelos en la ciencia en la que se realiza un análisis historiográfico del uso de los modelos en la ciencia y de la evolución del debate sobre los modelos en las últimas décadas. La característica principal de esta obra es que, además de ser un diálogo directo con las monografías principales de Hesse acerca

---

<sup>305</sup> Kitcher and Salmon, eds., *Scientific Explanation*, p. 135.

<sup>306</sup> Cfr. Daniela M. Bailer-Jones, *Scientific Models in the Philosophy of Science* (Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2009). Esta monografía fue publicada póstumamente.

del valor epistémico de los modelos, incorpora el resultado de entrevistas a científicos sobre el uso de los modelos en su práctica científica, lo cual es destacable ya que, como se ha señalado en la introducción, el estudio desde la filosofía de la ciencia de la *praxis* científica supuso un giro en los estudios sobre la ciencia.

Antes de presentar alguno de los debates más actuales sobre los modelos que recogen la influencia de este giro, conviene señalar algunas de las problemáticas acerca de la teoría de la explicación mediante modelos que se dilucidan en el caldo de cultivo que han generado todas las teorías alternativas que se han presentado en epígrafe anterior. Un ejemplo de las relaciones que se pueden establecer entre dichas teorías a partir del debate sobre los modelos se encuentra en el artículo "*The Metaphorical Conception of Scientific Explanation: Rereading Mary Hesse*"<sup>307</sup> de la historiadora de la ciencia Maria Rentetzi. En dicho artículo se hace uso de la propuesta de modelos de Hesse para solventar las críticas ya mencionada de Salmon y Kitcher a van Fraassen acerca de la falta de delimitaciones en lo que van Fraassen considera como relaciones de relevancia explicativa. Para ello, Rentetzi recupera la relación de metáfora que Hesse introdujo en su teoría de modelos al hilo de las propuestas del filósofo y matemático Max Black<sup>308</sup>, la

---

<sup>307</sup> Rentetzi, "The Metaphorical Conception of Scientific Explanation: Rereading Mary Hesse".

<sup>308</sup> Max Black, "Metaphor" in *Proceedings of the Aristotelian Society, New Series* (Blackwell Publishing, 1954). En concreto en las páginas 289-290 Black

---

cual se expone en la conferencia mencionada en el epígrafe anterior, a saber, “*The Explanatory Function of Metaphor*”<sup>309</sup>.

Según Rentetzi, Hesse sostendría que desde la estricta deducibilidad del modelo ND no se puede dar cuenta de si una teoría es mejor que otra —en el contexto de que se ha de considerar mejor la que mayor poder explicativo tuviera. Por este motivo, Hesse sugeriría que se han de interpretar las explicaciones teóricas como re-descripciones metafóricas de aquello que se quiere explicar. Esto es posible si se consideran las metáforas como casos de analogía en las que habría un sistema primario, correspondiente al *explanandum* y que estaría enunciado en lenguaje observacional; y un sistema secundario del cual se tomaría el modelo y que estaría enunciado o bien en un lenguaje no observacional o en un lenguaje de una teoría familiar. Ambos sistemas llevarían consigo un conjunto de creencias y/o una red de relaciones de leyes naturales. Siguiendo esta propuesta, en su artículo, Rentetzi artículo establece varias equivalencias entre las teorías de Hesse y van Fraassen: los sistemas primarios de Hesse

---

introduce la idea de que en una metáfora hay dos sujetos distintos, uno primario y uno secundario, y son considerados como sistemas de lugares comunes. Hesse incorpora esta terminología pero difiere con respecto a Black, quien afirma que es la metáfora la que introduce una similaridad: la similaridad no sería previa. En cambio Hesse considera que es necesaria cierta similaridad *a priori*.

<sup>309</sup> Cfr. Hesse, *Models and Analogies in Science*, pp. 145-77. Esta conferencia no formaba parte de la primera edición de esta obra publicada en 1963 por Sheed&Ward, London.

serían lo que van Fraassen considera que es el tema a explicar; el conjunto de creencias sería el “*background knowledge*” de van Fraassen; y el contexto en el que se dan los eventos que han de ser explicados, los lugares comunes se consideran asumidos por toda la comunidad científica. El conjunto de respuestas posibles a la “*why-question*” de van Fraassen son consideradas por Rentetzi como un conjunto de sistemas secundarios (a lo Hesse) posibles. Y es precisamente la relación existente entre el sistema primario y el sistema secundario de una metáfora, tal y como Hesse sostiene, lo que va a permitir establecer cuál puede ser la relación de relevancia (a lo van Fraassen) en un contexto concreto. Esa relación es definida por Rentetzi a partir de los componentes que Hesse sostiene que los modelos ostentan, a saber, los ya mencionados, “analogía positiva”, “analogía negativa” y “analogía neutra”. Rentetzi postula, de este modo, que entre el sistema primario y el secundario de una metáfora hay una relación de analogía (L)<sup>310</sup>, y que de entre los posibles sistemas secundarios candidatos, se puede asumir que un sistema secundario es el más apropiado porque es el que presenta más analogía positiva y menos negativa. De este modo, no todas las relaciones de relevancia explicativa estarían permitidas, en concreto, no lo estarían las que no implican la relación L. Así, sería posible determinar qué respuesta es “mejor” para una “*why-question*” en un contexto dado, haciéndolo

---

<sup>310</sup> Rentetzi, "The Metaphorical Conception of Scientific Explanation: Rereading Mary Hesse": p. 384.

en función de cuánta analogía positiva en comparación con la negativa conllevara la respuesta propuesta desde el sistema secundario.

### 3.3.1. Los modelos y la teoría semántica

La importancia de los modelos se reivindicó a partir del establecimiento de la concepción semántica de las teorías científicas<sup>311</sup>, la cual se relaciona con un modelo explicativo “pictórico”. Fue precisamente van Fraassen, en su pionera monografía *The Scientific Image*, quien “rescató” dicho debate al afirmar la necesidad de una propuesta no realista como alternativa a la *Received View*. Él se puso a favor de una concepción semántica, la cual, tal como afirmó tiene como elementos propios las nociones de “verdad” y “modelos”<sup>312</sup>.

Para van Fraassen una estructura que satisface los axiomas de una teoría se considera un “modelo” de dicha teoría. Los modelos, tal como se usan en la ciencia, corresponderían a lo que van Fraassen denomina modelos-tipo o “clase de estructuras”. La

---

<sup>311</sup> Como sea indicado en el epígrafe anterior es una de las que Suppe considera como alternativas a la ‘*Received View*’. Acerca de la ‘*Semantic View*’ como alternativa a la ‘*Syntactic View*’ (‘*Received View*’), en concreto, cómo Suppe introdujo esta diferencia Cfr. Hans Halvorson, "Scientific Theories [Preprint]" (Princeton University, 2015). Recuperado de <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/11347>

<sup>312</sup> van Fraassen, *The Scientific Image*, p. 43.

propuesta de van Fraassen con respecto a los modelos se recoge en el siguiente párrafo:

*“To present a theory is to specify family of structures, its models, and secondly, to specify certain parts of those models (the empirical substructures) as candidates for direct representation of observable phenomena. The structures which can be described in experimental and measurement reports we can call **appearances**: the theory is empirically adequate if it has some model such that all appearances are isomorphic to empirical substructures of that model”<sup>313</sup>.*

La aproximación empiricista y pragmatista de van Fraassen a los modelos tiene, por tanto, como marco la concepción semántica de las teorías: presenta las teorías como un conjunto de modelos y los formaliza mediante métodos semánticos. A partir de esta asunción, la actividad científica sería, entonces, un proceso de construcción de los modelos apropiados para explicar fenómenos<sup>314</sup> que han sido convenientemente idealizados mediante procedimientos de la vida de laboratorio. Las teorías como conjuntos de modelos serían entidades extralingüísticas que permitirían a los científicos representar, explicar e intervenir en el mundo. Las teorías científicas tendrían así el alcance deseado y toda teoría trataría de presentar una descripción general de esos fenómenos de manera que pudieran ser utilizados para satisfacer las demandas de explicación, predicción y descripción detallada propias de las explicaciones.

---

<sup>313</sup> Ibid., p. 64.

<sup>314</sup> van Fraassen denomina ‘*appearances*’ a los fenómenos que los científicos determinan como relevantes para una teoría.

Su nueva propuesta sostiene que acerca de una teoría se pueden tener dos actitudes epistémicas: por un lado, afirmar que es verdad – tener un modelo que es una réplica fidedigna, en detalle, de nuestro mundo– y hacer un llamamiento a que se “crea” (*call for belief*) o, por otro, simplemente afirmar su adecuación empírica y pedir aceptación. En este sentido, en el Apéndice de *The Scientific Image* sostiene que

*“the basic concepts of theory and models – as opposed to the historical and intellectual dealing with formulations of theories, or on the contrary, construction of models – do not seem to me very different in the two approaches understanding science”<sup>315</sup>,*

entendiendo por “*the two approaches*” las dos posibles posturas epistémicas indicadas anteriormente. Van Fraassen, por su empiricismo, comparte esta última actitud afirmando que lo que se pretende de una teoría es ser empíricamente adecuada, y, por su pragmatismo sostiene que esta adecuación se realiza a través de un proceso de elección deliberada por parte de los científicos y que tiene como comienzo el procesamiento de muchos datos provenientes de medidas.

Una vez el debate sobre los modelos volvió a la “palestra de la filosofía de la ciencia”, la siguiente cuestión que se planteaba era ¿son todos los modelos candidatos a explicaciones científicas? Y si no lo son ¿cuáles lo son y por qué? Los dos principales tipos de modelo son los modelos “pictóricos” recientemente señalados y los

---

<sup>315</sup> Bas van Fraassen, *Scientific Representation. Paradox of Perspective* (New York: Oxford University Press, 2008), p. 311.



modelos lógico-matemáticos<sup>316</sup>. Estos dos tipos de modelos son diferentes en cuanto a nivel de idealización, abstracción y sistematización, lo cual ha permitido que el debate acerca de los modelos pudiera desarrollarse con independencia del debate acerca de la concepción semántica y se centrara en la adecuación que genera cada una de los rasgos característicos de cada tipo de modelo. La necesidad de explicar los rasgos que cualificaban a unos modelos como buenos candidatos frente a otros derivó en el debate de en qué consistía la relación de los modelos con el mundo que representan para, finalmente, acabar centrándose precisamente en qué consistía la relación de “representación”.

### 3.3.2. Formas de representación

La relación entre los modelos y la representación se constituye desde la presunción de que los modelos deben reflejar aspectos reales y significativos de los fenómenos estudiados, aunque sea solo en términos de su estructura. Los análisis tradicionales de la representación se centraron en las similitudes entre los aspectos de los modelos y del mundo, siendo la precisión uno de los

---

<sup>316</sup> Haciendo uso de la denominación de Hesse estaríamos hablando de la diferencia entre los modelos que Duhem acuñó como ‘mecánicos familiares’ o ‘abstractos y sistematizadores’. Cfr. Hesse, *Models and Analogies in Science*, p. 2. En la terminología del filósofo Friedel Weinert, se trataría de la diferencia entre entre modelos ‘topológicos’ y modelos ‘algebraicos’. Cfr. Friedel Weinert, "Theories, Models and Constraints" *Studies in History and Philosophy of Science* 30, no. 2 (1999): p. 326.

principales valores asociados a la relación entre ambos<sup>317</sup>. En la última década, en cambio, el problema de la representación se presenta desde otro enfoque.

En su monografía de 2008 *Scientific Interpretation: Paradox of Perspective*<sup>318</sup> van Fraassen estableció, una vez más, los términos del nuevo debate al presentar su propuesta de un estructuralismo empírico en el que se ponía de manifiesto la problemática de la relación de representación: independientemente del nivel de idealización, construcción o interpretación inherentes a la práctica científica, ¿cómo conectan con el mundo las teorías científicas? En el contexto de este análisis de cuáles son las condiciones de posibilidad para que una entidad abstracta (estructura, fórmula matemática) “represente” fenómenos observables, van Fraassen propone como solución<sup>319</sup> que la representación solo puede

---

<sup>317</sup> Como se ha indicado con anterioridad, los otros dos son “idealización” y “sistematización”.

<sup>318</sup> van Fraassen, *Scientific Representation. Paradox of Perspective*.

<sup>319</sup> *Ibid.*, pp. 237-61. En el Capítulo 11, “*An Empiricist Structuralism*” van Fraassen acomete las críticas que la paradójica unión de dos términos como ‘estructura’ y ‘empirismo’, podrían recibir. El debate acerca de qué representan los modelos proviene de las críticas desde el realismo a la propuesta del empiricismo estructural. La respuesta de van Fraassen a las críticas se realiza desde una nueva definición de cómo los modelos representan, definición que incorpora la dimensión pragmática del científico que de un modo intencional analiza una serie de datos procedentes de investigaciones y observaciones para crear un modelo de datos (*data model*), que se postula como el modelo isomórfico con el modelo teórico.

entenderse como un isomorfismo<sup>320</sup> entre dos estructuras matemáticas. Este isomorfismo sería el resultado de una actividad intencional de los científicos sujeta al asesoramiento de la comunidad y la aplicación de unos criterios asumidos, es decir, la actividad de representar sería relativa al contexto de uso y producción: “[t]here is no representation except in the sense that some things are used, made or taken to represent some things as thus or so”<sup>321</sup>.

Otra propuesta pragmática al problema de la representación proviene del realismo minimalista del filósofo de la ciencia Ronald D. Giere quien sostiene que “[i]t is not the model that is doing the representing, it is the scientist using the model who is doing the representing”<sup>322</sup>. Giere denomina a los tipos de modelos que se generan de este modo “representational models”. Dichos modelos

*“are designed for use in presenting aspects of the world. The abstract objects defined by scientific principles are, on my view, not intended directly to represent the world”*<sup>323</sup>.

El énfasis lo pone Giere, como van Fraassen, en la actividad pragmática de representar, ya que la representación no sería una relación diádica como en las concepciones tradicionales de la representación. Pero, por otra parte, desde esta concepción de los modelos, Giere sostiene, como Hesse y a diferencia de van

---

<sup>320</sup> Un isomorfismo es una abstracción entre dos estructuras que preserva el *mapping* entre ambas de manera bi-direccional.

<sup>321</sup> van Fraassen, *Scientific Representation. Paradox of Perspective*, p. 23.

<sup>322</sup> Ronald N. Giere, *Scientific Perspectivism* (Chicago: University of Chicago Press, 2006), p. 64.

<sup>323</sup> *Ibid.*, p. 63.

Fraassen, que los modelos son elementos primordiales en la construcción de teorías:

*"A focus on the activity of representing fits more comfortably with a model-based understanding of scientific theories (...) scientist generate models using principles and specific conditions. The attempt to apply models to the world generates hypotheses about the fit of specific models to particular things in the world, hypotheses that may be generalized across previously designated classes of objects (...) What is special about models is that they are designed so that elements of the model can be identified with features of the real world. This is what makes it possible to use models to represent aspects of the world (...) On this view, it is models that are the primary (though by no means the only) representational tools in the sciences"*<sup>324</sup>.

Por consiguiente, se puede afirmar que Giere considera que los modelos en las ciencias avanzadas (física y biología) han de ser objetos abstractos contruidos conforme, por una parte, a los principios generales que se consideran apropiados por dicha ciencia y, por otra parte, a condiciones específicas de cada una de las teorías. Además, Giere sostiene que los científicos logran "representar" con los modelos los aspectos de la realidad "explotando" las similitudes entre el modelo y el aspecto de la realidad que se quiere representar. De este modo, aunque todo es similar a todo en algún sentido, como Giere pone en boca del filósofo de la ciencia Mauricio Suárez, no todo representa a todo, y son los científicos los que seleccionan las características específicas del modelo que se considera similares a los rasgos del mundo real.

---

<sup>324</sup> Ronald N. Giere, "How Models Are Used to Represent Reality" *Philosophy of Science* 71, no. 5 (2004): pp. 743-44 y 47.

Las leyes, en este sentido, serían una caracterización de un modelo abstracto y se podrían considerar verdaderas solo en relación a un modelo.

### 3.3.3. Representacionismo deflacionario

Tarja Knuuttila, filósofa de la ciencia finesa, amplía el debate de la representación más allá de lo que el pragmatismo lo había ampliado a partir del debate tradicional de cómo relacionar las familias de modelos con el mundo. En primer lugar porque subraya que hay más tipos de representaciones en la ciencia que los modelos, como la representación visual o las representaciones numéricas. En segundo lugar porque considera que la noción de verdad o la noción de precisión no son apropiadas para hablar de modelos. Además, según Knuuttila, la adecuación entre un modelo y el mundo admite grados. Por este motivo, la propuesta de Knuuttila es tratar el problema de la representación no desde una propuesta fuerte (*strong account*) sino desde una deflacionaria (*deflationary account*)<sup>325</sup>.

---

<sup>325</sup> La propuesta fuerte considera que hay “algo” que el modelo y en el sistema que su *target* comparten y que ese “algo” es la base de la relación representacional. Las propuestas fuertes analizan la relación en función de algún tipo de morfismo. El caso más general de morfismo es el isomorfismo y para una postura fuerte el poder representacional deriva precisamente de ese “ser isomórfico”. Knuuttika considera que van Fraassen mantiene una postura fuerte en la que el *mapping* no es con el mundo real sino con las apariencias, aunque mencione que en 2008 van Fraassen realiza una aproximación más pragmática. La postura de van Fraassen sería a la vez

Knuutila sostiene que los problemas del representacionismo basado en modelos proviene de su estrecho alcance dado que

*"[t]he characteristic unit of analysis of the representational approach, the relationship of a single model and its supposed real target system, is too limiting in that it pays no attention to the models themselves as unfolding, constructed entities, or to the model-based theoretical practice that typically proceed on the bases of many related, and also complementary models"*<sup>326</sup>.

Por este motivo, la posición deflacionaria de Knuutila propone considerar los modelos como *'epistemic tools'*, es decir, desde un punto de vista preeminentemente productivo. De este modo afirma que

*"[a]s epistemic tools models are constructed in the light of certain scientific questions and they make insightful use of available representational means and their characteristics affordances"*<sup>327</sup>.

Otras soluciones deflacionarias provienen de rebajar la postura fuerte desde la postulación de la necesidad de una relación de isomorfismo a relaciones rebajadas a homomorfismos o simples

---

fuerte y reductiva: fuerte porque da simultáneamente un análisis de en qué consiste una representación científica y en qué descansa su éxito; reductiva porque reduce la relación de representación a las características del modelo y su *target*. Para Knuutila un *"isomorphism does not have the right formal properties to capture the nature of the representational relationship: it is a symmetric, transitive and reflexive relationship whereas representation is not"*: Tarja Knuutila, "Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-Based Representation" *Studies in History and Philosophy of Science* 42 (2011): p. 265.

<sup>326</sup> Ibid.: p. 263.

<sup>327</sup> Ibid.

morfismos<sup>328</sup>. No obstante, para Knuuttila, estos “movimientos” no son suficientes. Si bien comparte con este tipo de propuestas deflacionarias su pragmatismo –se centran en los logros de los usuarios, por lo que su concepción de la representación no sería solo dual– y el hecho de que introducen una direccionalidad en la formación de una representación a partir de los objetivos de los usuarios, considera que de este modo la representación “*is deprived of much of its explanatory content*”<sup>329</sup>. Lo que Kuuttila propone es que los modelos como herramientas epistémicas se construyan mediante varios medios representacionales y estén constreñidos por su diseño de manera que permiten el estudio de ciertas cuestiones científicas al construirlos y manipularlos. “*Constrained design*” es una de sus características principales que ella presenta como requerimiento de las representaciones en la ciencia, y explica que incluso pueden ser objeto de estudio en sí mismas en algunas áreas como la Inteligencia Artificial. Otras características dignas de mención son: “*representational non-transparency*”, el hecho de que no todo los medios representacionales permiten el mismo tipo de inferencias; “*result-orientedness*”, que es el hecho de que en la práctica científica se intentan generar sistemas hipotéticos que anticipan resultados acerca de las características que los fenómenos

---

<sup>328</sup> Esta última es, por ejemplo, la aproximación del estructuralismo realista del filósofo James Ladyman, la cual se expone en el siguiente epígrafe.

<sup>329</sup> Knuuttila, "Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-Based Representation": p. 266.

se supone que exhiben; “*concrete manipulability*”, el hecho de que el valor cognitivo de los modelos está en gran parte basado en la manipulación<sup>330</sup>; y “*distributed justification*” característica que da cuenta de que en la práctica científica el ajuste entre modelo y datos es bi-direccional. En definitiva, la propuesta de Knuuttila se encamina hacia una explicación de la representación que permita “*misrepresentations*” (representaciones erróneas), porque estas son necesarias en la práctica científica. Y un paso más en el abandono de la consideración estándar de la relación de representación es el hecho de considerar que no solo no es necesaria la precisión en esta relación, sino tampoco la idealización<sup>331</sup>.

### 3.3.4. Implicaciones culturales

El filósofo e historiador de la ciencia malayo Mohd Hazim Shah introduce en su artículo “*Models, Scientific Realism, the Intelligibility of Nature and their Cultural Significance*” una nueva dimensión en el debate sobre los modelos, a saber, que la postura acerca de los modelos en el debate de la filosofía de la ciencia no se debe solo a cuestiones cognitivas, sino también a otros aspectos

---

<sup>330</sup> “*A theoretical model could be seen as a system of interdependencies, whose various features can be studied by manipulating it in the light of its results*”: Ibid.: p. 268.

<sup>331</sup> Esta paso ya se presenta como propuesta en Craig Callender and Jonathan Cohen, “There Is No Special Problem About Scientific Representation” *Theoria* 55 (2006): p. 79.



como los emotivos o los estéticos<sup>332</sup>. En dicho artículo estudia el significado cultural de las problemáticas en torno a los debates sobre modelos. Él pone como ejemplo el caso de los modelos copernicanos y keplerianos de los movimientos celestes, indicando que no solo eran diferentes por su contenido, sino que estaban en contraste también por los elementos culturales y religiosos con los que se asociaban, los cuales evocaban respuestas emotivas entre los defensores de unos y otros.

Con este análisis de los orígenes no solo cognitivos del debate sobre modelos, el autor quiere introducir en dicho debate lo que el físico e historiador de la ciencia Gerald Holton quiso introducir cuando afirmó que el contenido de la ciencia era algo más que contenido empírico o analítico, denominando a dicho tipo de contenido "*themata*"<sup>333</sup>: aquellos aspectos del contenido que en cierto modo se adhieren en las primeras fases de un trabajo científico y que guían el trabajo posterior del mismo. Dichos "*themata*" tienen un rol dominante en la aceptación o rechazo de algunas intuiciones científicas. Desde el pragmatismo dichos "*themata*" se ampliaron, pero desde una revisión de la influencia

---

<sup>332</sup> Mohd Hazim Shah, "Models, Scientific Realism, the Intelligibility of Nature, and Their Cultural Significance" *Studies in History and Philosophy of Science* 42 (2011): p. 258.

<sup>333</sup> Cfr. Gerald Holton, *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*, Revisited edition. First 1973 ed. (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1998), especialmente pp. 1-18.

cultural de las teorías de los fenómenos, Shah propone una ampliación aún mayor.

### **3.3.5 La propuesta de Nancy Nersessian**

La propuesta de los modelos de Hesse se fundamenta en que las teorías deben ser generalizables, testables y se han de poder extender, lo que, según ella, las posturas positivistas no permiten, dado que solo permiten que una teoría sea confirmable o falsable. No obstante, las teorías de las explicaciones científicas, de acuerdo con Hesse, sí que pertenecerían a las teorías semánticas. Esto se pone de manifiesto en sus conclusiones acerca del estatus de los modos de acción, a saber, los modelos que ella considera como esenciales para la ciencia se consideran confirmables o falsables mientras que los modos de acción –que ella había establecido como una “propiedad” que esos modelos “exhiben” – no lo son.

En los subepígrafes anteriores se han expuesto teorías de modelos (y también de las representaciones) que no tienen como base una teoría semántica de las explicaciones científicas y que podrían ser candidatas que solventen el problema de Hesse, a saber, que sus modelos (fundamentales) tengan unas características que una de las propiedades que exhiben, a saber, los modos de acción, no tienen. Uno de los candidatos es la teoría pragmática de Giere. Esta teoría tiene la ventaja de considerar los modelos como primitivos en las explicaciones científicas, pero no tiene uno de los rasgos fundamentales de los modelos que Hesse

considera que desempeñan ese rol primitivo en la ciencia, a saber, los modelos descriptivos (los cuales son los relevantes respecto a las teorías científicas y de los cuales los modelos fundamentales son una clase especial) "*are intended as factual descriptions*" como ya se ha subrayado. En cambio, para Giere los modelos "[are] *not intended directly to represent the world*" y, en este sentido, cualquier propiedad asociada a ellos tampoco representaría el mundo, por lo que los modos de acción en ellos tendrían el mismo rol instrumental que en los modelos matemáticos.

Las teorías deflacionistas por su parte, abandonan el que los modelos "idealicen" aquello que representan, lo que entra en manifiesta contradicción con la "analogía positiva" que según Hesse todos los modelos tienen. Esto resulta problemático en relación a los modos de acción precisamente porque estos están asociados a la "analogía positiva" que es la que determina el tipo de procesos de los que los modelos "*are intended as factual descriptions*".

Por su parte, la propuesta de Shah dota de un marco explicativo a la intuición de Hesse de que el contexto de surgimiento de los modelos fundamentales implica una serie de elecciones sobre el contenido de los mismos que "deja trazas" en la posterior evolución de las teorías que encarnan dichos modelos. Dichas "trazas" serían los "*themata*" que Shah destaca, a los que este último añade no solo un contexto histórico sino también cultural. El análisis de Shah, si bien refuerza el de Hesse no

introduce, en cambio, ningún elemento que permita la solución del problema de los modos de acción.

La investigación de la filósofa y física Nancy J. Nersessian se centra en comprender los procesos cognitivos y culturales que dan lugar a los cambios conceptuales y a la innovación en la ciencia. Sus primeras obras se dirigieron a determinar cómo era posible el cambio conceptual partiendo de una teoría del significado de los términos científicos que no fuera la considerada estándar en el momento, a saber, la propuesta positivista<sup>334</sup>. Esto le condujo a estudiar los procesos que tienen lugar en el cambio conceptual encontrando que el pensamiento basado en modelos era fundamental en estos procesos. Posteriormente desarrolló su teoría del “*model-based reasoning*”. En la actualidad sus investigaciones – dentro de un proyecto interdisciplinar con elementos de investigación etnográfica, análisis histórico-cognitivo y marcos conceptuales procedentes de las ciencias cognitivas – se dirigen a estudiar las prácticas de modelado físico y computacional en las ingenierías biomédicas y en los laboratorios de biología.

Al igual que Mary Hesse al analizar el estatus lógico de las teorías científicas de su tiempo presentó el positivismo, el

---

<sup>334</sup> “*The essential thesis of the standard account is that the observational situation provides whatever empirical meaning and verification empirical knowledge can have, for only in the observational situation do we have direct experience of physical reality: the given*”: Nancy J. Nersessian, *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1984), p. 6.

operacionalismo y el realismo *naïve* como las principales teorías de su época, y como opuesta a ellas propuso su teoría de modelos, 20 años después, Nancy Nersessian realizó un movimiento similar en relación a las teorías del significado de los términos científicos. En su obra *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*<sup>335</sup>, Nersessian señala que su interés es presentar una alternativa a las propuestas (a) del positivismo lógico (la '*standard account*') de Duhem y Willard van Orman Quine (1908-2000) y de Paul Feyerabend<sup>336</sup> (1924-1994), (b) la teoría de la incomensurabilidad entre los significados de un concepto en los diferentes paradigmas de Thomas Kuhn (1922-1996), y (c) la teoría causal de Saul Kripke y Putnam —que considera causal en el sentido que conecta el referente de un término teórico con un fenómeno observable y en el sentido de que muestra una relación causal histórica entre los referentes de un término<sup>337</sup>. Para Nersessian todas estas teorías cometen el mismo error:

*"They believe that an analysis of the necessities and nature of language alone is sufficient for the formulation of an adequate understanding on the nature of meaning in scientific theories"*<sup>338</sup>.

No se pretende aquí realizar un análisis del estado de la cuestión acerca de la teoría de los significados en la década de

---

<sup>335</sup> Ibid.

<sup>336</sup> Hesse denomina '*network view*' a la teoría de Feyerabend, teoría que incorpora, a la postura de la '*standard account*', el elemento pragmático en la construcción. Ibid., p. 13.

<sup>337</sup> Ibid., p. 25.

<sup>338</sup> Ibid., p. 4.

1980, sino de señalar la similitud entre el problema al que Hesse se enfrentó y al que lo hizo Nersessian, a saber, proponer una teoría acerca un aspecto de la filosofía de la ciencia desde una aproximación diferente a la de las teorías disponibles en el momento. Como se vio, en el caso de Hesse el nuevo enfoque permitía dar cuenta del carácter de inteligibilidad de las teorías científicas y de su propiedad de poder ser extendidas. En el caso de Nersessian el nuevo enfoque introduce la necesidad de estudiar las prácticas que dan lugar a la construcción de significados de términos<sup>339</sup> en la ciencia para entender dichos significados, además de estudiar la naturaleza y las necesidades del lenguaje. En palabras de Nersessian:

*“The nature of meaning in scientific theories must be seen in the context of **the network of beliefs** (theoretical, methodological, metaphysical, common sense) and **problems** (theoretical, experimental, metaphysical) which is part of the making of meaning in scientific practice –of the introduction and development of the concepts and the terminology of theories”<sup>340</sup>.*

Además del estudio de la práctica científica, Nersessian considera que también es necesario incorporar lo que ciencias como la lingüística y la psicología cognitiva<sup>341</sup> señalan acerca de la

<sup>339</sup> Nersessian habla generalmente de ‘conceptos’ excepto en aquellos escritos en los que trata acerca de la teoría estándar del significado en cuyo caso habla de ‘significado de términos’ usando así la terminología de dicha teoría estándar.

<sup>340</sup> Nersessian, *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 29. El subrayado es de Nersessian.

<sup>341</sup> “There is a rather extensive debate in literature of contemporary cognitive psychology over just what a concept is that can assist us here. The position taken here: (a) the

creación de conceptos. Para Nersessian, por ejemplo, la concepción desde la teoría estándar, a saber, *“that a concept is a set of necessary and sufficient conditions”*<sup>342</sup> no se corresponde con los datos que se tienen acerca del concepto de ‘campo’ que es al que dedica la monografía que se ha indicado anteriormente.

Las conclusiones de Nersessian acerca del concepto de ‘campo’ en su análisis histórico resultan de utilidad para este estudio, por lo que conviene detenerse brevemente en este análisis. Concretamente, el concepto que Nersessian analiza es el de *‘electromagnetic field’*. La evolución de este término, según Nersessian, es la siguiente. El físico Michael Faraday (1791-1867) introduce un concepto cualitativo sin estructura matemática de manera que *“in his most speculative conception, the field concept would become a broader concept comprising all the forces of nature”*<sup>343</sup>. El *‘electromagnetic field’* de Faraday consiste en las ‘líneas físicas de fuerza’ (que se pueden entender como una propiedad del éter o un estado del espacio) y es responsable de la transmisión continua de las fuerzas eléctricas y magnéticas en el espacio. Con Maxwell el *‘electromagnetic field’* es un estado de un éter mecánico que se

---

*‘classical’ view that a concept is a set of necessary and sufficient defining conditions; (b) the ‘prototype’ or ‘probabilistic’ view that a concept is a set of family resemblances, with instances of the concept varying in the degree to which they share certain properties; and (c) the ‘exemplar’ view that a concept is represented by its paradigmatic cases”*: Ibid., pp. 155-56.

<sup>342</sup> Ibid., p. 155.

<sup>343</sup> Ibid., p. 154.

diferencia con claridad de la materia ordinaria, es responsable de la transmisión de la luz (además de la de la electricidad y el magnetismo) y tiene ya una estructura matemática, a saber, el conjunto de fórmulas conocido como las ecuaciones de Maxwell. Para el físico Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) el '*electromagnetic field*' es un estado de un éter rígido no mecánico, es producido por la interacción de la materia "*ions*" y el éter, y su interacción está gobernada por las ecuaciones de Maxwell y las fuerzas de Lorentz, fuerzas que no son newtonianas. Finalmente, en la teoría especial de la relatividad de Einstein, el '*electromagnetic field*' es una estructura matemática del concepto de campo de Lorentz, pero no es un estado del éter, sino que es algo que está a la par ontológicamente con la materia.

Lo que plantea Nersessian es ¿cómo se justifica que todas estas concepciones sean el '*electromagnetic field*', concepciones que difieren, por ejemplo, en algo tan fundamental como las entidades que consideran y si las leyes que rigen sus procesos son o no newtonianas?, es decir, ¿por qué podemos decir que estas concepciones están relacionadas y que hay una línea que puedo trazar desde Faraday a Einstein? Nersessian establece dos tipos de respuesta a estas preguntas.

La primera (que ella considera la menos sofisticada) consiste en afirmar que hay un problema común en todas estas fases de explicación de qué es el '*electromagnetic field*', concretamente "*how to conceive of the continuous and progressive transmission of electric and*



*magnetic forces through space*"<sup>344</sup>. Esta respuesta es de interés para este estudio, puesto que establece una conexión directa entre lo que es considerado por Hesse como un modelo fundamental, a saber, la teoría de campos, y uno de los modos de acción que Hesse estudia, a saber, la acción continua. La diferencia es que, si bien para Hesse los modos de acción son *period dependent*, en el caso de Nersessian —al haber entrado en escena el que la elección de un modo de acción sea la solución a un problema—, los modos de acción serían *problem dependent*.

La segunda es en la que ella incorpora la "*prototype*" o "*probabilistic' view*" de las ciencias cognitivas según la cual un concepto "*is a set of family resemblances, with instances of the concept varying in the degree to which they share certain properties*" a la cual le añade "*the descriptive/explanatory function of concepts in scientific theories*"<sup>345</sup>. En el caso de Faraday, por ejemplo, el '*electromagnetic field*' es una descripción de la transmisión de las fuerzas eléctricas y magnéticas y una explicación de cómo es posible dicha acción en tanto que continua y progresiva.

Estas últimas afirmaciones acerca de la teoría de Nersessian son importantes. En primer lugar porque permiten establecer elementos comunes entre su teoría y la de Hesse. Por ejemplo, para Nersessian las funciones descriptivas y explicativas son necesarias a la hora de explicar un concepto científico como el de

---

<sup>344</sup> Ibid., pp. 154-55.

<sup>345</sup> Ibid., pp. 155-56.

---

*'electromagnetic field'*. Este concepto, a su vez, es un modelo fundamental de Hesse, y como modelo fundamental *"is intended as a factual description"*<sup>346</sup>, es decir, está intrínsecamente vinculado con la función descriptiva. Además, también como modelo descriptivo es explicativo porque es generalizable, extensible y testable. En cambio, Nersessian no considera tarea suya en qué consiste específicamente explicar sino que le interesa *"the relationship between this descriptive/explanatory function of concepts and the nature of meaning in science"*<sup>347</sup>. Esto se concreta en que, para Nersessian, lo que es necesario de un sistema explicativo es que dé respuestas a cuestiones del tipo ¿qué *"stuff"* hace esto?, ¿cómo lo hace?, ¿cuál es su función?, ¿qué efectos produce?, o ¿cómo puede ser localizado?

Precisamente la principal diferencia entre ambas radica en lo que consideran relevante como perteneciente a una explicación. Para Hesse, una teoría explica, entre otras cosas, porque es testable, que es el rasgo principal de las teorías semánticas de la explicación. En cambio, Nersessian vincula la explicación desde la *'prototype view'* de las ciencias cognitivas a propiedades de la práctica científica que permiten contestar a un tipo de preguntas, distanciándose así de la teoría semántica de las explicaciones científicas. ¿Qué ventajas tiene esta aproximación de Nersessian?

---

<sup>346</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 27.

<sup>347</sup> Nersessian, *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 156.

Para responder a esta pregunta conviene enunciar de modo sistemático la propuesta de Nersessian acerca del significado de un concepto científico. Esta propuesta la denomina *'meaning schema'*.

Un *"meaning schema"* es una matriz de dos dimensiones. A lo ancho contiene un resumen de los rasgos de cada instancia de la función descriptivo/explicativa que permiten dar respuesta a las preguntas anteriormente mencionadas, a saber, *'stuff'*, *'function'*, *'structure'*, y *'causal power'*<sup>348</sup>. Y, a lo largo, contiene una breve descripción de los cambios en el tiempo de los rasgos de cada instancia. Con esta matriz Nersessian afirma

*"[f]or each 'meaning schema', its earlier and later forms are both determined by and connected through the reasoning from the initial introduction and subsequent alterations of the concept. (...) this reasoning takes place within a changing network of beliefs and problems. (...) Analyses of the actual construction of scientific concepts reveal the 'chains-of-reasoning' in their construction"*<sup>349</sup>.

Es decir, a la pregunta anteriormente enunciada *'¿por qué podemos decir que estas concepciones están relacionadas y que hay una línea que puedo trazar desde Faraday a Einstein?'*

---

<sup>348</sup> Según Nersessian, antes de construir la matriz hay que decidir qué rasgos son considerados parte del significado. Ella toma como rasgos las diferentes funciones de los conceptos en la ciencia y lo hace partiendo de la clasificación de aristotélica de dichas funciones (*"stuff"*, la función, la estructura, el poder causal) puesto que, como se ha señalado, son las que proveen respuestas adecuadas. *"Stuff"* aquí hace referencia al estatus ontológico del concepto y a aquello a lo que refiere; la función es lo que hace; la estructura es la estructura matemática; y el poder causal son los efectos que causa. Cfr. *Ibid.*, p. 157.

<sup>349</sup> *Ibid.*

---

Nersessian contesta que es porque hay conexión en la cadena de razonamiento sobre el significado de un término<sup>350</sup>. Para Nersessian, por tanto, el significado no es independiente de cómo se construyó.

En sus escritos posteriores Nersessian va a señalar que las explicaciones por modelos son las que permiten, precisamente, dar cuenta de los cambios conceptuales en la ciencia (es decir, dar cuenta de por qué un “*meaning schema*” es el significado de un concepto). Es en este contexto en el que introduce el “*model-based reasoning*” como modo de razonar propiamente científico que no pertenece a la “*standard view*” la cual solo considera como adecuados los razonamientos inductivos y deductivos. Tal como Nersessian señala

*“From the perspective of a traditional philosophy of science, the modeling practices discussed here have not been considered significant forms of scientific reasoning –in some cases, not as ‘reasoning’ at all. Philosophical accounts of scientific reasoning have restricted the notion of reasoning primarily to deductive and inductive argument”*<sup>351</sup>.

---

<sup>350</sup> “The continuity of meaning for scientific terms is to be found in the reasons for the changes that were made.”: Ibid., p. 157.

<sup>351</sup> Ibid., p. 157, Nancy J. Nersessian, "Model-Based Reasoning in Conceptual Change" in *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, ed. Lorenzo Magnani, Nancy J. Nersessian, and Paul Thagard (New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999), p. 6. Ver también Nancy J. Nersessian, "Maxwell and 'the Method of Physical Analogy': Model-Based Reasoning, Generic Abstraction, and Conceptual Change" in *Reading Natural Philosophy. Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics*, ed. David B. Malament (Chicago: Open Court, 2002), p. 135.

Nersessian sí señala, en cambio que tanto para Campbell<sup>352</sup> como para Hesse (en su *Forces and Fields*) los modelos sí que se consideran como constitutivos de las teorías y como proveedores del significado de conceptos. No obstante, descarta la propuesta de Hesse por considerar que es parte de la “*standard view*” ya que, según Nersessian, para Hesse los modelos son “proposicionales” y se establecen como un “*mapping*” entre propiedades y términos<sup>353</sup>. Por este motivo, el esfuerzo de *Forces and Fields* por dotar de contexto histórico al surgimiento de los modelos queda bajo la crítica de Nersessian a la ‘*standard view*’, a saber,

*“positivists were right that history and psychology are essential components to understanding processes of conceptual change and they were right that there is no logic of discovery, but their notion of reasoning was too narrowly constrained and that led to the mistaken view that there are no issues of importance to philosophy in the context of discovery”*<sup>354</sup>.

Sin embargo, si bien es cierto que la propuesta de Hesse está instalada en la tradición semántica, Hesse no considera los modelos como un “*mapping*”, ya que eso es lo que critica precisamente de los modelos en el realismo *naïve*. De hecho, la propuesta de Hesse acerca de la relación de los modelos con el mundo es muy similar a la que Nersessian presenta, a saber, como las representaciones con las que los científicos realizan

---

<sup>352</sup> Cfr. Campbell, *Physics. The Elements*.

<sup>353</sup> Nersessian, "Model-Based Reasoning in Conceptual Change", p. 8.

<sup>354</sup> *Ibid.*, p. 9.

---

razonamientos y comprenden teorías<sup>355</sup>. En este sentido, los modelos como representaciones a los que hace referencia Nersessian se corresponderían con las diferentes teorías que caerían bajo un mismo modelo fundamental en la propuesta de Hesse. En cambio, sí que es correcto afirmar que el hecho de que los “*model-based reasoning*” de Nersessian no pertenezca a las teorías semánticas permite entender los modos de acción en relación a los modelos de un modo que no quedan relegados al ámbito de lo metafísico, como se verá.

El “*model-based reasoning*” de Nersessian requiere<sup>356</sup>:

1. que se construya o recupere un modelo,
2. que las inferencias que se realicen en las teorías sean mediante la manipulación del modelo y
3. que las inferencias puedan ser genéricas —que se apliquen a un modelo entendido como modelo-tipo—, o específicas —aplicadas a un modelo concreto.

Como se puede apreciar, la propuesta de Nersessian tiene en común con la de Hesse (a) el papel primordial de los modelos, (b) que de ellos dependan las inferencias que se realizan en las teorías —de hecho, Hesse decía de los modelos fundamentales funcionaban como “*rules of inference*” —, y (c) que a partir de ellos

---

<sup>355</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 15.

<sup>356</sup> Cfr. Nancy J. Nersessian, "Mental Modeling in Conceptual Change" in *International Handbook of Research on Conceptual Change*, ed. Stella Vosniadou (New York: Routledge, 2008), p. 392.

se puedan realizar generalizaciones (aunque para Hesse solo serían posibles las específicas, las que ella denomina “*low-level generalizations*”). Sin embargo, el hecho de que las inferencias se realicen mediante la manipulación de los modelos y mediante deducciones a partir de unos principios según unas reglas de inferencia, diferencia la propuesta de Nersessian como no perteneciente a la teoría semántica de la propuesta de Hesse la cual sí pertenecería a ella.

En *Maxwell and ‘The Method of Physical Analogy’: Model-based Reasoning, Generic Abstraction, and Conceptual Change*<sup>357</sup> Nersessian presenta su interpretación del rol que desempeñaron las “analogías físicas” en el desarrollo de la teoría de Maxwell. Las “analogías físicas” son una herramienta que fue usada por las grandes figuras de la ciencia británica del siglo XIX<sup>358</sup> para realizar avances en ramas nuevas de la ciencia a partir de las similitudes de esta rama con una rama ya conocida. Maxwell no solo hizo uso de ellas en prácticamente todas sus obras sino que también realizó contribuciones acerca de su función<sup>359</sup> y su uso. Por este motivo

---

<sup>357</sup> Nersessian, "Maxwell and 'the Method of Physical Analogy': Model-Based Reasoning, Generic Abstraction, and Conceptual Change".

<sup>358</sup> Cfr. Robert D. Purrington, *Physics in the Nineteenth Century* (New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1997), pp. 27-29.

<sup>359</sup> La reflexión de Maxwell acerca de las analogías que más impacto ha tenido es el Ensayo para el Club de los Apóstoles que preparó en Febrero de 1856 bajo el título “*Are There Real Analogies in Nature?*” P.M. Harman, ed., *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell. Vol. I (1846-1862)* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990), pp. 376-83.

Nersessian considera que la teoría de Maxwell es lugar privilegiado para el estudio de los procesos de razonamiento que llevaron a dicha teoría<sup>360</sup>. Las conclusiones a las que llega son de relevancia para este estudio, puesto que presenta un nuevo enfoque diferente al de Hesse sobre la relación entre modelos y modos de acción. Según Nersessian, su análisis muestra

*“how Maxwell was able to formulate the laws of the electromagnetic field by abstracting from specific mechanical models the dynamical properties and relations that continuum-mechanical systems, certain machines mechanisms, and electromagnetic systems have in common. In their mathematical treatment those common **dynamical properties and relations** were separated from the specific instantiations provided in the models **through which they had been rendered concrete**”<sup>361</sup>.*

Para Nersessian, por tanto, los modos de acción son más generales que los modelos, estos modos están asociados a un tratamiento matemático específico, y los diferentes modelos son instancias de los mismos.

¿Por qué se puede afirmar que en este texto se tratan los modos de acción? Como ya se indicó, el ‘*electromagnetic field*’, siguiendo a Nersessian, daba cuenta de la transmisión continua y progresiva de las fuerzas y, en el caso concreto de Maxwell, este recogía en sus analogías y en sus ecuaciones las relaciones y propiedades dinámicas de los procesos mecánicos de un éter. Esto se pone especialmente de manifiesto cuando Nersessian compara la teoría

---

<sup>360</sup> Nersessian, "Maxwell and 'the Method of Physical Analogy': Model-Based Reasoning, Generic Abstraction, and Conceptual Change", p. 145.

<sup>361</sup> Ibid., p. 159. El subrayado es mío.



de Maxwell con la de Newton señalando que *[t]he analogical model, understood generically, represents what is common among the members of specific classes of physical systems, viewed with respect to a problem context*". En el caso de la ley del inverso del cuadrado de la gravitación de Newton lo que se abstrae es lo que un proyectil y un planeta tienen en común en el contexto de un movimiento determinado. De este modo, el modelo 'ley del cuadrado-inverso' es un modelo genérico de las fuerzas de acción a distancia y fue utilizado por todos aquellos que quisieron explicar las "fuerzas" de acuerdo con la mecánica de Newton. En cambio, el modelo analógico de Maxwell extrae las propiedades dinámicas a partir de ruedas de engranaje y vórtices y las convierte en una forma general de la acción continua.

*"That is, the vortex-idle wheel system is understood to represent the class of such dynamical systems and the class includes electric and magnetic interactions on the assumptions of Maxwell's model"*<sup>362</sup>.

Por tanto, el modelo 'ley del cuadrado-inverso' (que es equivalente al modelo fundamental de fuerzas centrales de Hesse) instancia las acciones a distancia y las analogías de Maxwell instancian la acción continua. Todo ello desde una postura similar a la de Hesse en la que los modelos son fundamentales en la práctica científica, en la que los modelos son descriptivos, y en la que los modelos dan cuenta de cómo el significado de un término

---

<sup>362</sup> Nersessian, "Model-Based Reasoning in Conceptual Change", p. 16.

tiene trazas de cuando se originó – de lo cual Nersessian da cuenta mediante sus ‘*meaning schemas*’.

En su más reciente monografía, *Creating Scientific Concepts*<sup>363</sup>, Nersessian señala que hay dos modos de representar las fuerzas, a saber, como actuando a distancia o como transmitidas a través de un medio continuo físico<sup>364</sup>. El primer caso incluiría tanto las matemáticas que sirven para calcular dichas acciones a distancia como las teorías de los potenciales. El segundo incluiría, por ejemplo, las representaciones matemáticas de Maxwell o la teorías de fuerzas continuas de Faraday. En este sentido, Nersessian considera que hay acciones (las fuerzas) y que los modelos son representaciones de estas. Estas representaciones pueden ser de dos tipos, cada uno de los cuales se instancia en diferentes modelos, los cuales, a su vez, se corresponden con nuevos conceptos que se han creado en el contexto de la solución de un problema en el que las acciones estaban involucradas. Es decir, para Nersessian

- (a) Los modos de acción son considerados dentro de una teoría acerca de los modelos que da cuenta de todo aquello de lo que daba cuenta la teoría de Hesse (es decir, como pertenecientes a la ciencia).

---

<sup>363</sup> Nersessian, *Creating Scientific Concepts*.

<sup>364</sup> *Ibid.*, pp. 19.

(b) Estos modos son condiciones de posibilidad de los modelos y de las teorías científicas.

Por tanto, para Nersessian, hablar de teorías científicas es hablar de modelos que crean conceptos y, al menos en física, lo que se “modela” son los modos de acción.



## CAPÍTULO 4. TRES MODELOS O TRES TRADICIONES: LOS MODOS DE ACCIÓN EN EL SIGLO XIX

*En este capítulo se analizarán las teorías que surgen en el siglo XIX para dar cuenta de los fenómenos eléctricos y magnéticos, partiendo de la lectura que Hesse realiza de la ciencia de este siglo. Se ha escogido este siglo porque es un siglo privilegiado para comparar los modelos fundamentales, puesto que en él varios modelos – el modelo matemático francés, las teorías electrodinámicas y del potencial de Alemania, y la teoría británica de campos – se dan simultáneamente y haciendo referencia a un mismo fenómeno, y porque al realizar su análisis de este siglo la tipología de los modelos de Hesse se diluye, mostrando así, las limitaciones de su propuesta.*

El Capítulo VIII, ‘*The Field Theories*’, es el capítulo en el que Hesse presenta toda la física del siglo XIX. Este capítulo se inicia, como se ha señalado en el Capítulo 2 de este estudio, con la teoría hidrodinámica de Bernoulli y Euler que “prepara” la temática que será el hilo conductor de este capítulo sobre el siglo XIX. El gran logro de estos matemáticos había sido traducir las ecuaciones de los puntos de masa que sufren atracción (las ecuaciones de las fuerzas centrales) a ecuaciones para el continuo. Y ese logro había sido posible gracias a la idea de dividir los cuerpos continuos en elementos diferenciales que permitían la tractabilidad matemática de las ecuaciones de derivadas parciales. Hesse identifica este

logro con el surgimiento de la teoría de campos, tal y como se expresa en este texto.

*“It was in Euler’s hydrodynamics (...) that the notion of a field theory first took shape. A field in mathematical physics is generally taken to be a region of space in which each point (with possibly isolated exceptions) is characterized by some quantity or quantities which are functions of the space coordinates and of time, the nature of the quantities depending on the physical theory in which they occur”<sup>365</sup>.*

Pero Euler solo había llegado a describir la transmisión de la acción para medios continuos fluidos y no la de los medios continuos sólidos, que es, según Hesse en donde el siglo XIX científico “empezaría”.

El relato de Hesse es el siguiente. Era necesario dar cuenta de la transmisión de la acción en los medios sólidos continuos entre otras cuestiones porque la teoría de ondas vigente, la de Young, contemplaba la existencia de ondas transversales, y no solo longitudinales como las teorías predecesoras, y dichas ondas transversales solo podían propagarse en medios sólidos. Para ello, fue necesario desarrollar un modelo matemático de un sólido elástico, lo cual fue llevado a cabo por los físico-matemáticos Claude-Louis Henry Navier (1785-1836), Simeon-Denis Poisson (1781-1840) y Agustín Louis Cauchy (1789-1857), quienes postulaban que la materia se componían de moléculas entre las que actuaban fuerzas. Posteriormente George Gabriel Stokes (1819-1903) desarrolló las ecuaciones para medios sólidos continuos sin

---

<sup>365</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 43-60.

hipótesis sobre moléculas. Es decir, dotó de un modelo matemático a los medios sólidos continuos al igual que Euler había hecho para los medios fluidos continuos<sup>366</sup>.

A continuación Hesse describe los tres modos en los que en el siglo XIX la acción mecánica podía ser transmitida desde un punto hasta otro, modos que, según la autora, se exhiben en algún tipo de proceso mecánico procedente de observaciones de sentido común y a los que les corresponde un modelo matemático que describe sus características más generales. El primero de estos modos es la “acción por impacto” del que solo señala que en él la propiedad última de la materia es la elasticidad. El segundo es “la acción a distancia”, tal y como se entiende en la teoría de la gravitación, y que se transmite instantáneamente. El tercero es la “acción en un medio continuo”, que se describe en los términos de la teoría de campos que considera que la materia es continua y que la propagación de la acción es en un tiempo finito. Esta última es considerada por Hesse como la alternativa a entender la “acción por contacto” como un impacto<sup>367</sup>.

Hesse no explicita los modelos mecánicos en los que los modos de acción se exhiben, ni tampoco los modelos matemáticos que dan cuenta de los principales rasgos de dichos modelos mecánicos. No obstante, cada uno de estos modos se relaciona directamente con los tres modelos fundamentales de Hesse, por lo que se puede

---

<sup>366</sup> Cfr. *Ibid.*, pp. 194-95.

<sup>367</sup> Cfr. *Ibid.*, pp. 195-96.

decir con seguridad que “la acción por impacto” se exhibe en el modelo mecánico de la bolas de billar y se corresponde matemáticamente con las Leyes de Newton acerca del Movimiento (“corpuscularismo” como modelo fundamental); que “la acción a distancia” se exhibe en el modelo de fuerzas centrales de Newton y se corresponde matemáticamente con la ecuación de la gravitación de Newton y las ecuaciones sobre la electricidad de Charles-Agustín de Coulomb (1736-1806) quien, en sus *Mémoires sur l'électricité et la magnétisme*<sup>368</sup> publicadas entre 1785 y 1789 en *l'Academie Royale des Sciences* estableció una ley de la atracción eléctrica que seguía la ley del cuadrado de las distancias (“fuerzas centrales” como modelo fundamental); y que la “acción en un medio continuo” se correspondería con las matemáticas de un medio sólido continuo de Stokes (“teoría de campos” como modelo fundamental). De este último modo de acción no se puede conjeturar el modelo mecánico que lo exhibe, acerca de lo cual se tratará más adelante. Por otra parte, es importante destacar que del modo “acción por impacto” no se vuelve a hablar en el resto del capítulo a pesar de que señala que es un modo de acción que estaba disponible en dicho siglo. Los modos de acción sobre los que se debate en el capítulo sobre las teorías de campos son, por tanto, solo dos: la “acción a distancia” y “la acción por contacto” en

---

<sup>368</sup> Charles Agustín Coulomb, *Mémoires Sur L'électricité Et Le Magnétisme. Extraits Des Mémoires De L'académie Royale Des Sciences De Paris, Publiés Dans Les Années 1785 À 1789* (Paris: Chez Bachelier, 1789).



su variante de acción continua. ¿Siguen presentes dos modelos fundamentales en el debate del siglo XIX ya que están presentes en él dos modos de acción? Para poder responder a esta pregunta es necesario avanzar un poco más en la narrativa de Hesse acerca de dicho siglo.

El siguiente paso de la exposición de Hesse es introducir la noción de 'potencial'. De acuerdo con la autora, la atracción que una distribución de masa ejerce sobre un punto dado puede ser expresada como la fuerza que actuaría sobre una masa que estuviera en dicho lugar<sup>369</sup>, o mediante un potencial gravitacional  $V$  en un punto, siendo que  $V$  satisface las ecuaciones de Laplace en el espacio vacío y de Poisson en puntos de densidad de masa  $\rho$ , (ecuaciones de derivadas parciales que se tratarán más adelante). Del hecho de que la atracción que una masa ejerce pueda ser expresada de ambos modos lleva a Hesse a concluir que "*both the attractive force and the potential are field functions*"<sup>370</sup>. Esta conclusión solo es posible si se considera que el hecho de que la formulación matemática de un proceso esté dada en términos de ecuaciones de derivadas parciales se corresponda solo con la teoría de campos — que es precisamente lo que Hesse ha establecido como corolario de

---

<sup>369</sup> El enunciado de esta disyuntiva es incorrecto, dado que la primera expresión de la fuerza es la moderna definición de potencial gravitatorio. Sería más correcto enunciarlo con la fórmula newtoniana sobre la fuerza gravitatoria que sí que incluye la otra masa. De este modo sí que habría una diferencia entre ambas propuestas.

<sup>370</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 196.

las ecuaciones de Euler—, de este modo, cualquier otra formulación matemática que exprese lo mismo que una de ecuaciones de derivadas parciales se corresponderá también con la teoría de campos. Es más, Hesse concluye que, en el fondo, lo que esta equivalencia de expresiones matemáticas representa es que en la teoría de campos se están considerando dos tipos de campos, a saber, los campos físicos y los campos matemáticos. El campo en tanto que un medio material continuo sería un campo físico y el campo en tanto que gravitacional sería un campo matemático. La diferencia, según Hesse, es que el campo de los medios materiales continuos tiene más propiedades que las de ejercer una fuerza, lo que el campo gravitacional no tendría. Pone como ejemplo los fluidos, ya que el campo de un medio fluido continuo tiene propiedades observables de los fluidos<sup>371</sup>.

Por tanto, como se ha podido observar, el planteamiento de Hesse acerca de la ciencia en el siglo XIX no se centra en el debate sobre los modos de acción, sino en el debate acerca de si los modelos de campo son físicos o matemáticos. Es más, tampoco es un debate acerca de los modelos fundamentales, puesto que el modelo fundamental “corpuscularismo” no está presente en el debate y el modelo fundamental “fuerzas centrales” acaba de ser subsumido como un tipo de modelo dentro del modelo

---

<sup>371</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 197.

fundamental “teoría de campos”, a saber, un tipo de modelo matemático de dicho modelo fundamental.

¿Por qué partiendo de un debate sobre tipología de tres modos de acción –que ha estado presente en la mayoría parte de su obra– el debate ha derivado dos páginas después en un debate acerca del grado de abstracción de los modelos en el siglo XIX (los modelos físicos serían los menos abstractos y los modelos matemáticos los más abstractos)? No se puede afirmar con seguridad, pero, al ser la línea argumental que parece acomodar a todos los autores que menciona y la que le permite presentar como antecedentes de la ciencia moderna las ecuaciones de Maxwell, como vimos en el Capítulo 2, puede especularse que es debido a los requerimientos de dicho hilo argumental sobre el que va vertebrar el resto de su relato.

Los principales científicos del siglo XIX sobre los que Hesse va a tratar son Faraday, Maxwell y lo que la autora denomina “Escuela Continental de la Acción a Distancia” a la que dedica escasamente 7 páginas<sup>372</sup>. Su análisis de las contribuciones de Faraday se va a centrar en las interpretaciones que este da del “medio” en el que se transmiten las acciones, interpretaciones que presenta como propias de un campo físico. Acerca de Maxwell va a resaltar que su uso de modelos mecánicos le hace considerar el campo como físico, es decir, que los modelos de Maxwell serían unos modelos

---

<sup>372</sup> Ibid., pp. 216-22.

matemáticos. Finalmente, de la Escuela Continental señala que sigue los métodos de experimentación y desarrollos teóricos que comenzó el físico danés Hans Christian Ørsted (1777-1851); que hace uso de la fórmula sobre fenómenos eléctricos desarrollada por el físico francés André-Marie Ampère (1775-1836) que era una fórmula en la que las fuerzas eran consideradas fuerzas centrales; y que fueron los científicos alemanes Carl Friederich Gauß (1777-1855) y Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) quienes derivaron, desde la ecuación de Ampère, dos expresiones de la fuerza que actúa sobre los elementos de corriente.

El análisis de las propuestas de Faraday es el más extenso y se centra en tres hitos de este físico: el descubrimiento de la inducción electromagnética (1831), la publicación, en 1844, de la carta "*A speculation touching Electric Conduction and the Nature of Nature*"<sup>373</sup> y la publicación, en 1852, del artículo "*On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force*"<sup>374</sup>. Siguiendo a Hesse, estos hitos determinan las diferentes concepciones que Faraday propuso acerca de la transmisión de la acción. Gracias a la inducción eléctrica Faraday se habría convencido de que la acción se propagaba a través de un medio y no a distancia por tres

---

<sup>373</sup> Michael Faraday, "A Speculation Touching Electric Conduction and the Nature of Matter" *Philosophical Magazine* 24 (1844).

<sup>374</sup> Michael Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force" *Philosophical Magazine* 3, (Serie 4) (1852).

motivos<sup>375</sup>. El primero es que la cantidad de carga que se logra mediante la inducción eléctrica entre conductores que tiene lugar en un medio aislante depende de la naturaleza del aislante, es decir, la carga final depende del “medio” en el que ocurre. El segundo, porque si el aislante se corta y se separan las dos partes que quedan sobre sus superficies se generan cargas opuestas. Y, finalmente porque las líneas de inducción son curvas y no rectas como requiere la teoría de la fuerzas centrales.

Según Hesse, el que la acción fuera curva es lo que llevó a sostener a Faraday que eran entre partículas contiguas y de carga opuesta y que estaba relacionadas con el medio (el aislante). Pero también subraya que la definición de contigüidad de Faraday permitía acción a distancia a escala atómica, ya que para Faraday la contigüidad era un concepto similar al aristotélico, a saber, partículas seguidas del mismo tipo pero que no tienen por qué estar en contacto. No obstante, en su carta de 1844 considera que hay una contradicción en asumir esa acción a distancia local, puesto que, de ser así, para poder explicar los fenómenos tal y como los observaba, el espacio vacío tendría que comportarse como un conductor cuando estuviera entre partículas conductoras y como un aislante cuando estuviera entre partículas aislantes. Este absurdo lleva a Faraday a considerar que la materia la componen átomos como los definidos por Bošković, los cuales generarían una

---

<sup>375</sup> Hesse, *Forces and Fields*, pp. 198-206.

---

atmósfera de fuerza en torno a ellos. Para Hesse esto supone “*a decisive transition from continuous action understood mechanically to a continuous action understood in terms of forces filling space*”<sup>376</sup>, es decir, de un campo físico a un campo real. Por último, Hesse señala que la relevancia del artículo sobre las líneas de fuerzas es que en él Faraday establece los criterios para establecer la acción a distancia, a saber, no hay acción a distancia si la transmisión se ve afectada, si algo afecta al medio de transmisión, si tarda tiempo en transmitirse o si depende de los cuerpos que la reciben.

Con respecto a Maxwell Hesse señala claramente que los modelos mecánicos de los que hace uso no pueden ser pensados como “*literal descriptions of entities in nature, but only as interpretations, in terms of mechanical devices, of phenomena that are described mathematically*”<sup>377</sup>. De entre los modelos utilizados por Maxwell pone como ejemplo el modelo mecánico del éter electromagnético del cual Maxwell afirma que se pueden derivar de él sus ecuaciones electromagnéticas. Curiosamente lo que subraya Hesse es que si este modelo “*were intended as a description of the ultimate particles of nature*”<sup>378</sup> no se podría decir si implica acción a distancia o acción por contacto porque no depende del modelo sino de cómo se entienda la materia (si continua o atómica) o de cómo se entienda el éter. Es más, el hecho de que Maxwell

---

<sup>376</sup> Ibid., p. 201.

<sup>377</sup> Ibid., p. 206.

<sup>378</sup> Ibid., p. 207.

propusiera interpretaciones tan diferentes del éter como que era molecular o que era elástico le llevan a concluir que

*"[t]his illustrates the sort of difficulty that arises when one attempts to take the mechanical model as literal descriptions of nature, and to wring from them the answer to the question whether action at a distance occurs in nature or not"*<sup>379</sup>.

Es decir, Hesse, quien habría propuesto su teoría de modelos indicando que los llamados por ella modelos fundamentales (de los que los modos de acción serían una propiedad) permiten que la ciencia sea inteligible al contrario que el positivismo (considerado como puro formalismo) y que el realismo (considerado como descripciones literales) y que ha adscrito los modelos fundamentales al mecanicismo, repite tres veces en tres páginas que los modelos mecánicos dan lugar a problemas cuando se entienden como descripciones literales de la naturaleza. Y lo hace precisamente con el caso de Maxwell, cuya formulación matemática, no la de modelos, es la que se presenta como su teoría.

¿Maxwell propuso sus modelos como descripciones literales alguna vez? De haberlo hecho alguien hubieran sido los científicos del siglo XVII, acerca los cuales Hesse no señaló este tipo de problemas. ¿Es el modelo de las fuerzas centrales un campo matemático que se opone al campo físico de Faraday? ¿Es dicho modelo un "campo" en cualquier caso? ¿No tuvieron ningún impacto los desarrollos de la ciencia alemana de la época?

---

<sup>379</sup> Ibid., p. 208. El subrayado es mío.

¿Representa algo que dichos desarrollos se basaran en fuerzas que actúan en línea recta y no en curva siendo que lidian con los mismos fenómenos que Faraday?

Todas estas cuestiones son a las que se tratará de dar respuesta presentando un análisis más detallado de las tres tradiciones científicas que en el siglo XIX trataron de dar cuenta de los fenómenos eléctricos y magnéticos. El análisis descriptivo que se presentará de cada uno de ellos es internalista, es decir, no seguirá más hilo argumental que el relato interno de los hechos tal como tuvieron lugar. Pero para ello, conviene primero dotar de contexto al problema al que se enfrentaron estas tres tradiciones: dar cuenta de cómo tienen lugar las acciones eléctricas y magnéticas, y cómo ambas interaccionan entre sí.

#### **4.1. EL RETO DE LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO**

Como se trató en el capítulo 2, ya desde el siglo XVII, el mecanicismo se había convertido en el modelo más importante para la matematización de las otras ciencias naturales. No obstante, ninguna de las categorías de las que la mecánica hacía uso a finales del siglo XVIII permitía construir explicaciones mecánicas de los problemas del calor, la óptica, la electricidad y el magnetismo.

Durante el siglo XVIII se habían realizado algunos experimentos



para detectar la presencia de cargas con un electroscopio<sup>380</sup>, y estos experimentos se habían realizado en el contexto de la ya mencionada teoría de los fluidos. Esta teoría considera que existen dos fluidos eléctricos, considerados en cierto modo un tipo de substancia, uno llamado negativo y otro llamado positivo y que, en un sistema aislado, el total de carga se mantiene. Además esta misma teoría clasificaba los cuerpos en dos clases, los conductores, en los que los fluidos se pueden mover libremente, y los aislantes, en los que los fluidos no se pueden mover. No obstante, esta clasificación solo era teórica puesto que no se tenía conocimiento experimental acerca de qué significaba 'permitir que en un cuerpo un fluido se mueva libremente'.

En 1785 se hizo pública se realizó la primera medición relacionada con efectos de la electricidad<sup>381</sup>. Coulomb midió las fuerzas electrostáticas<sup>382</sup> responsables del alejamiento y acercamiento de las láminas de oro en el electroscopio. Más

---

<sup>380</sup> Un electroscopio es un aparato que consiste en dos láminas de oro colgando de una varilla vertical de metal y que detecta la presencia de cargas en función de los movimientos de aproximación y alejamiento de las láminas en diversas circunstancias.

<sup>381</sup> Charles Agustin Coulomb, "Sur L'électricité Et Le Magnétisme" *Mémoria de l'Academie Royale des Sciences* (1785-1789). Las medidas exactas de Coulomb fueron publicadas en 7 memorias entre 1785 y 1789, memorias que fueron presentadas a la Academia de las Ciencias de Paris. En la primera, de 1785, confirmó la ley que de que los cuerpos electrificados se atraen mutuamente con una fuerza proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos y en la segunda presentó las medidas de la cantidad y densidad de electricidad.

<sup>382</sup> La electrostática se ocupa de las interacciones de las cargas que están en reposo.

específicamente lo que midió fueron las atracciones y repulsiones entre dos esferas pequeñas cargadas eléctricamente usando un instrumento creado por él, a saber, la balanza de torsión<sup>383</sup>. El experimento que realizó para lograr las medidas consistía en suspender una esfera cargada de un alambre de plata de modo que la atracción o repulsión de otra esfera cargada causara el retorcimiento del alambre. Calibrando la torsión requerida para semejante retorcimiento Coulomb midió las fuerzas atractivas y repulsivas mediante la fuerza requerida para retorcer el alambre metálico. Además, al realizar estos experimentos determinó que dichas fuerzas variaban inversamente con el cuadrado de las distancias, como las fuerzas gravitacionales de Newton.

Por su parte, Poisson, miembro del grupo francés de físicos liderados por Laplace<sup>384</sup> que trataba de crear una física newtoniana unificada mediante un riguroso tratamiento mecánico y una precisión extrema en las medidas de las fuerzas de corto alcance – como las atracciones y repulsiones de las partículas –, demostró en 1812 que podía establecerse un análogo entre las partículas de dos fluidos magnéticos cargados contrariamente y la relación entre cargas opuestas que había establecido Coulomb.

---

<sup>383</sup> Sobre la construcción de la balanza de torsión véase, Charles Agustin Coulomb, *Collection De Mémoires Relatifs À La Physique*, 2 vols., vol. 1, Mémoires de Coulomb (Paris: Société Française de Physique, 1884), pp. 107-10.

<sup>384</sup> Cfr. William E. Burns, *Science in the Enlightenment. An Encyclopedia* (Santa Barbara, CA: ABC-CLIO, 2003), Entry: 'Physics'.

En el siglo XIX las investigaciones sobre electrodinámica<sup>385</sup> comenzaron a desarrollarse a partir de la invención de la pila galvánica, una cadena de discos alternados de zinc y cobre separados por un cartón humedecido que producía corriente eléctrica. Dos teorías se propusieron para explicar la diferencia de potencial que se generaba cuando los dos metales diferentes se ponían en contacto.

La primera teoría, que introdujo el físico Alessandro Volta (1745-1827) en Alemania e Italia, es llamada la 'hipótesis del contacto' y sostiene que la diferencia de potencial es generada por una fuerza de una naturaleza específica y diferente a todas las otras fuerzas de la naturaleza conocidas, fuerza que Volta denominó 'fuerza de contacto'. Esta fuerza tendría la propiedad de dar un impulso continuo al fluido eléctrico en una dirección constante. Teniendo en cuenta esta hipótesis los partidarios de esta teoría sostenían que las uniones y descomposiciones químicas que acompañaban al paso del fluido eléctrico no eran acciones primarias, sino secundarias y atribuían la circulación continua de electricidad a una tendencia perpetua de la fuerza electromotriz de contacto a transferir carga de una substancia a otra, es decir, para ellos este fenómeno era un fenómeno físico que producía efectos químicos.

---

<sup>385</sup> La electrodinámica se ocupa de estudiar la electricidad en movimiento.

La segunda teoría es la denominada ‘hipótesis química’ propuesta por los químicos británicos Humphry Davy (1778-1851) y William Hyde Wollaston (1776-1818) y el científico francés Auguste de La Rive (1801-1873). Esta hipótesis explicaba el fenómeno de la diferencia de potencial como una consecuencia de la afinidad química, o de una incipiente acción química, entre los metales y el aire o el vaho (*moisture*) que los rodeaba. Los partidarios de la hipótesis química consideraban que las uniones y descomposiciones tenían lugar siempre en la actividad de la pila voltaica y eran la fuente eficaz de la corriente, es decir, consideraban primario el fenómeno químico y como secundario el físico. Esta controversia no se resolvió hasta 1849 cuando el químico suizo Christian Schönbein (1799-1868) propuso una teoría que incorporaba elementos de las dos anteriores<sup>386</sup>.

Independientemente de la hipótesis con que se explicara dicho fenómeno, es importante señalar que la pila voltaica fue la principal fuente de experimentos eléctricos durante la primera mitad del siglo XIX, cuyos resultados dieron pie a la enunciación de un gran número de teorías electrodinámicas. De entre ellas, la más destacada es la teoría Ørsted quien en 1820 descubrió la

---

<sup>386</sup> Para un análisis detallado de la confrontación entre ambas teorías véase cfr. Helge Kragh, "Confusion and Controversy: Nineteenth-Century Theories of the Voltaic Pile" in *Nuovo Voltiana: Studies on Volta and His Times*, ed. Fabio Bevilacqua and L. Fregonese (Pavia: Università degli Studi di Pavia, 2000).

interacción entre el alambre conductor de una pila voltaica y una aguja imantada<sup>387</sup>.

Influido por la *Naturphilosophie*<sup>388</sup>, Ørsted creía en la unidad de las fuerzas y en la unidad de la naturaleza y trataba de lograr una concepción unificada de la naturaleza y sus relaciones a través de la unificación del origen de los “poderes” –los “poderes” de la naturaleza (es decir, el calor, la luz, la electricidad, el magnetismo), los “poderes” químicos y los gravitacionales–. Ørsted se interesó por al obra de Kant, era amigo de Fichte y él mismo reconoció la importancia de la obra de Schelling para la ciencia y, más concretamente, para los principios que él seguía<sup>389</sup>. Es más, se puede considerar que las fuerzas atractivas y repulsivas de Kant

---

<sup>387</sup> H.C. Ørsted, "Betrachtungen Über Den Elektromagnetismus" *Journal für Chemie und Physik* 32 (1821), Hans Christian Ørsted, "Betrachtungen Über Den Elektromagnetismus" *Journal für Chemie und Physik* 32 (1821).

<sup>388</sup> La *Naturphilosophie* es definida por Caneva como un conjunto de principios, conceptos y asunciones que tuvieron su origen en la obra de Schelling en los años posteriores a 1797, con los que se pretendía lograr una visión de los fenómenos naturales derivada de fuerzas elementales opuestas –a lo que Schelling denomina ‘Dinámica’– y que trataba de hallar una unificación de los fenómenos precisamente por su origen común en dichas fuerzas. Esta “dinámica” vinculada con la *Naturphilosophie* sostiene que la materia llena el espacio por medio de las fuerzas primitivas de atracción o repulsión y los cambios físicos de la naturaleza se producen a través de la polaridad y la convertibilidad entre la fuerzas. Kenneth L. Caneva, "Physics and *Naturalphilosophie*: A Reconnaissance" *History of Science* 35, no. 1 (1997): p. 42.

<sup>389</sup> De hecho, a mediados de la década de 1800 Ørsted elaboró un esquema tripartito al estilo de Schelling en el que se señalaba que, tanto la electricidad como el magnetismo, como los procesos químicos eran las formas en que el conflicto entre fuerzas opuestas se manifestaba en los diferentes estadios de dicho conflicto.

---

son las antecesoras de la concepción de las fuerzas fundamentales de Ørsted. Sin embargo en su trabajo científico no trató de cuestiones metafísicas, ni trató de buscar justificaciones a priori de las cuestiones que estaban fundamentadas empíricamente. De hecho, Ørsted indica que él no asume, como hace Coulomb, las causas de las acciones eléctricas<sup>390</sup>. Mientras que Coulomb considera que su causa es una sustancia material, los fluidos, Ørsted no quiere comprometerse con que las causas de la electricidad sean las fuerzas fundamentales de la naturaleza porque considera que una ciencia experimental es la que debe de probar las causas que asume, y en el caso de la electricidad esto no es posible. Por este motivo Ørsted señala que se debe denotar a la causa desconocida, en este caso de las fuerzas, por medio de una expresión global general.

Es la obra de Ørsted de 1812 *Ansicht der chemischen Naturgesetze durch die neuen Entdeckungen gewonnen*<sup>391</sup> la que es considerada como el principal ejemplo del impacto de la *Naturphilosophie* en la ciencia física<sup>392</sup>. De hecho está basada en lo que se describe en ella

---

<sup>390</sup> Cfr. H.C. Oersted, "Review of Saxtorph 1802-3." *Kjøbenhavnske lærde Efterretninger for Aar 1809 26-27* (1805): pp. 407-08. Traducción en Kenneth L. Caneva, "Colding, Öersted, and the Meanings of Force" *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 28, no. 1 (1997): p. 49.

<sup>391</sup> Hans Christian Ørsted, *Ansicht Der Chemischen Naturgesetze Durch Die Neuen Entdeckungen Gewonnen* (Berlin: Realschulbuchhandlung, 1812).

<sup>392</sup> Véase B. Gower, "Speculation in Physics: The Theory and Practice of *Naturphilosophie*" *Studies in History and Philosophy of Science* 3 (1973): p. 340.

como una concepción dinámica de la naturaleza<sup>393</sup>. Esta obra es especialmente relevante en el contexto de los orígenes de la teoría electromagnética ya que en ella Ørsted trata acerca de la identidad de la electricidad y el magnetismo. En ella trata de establecer una teoría general química de acuerdo con el principio filosófico de que todos los fenómenos están producidos por los dos mismos “poderes” fundamentales. Su búsqueda de la unidad de las fuerzas le llevó a buscar las condiciones en que las fuerzas eléctricas producen fuerzas químicas y, posteriormente, determinar las condiciones para los que los “poderes” fundamentales producen calor y luz. Por ese motivo, una vez demostrada la universalidad de las fuerzas, y sus relaciones, Ørsted supuso que la electricidad podría producir magnetismo. Acerca de la electricidad sostiene que todos los cuerpos tienen los dos tipos de fuerzas eléctricas –las atractivas y las repulsivas– pero que, al estar en equilibrio, la propagación de la electricidad se explica en términos de una alteración y un re-establecimiento del equilibrio interno de las fuerzas eléctricas universalmente distribuidas. Por tanto, la electricidad se extendería siempre de una manera ondulatoria, lo que justifica con la ilustración de que la

---

<sup>393</sup> Entre otras cosas, esta obra es una defensa de la química como teoría científica en contra de la acusación de de Kant de que la química sería un arte sistemático, ya que aún no tenía unos principios de los que pudieran derivarse a priori sus leyes, principios que Ørsted tratará de hallar.

electricidad no es algo que fluye como el agua en un canal sino que es un proceso de composición y de descomposición continuos

El mismo principio de unidad que había manifestado en 1812 le hizo buscar un fenómeno que mostrara que los efectos magnéticos son producidos por los mismos 'poderes' que producen los efectos eléctricos. Así, lo que se considera su gran descubrimiento se produjo en el invierno de 1819-1820. Delante de una audiencia sugirió por primera vez que si había de producirse alguna interacción entre la electricidad y una aguja imantada su efecto no sería en la dirección de la corriente sino que sería una acción lateral.

Anteriormente, varios experimentos buscando efectos en la dirección de la corriente habían fracasado, y Ørsted pensó que al igual que al conducirse electricidad se irradia luz y calor en todas las direcciones, lo mismo debía pasar con el magnetismo y por ese motivo comenzó a buscar otro tipo de efectos. Después de unos experimentos que produjeron unas desviaciones de la aguja imantada demasiado débiles e irregulares<sup>394</sup> como para tenerlos en consideración, en julio de 1820 Ørsted retomó los experimentos haciendo uso de una pila galvánica más potente: en un primer momento los efectos fueron todavía débiles, pero al usar alambres de mayor diámetro, los efectos se intensificaron y el deseado efecto

---

<sup>394</sup> H.C. Oersted, "Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle" *Annals of Philosophy* 16, no. Series 1, number 94 (1820): p. 273.



de la interacción del alambre con la aguja imantada pudo ser observado. En 1820, publicó este descubrimiento de la interacción entre el alambre que conecta una pila voltaica y una aguja magnética en un artículo de título *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*<sup>395</sup>. Las principales conclusiones que se pueden extraer de dicho artículo son las siguientes. En primer lugar, que el conflicto eléctrico actúa sobre los polos magnéticos. En segundo lugar, que el conflicto eléctrico actúa no sólo *en* el conductor sino también en su vecindad. Por último y debido a que, según Ørsted, acciones opuestas en los extremos de un diámetro es el rasgo característico de los vórtices y, dado que la misma parte del alambre dirige la aguja magnética hacia el este cuando se coloca el alambre sobre la aguja y hacia el oeste cuando se coloca debajo, Ørsted concluye que el “conflicto eléctrico”<sup>396</sup> genera vórtices alrededor del alambre. Concretamente subraya que

*“we may likewise infer that this conflict performs in circles; for without this condition it seems impossible that the one part the uniting wire, when placed below the magnetic pole, should drive it towards the east, and when place above it towards the west; for it is the nature of a circle that the motions in opposite parts should have an opposite direction”*<sup>397</sup>.

---

<sup>395</sup> Traducido al inglés como Ibid.

<sup>396</sup> El “conflicto eléctrico” es el efecto que tiene lugar en el conductor y el espacio que lo rodea. Cfr. Ibid.: p. 274.

<sup>397</sup> Ibid.: p. 276.

De este modo quedó establecida para Ørsted la ley del electromagnetismo, a saber, que los efectos magnéticos de las corrientes eléctricas tiene un movimiento circular a su alrededor.

Después de 1820 Ørsted tuvo que asimilar el nuevo fenómeno del electromagnetismo en su esquema previo de acciones y fuerzas. Él interpretaba el electromagnetismo como la acción de un movimiento espiral de las acciones magnéticas dentro del conductor, y suponía que dentro de dichas espirales las fuerzas eléctricas se movían igualmente siguiendo el camino espiral. Como señala Caneva a esta acción circular de las fuerzas es lo que Ørsted llamó electromagnetismo<sup>398</sup>. Es decir, el electromagnetismo sería para Ørsted el curso circular ininterrumpido de las fuerzas eléctricas en el conductor bajo la forma de acción magnética<sup>399</sup>. Por tanto, Ørsted no consideraba que el magnetismo fuera el "efecto" de la corriente sino que supuso que el magnetismo asociado a la electricidad mostraba la existencia de una nueva forma en que las fuerzas fundamentales se expresaban.

Entre los receptores de la teoría de Ørsted, solo Ampère, como se trató en el anterior epígrafe, se tomó en serio la posible relación entre electricidad y magnetismo. El mismo Ampère atribuyó la hostilidad de los franceses hacia la teoría de Ørsted al hecho de la

---

<sup>398</sup> Caneva, "Colding, Ørsted, and the Meanings of Force": p. 88.

<sup>399</sup> Ørsted, "Betrachtungen Über Den Elektromagnetismus": p. 220.

creencia ciega que estos tenían en la teoría de los fluidos magnéticos de Coulomb<sup>400</sup>.

El estado de las investigaciones sobre el magnetismo antes del XIX era más primitivo que el de la electricidad. La obra de mayor difusión sobre el tema, y la más sistemática hasta el momento, era la ya mencionada *De Magnete* de Gilbert. De hecho, en el siglo XVII el *De Magnete* de Gilbert se había convertido en Inglaterra en el modelo de práctica experimental de la filosofía natural<sup>401</sup>. Lo más destacable de esta obra es, como señala Burt<sup>402</sup>, que en ella Gilbert sostiene que la Tierra es un imán gigante y que la fuerza del imán se relaciona con la cantidad de masa, es decir, que es la primera vez que en un escrito científico el magnetismo aparece como dependiente de la masa. Como ya se ha señalado, el tipo de acción que Gilbert defiende en su obra es un modelo de acción a distancia con una interpretación animista. En las dos primeras décadas del siglo XIX, en cambio, las opiniones sobre el magnetismo variaron considerablemente influidas por los seguidores de los experimentos de Ampère, muchos de ellos alemanes, y los partidarios de los fluidos newtonianos, que además de ser la concepción hegemónica en Francia, estaba favorecida, como señala

---

<sup>400</sup> Cfr. Kenneth L. Caneva, "Ampère, the Etherians and the Oersted Conexion" *British Journal for the History of Science* 13, no. 44 (1980): p. 124.

<sup>401</sup> Cfr. J.A. Bennett, "The Mechanic's Philosophy and the Mechanical Philosophy" *History of Science* 24 (1986).

<sup>402</sup> Burt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, p. 174.

---

Darrigol<sup>403</sup>, por el hecho de que los métodos de física matemática de los franceses facilitaban la representación cuantitativa de esos fenómenos y, por tanto, evitaban los debates acerca de nociones cualitativas y permitían su difusión a otros países.

## 4.2. LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LA ACCIÓN A DISTANCIA

Los modelos y desarrollo matemáticos en Francia surgen en el contexto de un programa de extensión del newtonianismo, en un intento de llevara a sus últimas consecuencias la aproximación mecanicista y su versatilidad para ser representada matemáticamente. El análisis infinitesimal legado por Newton y Leibniz era incapaz de conducir a mejores resultados que los obtenidos en el *Principia*<sup>404</sup> y los científicos franceses desarrollaron nuevas herramientas matemáticas para poder dar mejores y nuevos resultados. Además, también había problemas con los supuestos físicos que Newton había asumido: la solución que Newton dio al problema de la precesión de los equinoccios era defectuosa; de entre las perturbaciones de los movimientos celestes sólo había considerado las de la Luna, e incluso de entre las perturbaciones de ésta la más importante, la evección —la

---

<sup>403</sup> Cfr. Olivier Darrigol, *Electrodynamics from Ampère to Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 2000), p. 77.

<sup>404</sup> Por ejemplo, la posibilidad de descubrir una teoría sobre la figura de los cuerpos quedó limitada por la suposición de que los cuerpos eran homogéneos.

desigualdad periódica en la forma y posición de la órbita de la Luna ocasionada por la atracción del Sol- no había sido investigada.

Para solucionar estos problemas, los matemáticos del siglo XVIII consideraban que habían de llevar a la perfección al mismo tiempo la ciencia de la mecánica, la óptica y el análisis matemático<sup>405</sup>. Y para dar comienzo a esta empresa consideraron que en el estado en que se encontraba el cálculo diferencial no era posible resolver los grandes problemas de la astronomía. Por ese motivo se ocuparon de mejorar sus herramientas matemáticas.

La geometría analítica y el cálculo infinitesimal del siglo XVII habían posibilitado que los problemas físicos fueran representados matemáticamente logrando que la relación entre las cantidades físicas fuera expresada en términos de las relaciones entre entidades geométricas. Estas entidades, a su vez, fueron expresadas en el siglo XVIII mediante símbolos algebraicos. Con la emergencia del concepto de función de una variable con Bernoulli y Euler (como se ha mencionado), el cálculo geométrico fue reemplazado por el cálculo de funciones, logrando un desarrollo más complejo de las matemáticas físicas. Por otra parte, los matemáticos se centraron también en mejorar el cálculo infinitesimal consiguiendo, entre otros logros la invención del cálculo de derivadas parciales por D'Alembert en 1747 hecho

---

<sup>405</sup> Laplace, *Oeuvres Complètes* 6. *Exposition Du Système Du Monde.*, pág. 469.

---

público en 1750<sup>406</sup> –que fueron mejoradas y extendidas por Euler– y el cálculo de variaciones descubierto por Lagrange en 1760<sup>407</sup>. Estos desarrollos matemáticos son los que caracterizarán la ciencia francesa en el siglo XIX.

### 4.2.1 La tradición francesa

La tradición francesa se encuadra en lo que el historiador John Theodore Merz (1840-1921) denominó como la ‘visión astronómica de la naturaleza’. Esta “visión” pretende explicar todos los fenómenos terrestres por medio de interacciones moleculares a las que se aplican fuerzas de atracción o repulsión entre partículas, de la misma forma como se aplican las fuerzas centrales entre los planetas en el sistema solar<sup>408</sup>. De dicha “visión” surgió lo que se conoce como ‘la primera física’ de la que trataremos en este epígrafe. Esta “visión” es la que se corresponde con el programa laplaciano<sup>409</sup>, el primer programa sistemático de investigación que obtuvo una amplia gama de resultados científicos –como el

---

<sup>406</sup> Jean le Rond D'Alembert, "Recherches Sur La Courbe Que Forme Une Corde Tendue Mise En Vibration" *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles-lettres de Berlin pour l'année 1747* (1750).

<sup>407</sup> Joseph Louis Lagrange, "Essai D'une Nouvelle Méthode Poru Déterminer Les Maxima Et Les Minima Des Formules Intégrales Indéfinies" *Miscellanea Taurinensia* 2 (1760).

<sup>408</sup> John Theodore Merz, *A History of European Thought in the Nineteenth Century*, vol. 1 (Edinburgh: Blackwood and Sons, 1896), pp. 347-48.

<sup>409</sup> Para un estudio más detallado de la ciencia laplaciana Cfr. Maurice Crosland, *The Society of Arcueil: A View of French Science at the Time of Napoleon I* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1967).

descubrimiento, por parte del físico Étienne-Louis Mauvout (1775-1812) de la polarización de la luz— y que fue, como señala Ravetz<sup>410</sup>, un ejemplo de estilo de ciencia durante gran parte de la primera mitad del siglo XIX.

Este modelo de física del programa laplaciano aplicaba la argumentación matemática derivada de la tradición newtoniana del siglo XVIII para explicar nuevos resultados experimentales. La obra emblemática de este programa es el *Traité de Mécanique Céleste*<sup>411</sup>, 16 libros publicados entre 1799 y 1825 en los que Laplace trató de dar cuenta de todos los movimientos planetarios, con el fin de finalizar lo que había Newton había iniciado con su *Principia*. Y, más o menos en torno a 1805, algo antes de la mitad de la publicación de esta obra<sup>412</sup>, Laplace ya había formulado su idea básica de la reducción de todos los fenómenos físicos a un sistema de partículas densamente distribuidas actuando atrayente o repulsivamente unas sobre otras a distancia. En esta línea el programa se centró en reducir la amplia variedad de los fenómenos físicos conocidos a una explicación común basada en unos pocos elementos como las moléculas de diferentes materias

---

<sup>410</sup> Jerome R. Ravetz, *Scientific Knowledge and Its Social Problems* (London: Transactions Publishers, 1996), p. 226.

<sup>411</sup> P.S. Laplace, *Oeuvres Complètes De Laplace*, ed. L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels, 14 vols. (Paris: Gauthier-Villars, 1878-1912), vols. 1-5.

<sup>412</sup> Robert Fox, "The Rise and Fall of Laplacian Physics" *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 4 (1974): p. 100.

que existen en la naturaleza y las fuerzas de interacción entre ellas. Concretamente las entidades que los laplacianos asumían eran las moléculas y los fluidos imponderables<sup>413</sup>. Las primeras desempeñaron un papel clave en el programa físico de Laplace, especialmente desde su colaboración en con el químico Claude Louis Berthollet (1748-1822). De este modo propiedades físicas tales como la capilaridad o la afinidad química eran explicadas mediante fuerzas de corto alcance entre las moléculas de materia del mismo modo que las fuerzas de gravitación explicaban el movimiento del sistema solar en la mecánica newtoniana. Por su parte los fluidos imponderables consistían en partículas relacionadas por fuerzas centrales de corto alcance y eran los agentes de la luz, el calor, la electricidad y el magnetismo. Gracias a estos fluidos los fenómenos ópticos eran explicados como el resultado de fuerzas actuando entre las partículas de luz (fluido imponderable) y las partículas de la materia ordinaria (las moléculas), mientras que el calor, la electricidad y el magnetismo eran explicados exclusivamente en términos de los fluidos imponderables. La principal ventaja de las explicaciones en términos de fluidos imponderables es que podían ser traducidas en sistemas de ecuaciones diferenciales capaces de explicar los

---

<sup>413</sup> Se llaman imponderables porque no se les adscribe masa gravitacional. Esta suposición se debía a que se observaba que los cuerpos cargados o calentados no tenían un aumento de masa.



fenómenos que se querían estudiar y, de este modo, y producir nuevos fenómenos.

Las fuerzas que se tienen en consideración en el programa laplaciano son las fuerzas centrales newtonianas, cuyas leyes tuvieron que extender para que dieran cuenta no solo de los fenómenos de atracciones sino también de los de repulsiones. Estas fuerzas eran acciones a distancia y eran tan fundamentales para el programa que hasta se utilizaban para explicar fenómenos locales como el impacto<sup>414</sup>. El hecho de que la física laplaciana tuviera un concepto unificado de la acción —en este caso en tanto que acción central y a distancia— es uno de los rasgos de este programa que más influencia tuvo. Es más, como afirma Harman<sup>415</sup>, permitió que incluso cuando posteriormente se rechazaron los fluidos imponderables algunos de sus elementos específicos permanecieran en vigor. Fox señala que para 1805, algo antes de la mitad de la publicación de su magna obra, Laplace ya había formulado la idea básica de la reducción de todos los fenómenos físicos a un sistema de partículas densamente distribuidas actuando atrayente o repulsivamente unas sobre otras a distancia<sup>416</sup>.

---

<sup>414</sup> Cfr. P.S. Laplace, *Oeuvres Complètes V. I. Traité De Mécanique Céleste Première Partie* (Paris: Gauthier-Villars, 1878), pp. 74-75.

<sup>415</sup> P.M. Harman, *Energy, Force, and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth Century Physics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1982), p. 19.

<sup>416</sup> Fox, "The Rise and Fall of Laplacian Physics": p. 100.

En torno a 1815 surgió en Francia un movimiento antilaplaciano liderado por el físico Augustine-Jean Fresnel (1788-1827) y el matemático Jean-Baptiste Fourier (1768-1830). Ambos compartían con los laplacianos el rol fundamental que estos otorgaban a las matemáticas a la hora de tratar los fenómenos físicos pero tenían una visión diferente de los fenómenos de la óptica, la electricidad o el magnetismo. En palabras de Steinle:

*“By no means did they [the antilaplacian] seek to question the ideal of quantification, precision measurement, or mathematical formalization (...) what the new generation criticized were the narrow conceptual boundaries within which the Laplacian program was pursued. These boundaries had been chosen in part because they encompassed a whole suite of mathematical tools and concepts, tools whose efficacy had been demonstrated in celestial mechanics. Rejecting the boundaries while maintaining the ideal of mathematical formalization **demanded the invention and refinement of new mathematical methods**”<sup>417</sup>.*

La primera teoría alternativa al programa laplaciano proviene del campo de la óptica. La teoría laplaciana de la luz era una teoría corpuscular en la que los corpúsculos de luz eran atraídos por fuerzas a distancia de corto alcance que ejercían sobre ellos las partículas del aire, y en la que las fuerzas contempladas se regían por las leyes de la dinámica de Newton<sup>418</sup>. Fresnel propuso como

---

<sup>417</sup> Friedrich Steinle, *Exploratory Experiments. Ampère, Faraday, and the Origins of Electrodynamics*, trans. Alex Levine (Pittsburgh, PA.: University of Pittsburgh Press, 2016), p. 32. El subrayado es mío.

<sup>418</sup> Acerca de la teoría de la luz de Laplace cfr. Charles Coulston. Gillispie, *Pierre-Simon Laplace, 1749-1827: A Life in Exact Science* (Princeton, NJ.: Princeton University Press, 1997), pp. 204-06.

alternativa la teoría ondulatoria<sup>419</sup> porque consideraba que esta daba cuenta de un modo más adecuado del fenómeno de la difracción<sup>420</sup>. Esta teoría sostiene que la luz consiste en el movimiento ondulatorio de una sustancia etérea capaz de penetrar la materia y, por tanto, niega las acciones a distancia. Es decir, la teoría ondulatoria negaba las acciones a distancia como explicación de los fenómenos ópticos.

Una vez que las acciones a distancia quedaron desacreditadas en el campo de la óptica —una de las ramas más importantes del programa laplaciano— los antilaplacianos llevaron a cabo una revisión de las otras ramas del programa. De entre ellos conviene resaltar dos casos. El primero el del físico Alexis Thérèse Petit y el químico Pierre-Louis Dulong quienes desecharon el fluido imponderable ‘calórico’<sup>421</sup> y elaboraron una teoría sobre el calor tomando como base la teoría atómica de Dalton<sup>422</sup> que les llevó a descubrir que todos los elementos simples tienen el mismo calor específico (que es el producto de la capacidad calorífica por unidad

---

<sup>419</sup> Augustine Fresnel, "Elementary View of the Undulatory Theory of Light" *The Quarterly Journal of Science, Literature and Art* 23, no. 1 (1827).

<sup>420</sup> Acerca de cómo la teoría ondulatoria explicaba la difracción cfr. Jed Z. Buchwald, "Fresnel and Diffraction Theory" *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 33, no. 110 (1983).

<sup>421</sup> Sobre el rechazo por parte de los antilaplacianos de los fluidos imponderables cfr. Robert H. Silliman, "Fresnel and the Emergence of Physics as a Discipline" *Historical Studies in the Physical Sciences* 4 (1974): pp. 146-47.

<sup>422</sup> Acerca de la teoría daltónica de los átomos cfr. Alan Chalmers, *The Scientist's Atom and the Philosopher's Stone. How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms* (Dordrecht: Springer, 2009), pp. 173-82.

---

de masa y el peso atómico del elemento)<sup>423</sup>. El segundo es el caso de Fourier, precisamente por su formulación matemática de su teoría del calor. En su *Théorie Analytique de la Chaleur*<sup>424</sup> Fourier hace uso de los métodos analíticos<sup>425</sup> con los que el matemático Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) quería fundamentar la matemática<sup>426</sup>. Estos métodos se aproximaban a los fenómenos físicos de un modo más abstracto que Laplace, sustituyendo lo que en Laplace eran conexiones físicas por ecuaciones que relacionaban las coordenadas de diferentes puntos.

En relación con los fenómenos de la electricidad y el magnetismo el antilaplacianismo se encarna en Ampère – de quien trataremos en el siguiente subepígrafe – quien buscaba una mayor precisión experimental que la que el programa laplaciano establecía. Es importante señalar que, aunque hiciera uso del concepto de fluido eléctrico como los laplacianos, como señala

---

<sup>423</sup> Cfr. Pierre Louis Dulong and Alexis Petit, "Recherches Sur La Mesure Des Températures Et Sur Les Lois De La Communication De La Chaleur" *Annales de Chimie et de Physique* 2, no. 7 (1818).

<sup>424</sup> Joseph Fourier, *Théorie Analytique De La Chaleur* (Paris: Firmin Didot, 1823).

<sup>425</sup> El título de principal obra de Lagrange, *Mécanique Analitique* se contrapone por este motivo con el de la principal obra de Laplace *Traité de Mécanique Céleste*. Cfr. Joseph Louis Lagrange, *Mécanique Analitique* (Paris: Chez La Veuve Desaint, 1788).

<sup>426</sup> Sobre los desarrollos matemáticos de Lagrange cfr. Marco Panza Giovanni, "Lagrange's Theory of Analytical Functions and His Ideal of Purity of Method" *Archive for History of Exact Sciences* 66 (2012).

Williams<sup>427</sup>, este fluido tenía más en común con el éter de Fresnel que con los fluidos laplacianos. Por tanto, Ampère reaccionó contra la física laplaciana; sin embargo, heredó algunos de sus rasgos, como el hecho de que los fenómenos electromagnéticos fueran explicados mediante acciones a distancia, y que dichas acciones fueran entendidas como resultado de interacciones entre entidades infinitesimales. Por tanto, su antilaplacianismo consistía, fundamentalmente, en el rechazo de las moléculas y los fluidos imponderables. Para Ampère, las entidades infinitesimales era un concepto más abstracto que los laplacianos, a saber, los elementos diferenciales de un conductor.

#### 4.2.2. Ampère

No se pretende aquí una exposición detallada de la génesis y el desarrollo de las teorías de Ampère, para lo cual refiero a los trabajos de Blondel<sup>428</sup>, Caneva<sup>429</sup> y Pearce Williams<sup>430</sup>, sino

---

<sup>427</sup> L. Pearce Williams, "Ampère's Electrodynamical Molecular Model" *Contemporary Physics* 4, no. 2 (1962): pp. 118 y ss.

<sup>428</sup> Cfr. Christine Blondel, "Sur Les Premières Recherches De Formule Électrodynamique Par Ampère" *Revue d'Histoire des Sciences* 31 (1978). Christine Blondel, *Ampère Et La Création De L'electrodynamique (1820-1827)*, (Ministère De L'education National Comités Des Travaux Historiques Et Scientifiques, Mémoires De La Section Des Sciences, 10.) (Paris: Bibliothèque Nationale, 1982).

<sup>429</sup> Kenneth L. Caneva, "From Galvanism to Electrodynamics; the Transformation of German Physics and Its Social Context" *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 9, no. 1 (1978). Caneva, "Ampère, the Etherians and the Oersted Conexion".

simplemente señalar algunos de los puntos clave de cómo cambió la concepción del electromagnetismo. La mayor aportación de Ampère fue su la ley de interacción entre dos elementos de corriente. Al descubrir la interacción entre dos corrientes eléctricas en 1820, Ampère cambió el enfoque de cómo se trataban las interacciones electromagnéticas tomando ahora las corrientes eléctricas como fundamentales y no las cargas. Es más planteó que la electricidad en movimiento ejercía fuerzas completamente distintas a las atracciones electrostáticas<sup>431</sup>. ¿En qué consistía dicha ley?

En la obra culmen de Ampère "*Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience*"<sup>432</sup> sus investigaciones se volvieron más analíticas al explicar las acciones entre dos corrientes en términos de elementos de corriente. Allí se presentan los principales elementos de su

---

<sup>430</sup> L. Pearce Williams, "What Were Ampere's Earliest Discoveries in Electrodynamics?" *Isis* 74, no. 274 (1983).

<sup>431</sup> Sobre las diferencias entre dichas fuerzas véase la Tesis Doctoral de William Thomas Archibald, "'Eine Sinnreiche Hypothese': Aspects of Action-at-a-Distance Electromagnetic Theory, 1820-1880" (Tesis Doctoral, University of Toronto, 1987), p. 49.

<sup>432</sup> A.M. Ampère, "Mémoire Sur La Théorie Mathématique Des Phénomènes Électrodynamiques, Uniquement Déduite De L'expérience" in *Mémoires De L'Académie Des Sciences De L'institut De France, T. 6, Année 1823* (Paris: Institut de France, 1826).

electrodinámica: los artefactos experimentales<sup>433</sup>, la fórmula matemática de la interacción de dos corrientes, el método 0 (*null method*<sup>434</sup>), y la reducción del magnetismo a la electricidad. Basándose en el método 0 en el que se muestra que diferentes configuraciones de conductores ejercen fuerzas que se equilibran unas a otras completamente, Ampère realizó cuatro experimentos sobre los que se asentaría la fundamentación experimental de su fórmula de la fuerzas ejercida entre elementos de corriente<sup>435</sup>. Esta fórmula es una fórmula para las fuerzas entre elementos infinitesimales de corriente del siguiente modo:

$$F = \frac{ii' ds ds'}{r^2} \left( \sin \theta \sin \theta' \cos w - \frac{1}{2} \cos \theta \cos \theta' \right)$$

(4.1)

siendo  $r$  la longitud de la línea recta que une los puntos medios de los elementos de corriente,  $\theta$  y  $\theta'$  los ángulos entre la continuación de esa recta y la dirección de los elementos de corriente en la dirección de las corrientes, y  $w$  el ángulo que se dibuja mediante los planos de dichas direcciones que intersecan en la línea que une los elementos. Es decir, Ampère señala que la fuerza es

---

<sup>433</sup> Cfr. James R. Hofmann, "Ampere's Invention of Equilibrium Apparatus: A Response to Experimental Anomaly" *British Journal for the History of Science* 20 (1987): pp. 319-37.

<sup>434</sup> Una explicación conceptual del *null method* puede encontrarse en Darrigol, *Electrodynamics*, pp. 27-29.

<sup>435</sup> Sobre estos experimentos cfr. Herman Erlichson, "André-Marie Ampère, The "Newton of Electricity" And How the Simplicity Criterion Resulted in the Disuse of His Formula" *Physis* 37, no. 1 (2000): pp. 57-61.

proporcional a la electricidad de los elementos de corriente y a los ángulos de orientación de dichos elementos con la línea que los une e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

Sin embargo, Ampère necesitaba aún una aproximación axiomática al problema de la interacción de las corrientes, dado que su teoría era principalmente especulativa. Por este motivo adoptó la teoría francesa de los dos fluidos y más tarde, gracias a sus aparatos para corrientes rectilíneas, demostró la existencia física de fuerzas centrales actuando entre los elementos de corriente. No obstante, aunque trató de señalar que sus deducciones no dependían de ninguna representación particular de la corriente, aun habiendo asumido la hipótesis de los dos fluidos, continuó especulando sobre la posibilidad de que procesos que involucraran el éter podían estar por detrás de los fenómenos eléctricos<sup>436</sup>.

Lo más relevante de este trabajo de Ampère es que su fórmula de las fuerzas entre dos elementos de corriente no dependía de ninguna hipótesis en lo que a la naturaleza de la corriente eléctrica se refiere. De hecho, en su memoria de 1826 señala que cualquiera que sea la causa física con la cual queramos relacionar el fenómeno

---

<sup>436</sup> Sobre la doble lectura como laplaciano y como partidario del éter cfr. Christine Blondel, "Vision Physique 'Éthérienne', Mathématisation 'Laplacienne': L'électrodynamique D' Ampère, La Mathématisation 1780-1830" *Revue d'Histoire des Sciences et leurs Applications* 42 (1989).



producido por la acción eléctrica, la fórmula obtenida permanecerá siempre como la expresión de los hechos. Por tanto, aunque especulara sobre diversos mecanismos que pudieran dar cuenta de los fenómenos, Ampère exigía una clara distinción entre leyes y causas.

Con respecto al magnetismo, los desarrollos de Ampère se centraron en el experimento de Ørsted –del que se tratará en detalle el siguiente epígrafe pero del que conviene señalar que detectó la desviación de una aguja magnética en presencia de una corriente– tratando de lograr una unificación entre el fenómeno de la electricidad y el del magnetismo gracias a su fórmula de interacción entre elementos de corriente pero, esta vez, sobre la hipótesis de la existencia de corrientes eléctricas en el interior de los imanes: diseñó una aguja magnética estática –aquella cuyo plano de rotación puede hacerse perpendicular a la acción de la tierra y depender, por tanto, tan sólo de la acción del cable y no de la influencia de la Tierra– situó la aguja imantada cerca del cable y la suspendió en un detector universal de corriente al que posteriormente se le conocería como ‘galvanómetro’. Observó entonces que en presencia de una corriente, la aguja magnética con el plano de rotación perpendicular al de la tierra tendía a situarse en ángulo recto con la línea más corta que unía el centro de la aguja con el cable, concluyendo que cada imán debía sus propiedades a la existencia de una corriente encerrada en el interior de su masa. De este modo Ampère comenzó a desarrollar

su teoría del magnetismo basándose en que el magnetismo no era más que electricidad en movimiento circular<sup>437</sup>. En 1820 mostró que un alambre dispuesto en forma de espiral actuaba como un imán y enunció que todos los efectos magnéticos podían ser reproducidos por corrientes eléctricas de alambres de diversas configuraciones<sup>438</sup>.

### **4.3. LAS TEORÍAS DEL POTENCIAL Y LA ELECTRODINÁMICA DE WEBER**

La ciencia alemana, entendiendo como tal los desarrollos que los científicos alemanes realizaron entre 1840 y 1880, se compone de dos vertientes: la electrodinámica y las teorías del potencial. La electrodinámica es la ciencia que, a partir de 1840, científicos como Fechner o Weber desarrollaron partiendo de los descubrimientos de Ampère. Gracias a la electrodinámica, los científicos alemanes lograron una síntesis única reconciliando los principios conocidos de la electrostática con los nuevos fenómenos del galvanismo y el electromagnetismo. Esta síntesis tuvo su periodo de auge hasta la llegada del segundo tercio del siglo XIX en el que la nueva

---

<sup>437</sup> Concretamente Ampère desarrolló un modelo en que el magnetismo sería "microcorrientes" alrededor de las partículas del imán. Cfr. Williams, "Ampère's Electrodynamical Molecular Model": pp. 119-22.

<sup>438</sup> André-Marie Ampère, "Sur L'action Mutuelle Entre Deux Courants Électriques, Entre Un Courant Électrique Et Un Aimant Ou Le Globe Terrestre, Et Entre Deux Aimans" *Annales de Chimie et de Physique* (1820).

generación de científicos alemanes comenzó a incorporar la teoría de campos británica.

Ya se ha señalado que Merz consideraba que la tradición francesa pertenecía a la visión astronómica de la naturaleza. Pues bien, para este historiador, la electrodinámica era la culminación de dicha visión<sup>439</sup> porque logró llevar el modelo newtoniano de la gravitación al microcosmos mediante un modelo atómico de partículas indivisibles, fuerzas centrales instantáneas y existencia del espacio.

Por su parte la teoría de potencial es una teoría que tiene sus orígenes en Laplace y en cómo este solventó el problema de los valores frontera –el problema de cómo encontrar la solución de una ecuación diferencial que describe el comportamiento de una cantidad física en una región y que está sujeta a unas condiciones frontera, condiciones que vienen dadas por influencias de fuera de la región.

### 4.3.1. El Potencial

Los orígenes de la teoría del potencial se encuentran en los trabajos de Laplace sobre la gravitación<sup>440</sup>. Laplace se ocupó, en

---

<sup>439</sup> Merz, *A History of European Thought in the Nineteenth Century*, pp. 366-81.

<sup>440</sup> Aunque se debe a Laplace su uso en la resolución de problemas físicos, la primera vez que aparece la función potencial es en un tratado del matemático Adrian-Marie Legendre (1752-1833). A.-M. Legendre, "Recherches Sur L'attraction Des Sphéroïdes Homogènes" *Mémoires de mathématique et de physique présentés à l'Académie royale des sciences, par divers sçavans & lûs dans*

esto contexto, principalmente de dos problemas, a saber, hallar la figura de la Tierra compatible con la teoría de la gravitación de Newton<sup>441</sup> y determinar la existencia y distribución de los anillos de Saturno. Para solucionar ambos problemas es para lo que se introdujo la noción de potencial.

Las obras en las que Laplace trata acerca del primer problema, determinar una figura de la tierra compatible con la teoría newtoniana de la gravitación, son 6 memorias<sup>442</sup> y un tratado, la

---

*ses assemblées*. Anné 1785 (1783). En esta obra la función potencial – que Laplace había denominado ‘función  $V$ ’ – hace referencia a la acción gravitatoria que ejerce la suma de las partes elementales de un cuerpo sobre un punto del espacio, y es igual a la suma de los cocientes de las masas de dichos elementos a sus distancias a un punto fijo. Con ella Legendre encontró la solución al problema de la determinación de la fuerza de atracción de un sólido de revolución a una masa unidad en un punto fuera del sólido, tanto a lo largo del radio vector que une el punto con el centro del sólido como respecto al ángulo que determina la dirección. Legendre señala que la fuerza es  $-(dV/dr)$  para el primer caso y  $-(1/r)(dV/d\theta)$  para el segundo.

<sup>441</sup> Laplace llegó a concluir que era un elipsoide achatado por los polos.

<sup>442</sup> P.S. Laplace, "Recherches, 1<sup>o</sup>, Sur L'integration Des Équations Différentielles Aux Différences Finies, Et Sur Leur Usage Dans La Théorie Des Hasards. 2<sup>o</sup>, Sur Le Principe De La Gravitation Universelle, Et Sur Les Inégaliés Sécualires Des Planètes Quen En Dépendent." in *Oeuvres Complètes De Laplace*, ed. L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels (Paris: Gauthier-Villars, 1776). P.S. Laplace, "Recherches Sur Le Calcul Intégral Et Sur Le Système Du Monde" in *Oeuvres Complètes De Laplace*, ed. L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels (Paris: Gauthier-Villars, 1776). P.S. Laplace, "Recherches Sur Plusieurs Points Du Sytème Du Monde" in *Oeuvres Complètes De Laplace*, ed. L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels (Paris: Gauthier-Villars, 1778). P.S. Laplace, *Un Mémoire Sur L'attraction Des Sphéroïdes Elliptiques* (Paris: 1783). P.S. Laplace, "Théorie Des Attractions Des Sphéroïdes Et De La Figure Des Planètes" in *Oeuvres Complètes De Laplace*, ed. L'Académie des Sciences par

*"Théorie du mouvement et de la figure elliptique des planètes"*<sup>443</sup>. En las tres primeras memorias Laplace se refiere al problema de la atracción de los esferoides, que es el contexto en el que surge la teoría del potencial, aunque en ellas no menciona explícitamente lo que ahora denominamos función potencial. El problema que se trata en estas memorias es el de encontrar la forma casi esférica de una masa de un fluido homogéneo que rota con una velocidad angular uniforme alrededor del eje de su figura, y que permanece en equilibrio relativo, para llegar a concluir que se trata de un elipsoide oblato (que rota en torno a su eje menor).

Con anterioridad a estas memorias Laplace estaba tratando de establecer la figura de la Tierra, ya que era una cuestión importante a la hora de determinar, con datos, el principio universal de atracción entre partículas de materia. Para determinar dicha figura, Laplace partió del modelo de Newton según el cual la Tierra es considerada como una masa homogéneamente fluida rotando sobre su propio eje, en donde todas las partículas están sometidas a la ley de atracción del inverso del cuadrado de las distancias. Seguidamente trató de determinar a priori qué tipo de sólido en revolución era la tierra, determinando que era un

---

MM. les secrétaires perpétuels (Paris: Gauthier-Villars, 1785). P.S. Laplace, "Mémoire Sur La Figure De La Terre" in *Oeuvres Complètes De Laplace*, ed. L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels (Paris: Gauthier-Villars, 1786).

<sup>443</sup> P.S. Laplace, *Théorie Du Mouvement Et De La Figure Elliptique Des Planètes* (Paris: 1784).

---

esferoide homogéneo en equilibrio. Posteriormente Laplace escribió cuatro memorias en las que se hace un uso esencial de la función que denomina  $V$ .

Por otra parte, en su tratado "*Théorie du mouvement et de la figure elliptique des planètes*" se trata la teoría de la atracción en relación con la figura de la Tierra basándose en unas de sus memorias, la de 1783 "*Un Mémoire Sur L'attraction Des Sphéroïdes Elliptiques*". Esta obra de 1784 es de gran importancia porque es la primera que Laplace publicó por separado acerca del tema y porque en ella presenta el primer resumen para legos de lo que es su visión del mundo. Tiene 17 secciones de las que las 7 primeras se dedican a las atracciones. Mientras que en la primera parte trata a modo de libro de texto de problemas de mecánica racional y de problemas sobre el movimiento de los cuerpos del sistema solar, en la segunda reanuda con un estilo dirigido sólo a matemáticos sus investigaciones sobre la leyes de la atracción gravitatoria de esferoides. La importancia de esta segunda parte es la naturaleza específica de las matemáticas que se utilizan, ya que es el germen de lo que posteriormente se designaría como el potencial, es decir, el germen de la denominada como función  $V$ . Partiendo de la ecuación de un elipsoide y expresando la atracción de un cuerpo sobre una partícula en función de  $V$  —posteriormente conocida como función potencial— Laplace llegó a la ecuación para dicha función. De este modo, en sus investigaciones sobre atracción, partiendo de la ecuación para una superficie de segundo orden

(esferoide) donde el origen de coordenadas está en el centro del mismo, comenzó a considerar la suma de las acciones de los elementos que el cuerpo atrayente ejerce sobre un punto externo. Al considerar los diferenciales de masa del cuerpo la suma es una integral, de manera que Laplace determina que

$$V = \int \frac{dM}{(a-x')^2 + (b-y')^2 + (c-z')^2}$$

(4.2)

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son las coordenadas del punto externo sobre el que se ejerce la acción y  $x'$ ,  $y'$  y  $z'$  las coordenadas de una partícula del sólido bajo consideración cuya masa es  $dM$ . A continuación, para poder hallar soluciones numéricas de esta ecuación, Laplace formuló la expresión 4.2 en coordenadas polares<sup>444</sup>, de modo que pudo extender la expresión resultante dando lugar a una serie infinita de la que se podía obtener resultados por aproximación.

Después del tratado de la obra de 1784, Laplace leyó en *l'Academie*, en Agosto de ese mismo año, un borrador de una memoria titulada "*Sur l'équilibre des fluides sphéroïdes*", que sería la base de la memoria "*Théorie des attractions des sphéroïdes et de la figure des planètes*"<sup>445</sup>. Esta última contiene la formulación básica, en

---

<sup>444</sup> Las coordenadas polares son las que determinan los puntos de un plano en función de una distancia y un ángulo.

<sup>445</sup> Laplace, "*Théorie Des Attractions Des Sphéroïdes Et De La Figure Des Planètes*".

términos de ecuaciones derivadas parciales, de la teoría de la atracción de los esferoides. La primera parte de esta memoria contiene un desarrollo más directo de los resultados de la segunda parte de la memoria de 1784. Lo más importante de esta obra, como señala Gillispie<sup>446</sup>, biógrafo de Laplace, es que supuso un avance en el estudio del concepto de potencial. De hecho, en la introducción, Laplace indica que en la segunda sección va a tratar de la atracción entre esferoides mediante una ecuación que depende de derivadas parciales de segundo orden de la función  $V$ , ecuación que Laplace califica como la base de la investigación de la figura de los planetas y de la que se puede derivar toda la teoría de la atracción de los esferoides<sup>447</sup>. Esta ecuación es una nueva expresión de las derivadas de  $V$  en coordenadas polares tomando el origen de coordenadas en un punto interior del esferoide. Haciendo uso de esta ecuación, en la tercera sección Laplace incluso fue capaz de dar la solución al problema de la atracción suponiendo que los esferoides tienen densidad heterogénea cuando hasta entonces sólo se había logrado para esferoides con densidad homogénea. Finalmente, en la sección de esta memoria dedicada a la figura de la Tierra, Laplace pudo determinar cuál es la figura de la Tierra sometida a la ley de la gravedad mediante el

---

<sup>446</sup> Gillispie, *Laplace*, pp. 113-14.

<sup>447</sup> Laplace, "Théorie Des Attractions Des Sphéroïdes Et De La Figure Des Planètes", p. 342.



análisis de la función  $V$  llegando a la solución, antes señalada, de que es un elipsoide achatado por los polos.

El otro problema con el que se relaciona la función potencial, como se ha señalado a comienzo de este subepígrafe, es el de los anillos de Saturno. En 1789 Laplace redactó una memoria en el que trata precisamente este tema: "*Mémoire Sur La Théorie De L'anneau De Saturne*"<sup>448</sup>. En esta obra obtiene la forma de los anillos de Saturno en el contexto del problema de la atracción de un punto externo sobre un esferoide. En este caso, al contrario que en el problema anterior, Laplace considera la atracción del esferoide en un punto "del" esferoide, para lo que esta vez hizo del punto externo, no del interno, el origen de las coordenadas. De este modo llegó al teorema de que los elipsoides confocales atraen un punto externo con una fuerza proporcional a sus masas, teorema que, a su vez, resuelve el problema matemático de la determinación de la atracción de un elipsoide sobre un punto exterior, ya que se puede solucionar el problema sustituyendo el elipsoide original por otro confocal que contenga en su superficie el punto atraído, puesto que el resultado de la integración para determinar la atracción es más precisa cuando un punto se encuentra en la superficie de la figura. Otra característica a señalar de esta obra es que en la Sección 2 de esta memoria aparece por primera vez la ecuación de Laplace en

---

<sup>448</sup> P.S. Laplace, "Mémoire Sur La Théorie De L'anneau De Saturne" in *Oeuvres Complètes De Laplace*, ed. L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels (Paris: Gauthier-Villars, 1789).

términos de coordenadas rectangulares, dando lugar, de este modo, a la ecuación conocida posteriormente como la ecuación de Laplace para la función potencial:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

(4.3)

El mismo Laplace señala que es la misma ecuación que ha presentado en su memoria sobre la atracción de los esferoides y sobre la figura de los planetas. Posteriormente la ecuación 4.3 fue reproducida en el Capítulo 6 del Libro 3 del ya mencionado *Traité de Mécanique Céleste*. No sólo eso, sino que Laplace incluyó en este libro, casi sin alteraciones, y simplificando los desarrollos matemáticos, su teoría de la atracción de los esferoides.

La importancia de la influencia de la teoría de Laplace se observa en que dos de las principales ecuaciones fundamentales de la teoría del calor de Fourier, a saber

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = K \frac{\partial V}{\partial t}$$

(4.4)

que es la ecuación que expresa la difusión del calor en el interior de la tierra –en donde K es el coeficiente de transferencia del calor–, y

$$-K \frac{\partial V}{\partial r} = -K \frac{\Delta V}{L}$$

(4.5)

que expresa la transmisión del calor en una superficie –en donde  $L$  el grosor de la superficie–, hacen uso de la función  $V$ , en este caso como función que representa el calor en cada punto<sup>449</sup>. Es decir, las ecuaciones de la transmisión del calor de Fourier son modificaciones de la ecuación de Laplace de la acción de una molécula de un esferoide sobre un punto exterior en coordenadas rectangulares.

El problema de los valores frontera hace su aparición en los estudios electromagnéticos de la mano de Coulomb. En su artículo de 1788 "*Sur la distribution du fluide électrique entre plusieurs conducteurs. Détermination de la densité électrique dans les différents points de la surface de ces corps*"<sup>450</sup> enuncia el descubrimiento de que hay una variación súbita de la fuerza eléctrica si se pasa a considerar la fuerza desde un punto de su misma superficie a un punto exterior infinitamente próximo. Esta afirmación es la que abre el camino a las investigaciones sobre los problemas de regiones fronteras en electrostática.

Por su parte Poisson, en su memoria de 1811 "*Sur La Distribution De L'électricité À La Surface Des Corps Conducteurs*"<sup>451</sup>

---

<sup>449</sup> Acerca de las ecuaciones de Fourier cfr. Ivor Grattan-Guinness, *Joseph Fourier, 1768-1830* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1975), pp. 108-30.

<sup>450</sup> Coulomb, *Collection De Mémoires Relatifs À La Physique*, pp. 230-73. Cfr. también "*Sur la distribution à la surface de deux sphères conductrices électrisées, et l'attraction de ces sphères, d'après Poisson et Sir W. Thomson*", en Coulomb, *Collection De Mémoires Relatifs À La Physique*, pp. 379-414.

<sup>451</sup> Siméon Denis Poisson, "Mémoire Sur La Distribution De L'électricité À La Surface Des Corps Conducteurs" *Mémoires* 12 (1811).

buscaba, partiendo de la ley de Coulomb y adoptando el análisis de Laplace para la atracción de los esferoides, determinar analíticamente y no sólo observacionalmente, como había hecho Coulomb, la distribución eléctrica en la superficie de un conductor y, posteriormente, ver si esta determinación estaba de acuerdo con las observaciones de Coulomb. Poisson señaló que para resolver dicho problema había que determinar el grosor de la capa de fluido eléctrico<sup>452</sup> que se forma cuando en un cuerpo hay más cantidad de un fluido eléctrico que de otro y el exceso de fluido eléctrico se distribuye sobre la superficie del cuerpo formando una capa, siendo la distribución tal que la acción en el interior del cuerpo fuera nula. Concretamente, Poisson llegó a determinarlo para los casos de un esferoide y un elipsoide. Finalmente, como Coulomb, Poisson estableció que la acción de un conductor sobre un punto infinitamente próximo a una superficie es el doble que la de un elemento de la superficie próximo a dicho punto.

Por tanto, Laplace y Poisson hicieron uso de la idea de una función  $V$  de la posición<sup>453</sup>, cuyas derivadas con respecto a las coordenadas daban los componentes de la fuerza en ese punto.

---

<sup>452</sup> Como se ha señalado ya Poisson es defensor de la teoría de los dos fluidos eléctricos cada uno cargado de forma diferente, uno positivamente y otro negativamente.

<sup>453</sup> Poisson señaló que la ecuación 2.2 era errónea en algunos casos, subrayando que dicha ecuación sólo se cumplía en el caso de que el punto estuviera en el exterior o dentro de alguna cavidad del cuerpo, pero que en la superficie la ecuación no se iguala a 0 sino a  $-4\pi\rho$ .

Concretamente en el caso de Laplace, las derivadas daban lugar a la fuerza gravitatoria mientras que en el caso de Poisson a la fuerza electrostática.

La ampliación de las investigaciones de Poisson la realizó Green, quien hizo uso de las herramientas matemáticas introducidas por Laplace y de otras desarrolladas por él mismo para resolver problemas electrostáticos en casos de regiones frontera. Entre otras cosas Green se dedicó calcular cómo la ley del inverso de cuadrado de la distancia determinaba la distribución de carga en las superficies de un conductor. Green era consciente de la importancia de la función  $V$  para solucionar los problemas de electrostática, principalmente el problema de determinar la distribución de carga sobre una superficie cualquiera, ya que con ellas Poisson ya había obtenido soluciones para la distribución de cargas sobre conductores con geometría simple. Pero Green desarrolló unas técnicas matemáticas más potentes mediante una serie de teoremas y una herramienta matemática de gran importancia que son las funciones de Green.

Green, quien era un panadero y molinero de Nottingham sin estudios más allá de los 9 años<sup>454</sup>, había obtenido información sobre los matemáticos franceses – a partir de cuyas matemáticas él desarrolló sus investigaciones – a través de John Toplis, graduado

---

<sup>454</sup> Sobre la biografía de Green cfr. Lawrie Challis and Fred Sheard, "The Green of Green Functions" *Physics Today* December (2003).

---

en Cambridge<sup>455</sup>. Toplis no estaba satisfecho con las matemáticas que le habían enseñado en Cambridge y, por este motivo, se dedicó a aprender las matemáticas que se estaban desarrollando en Francia. Así, entre otras aportaciones, tradujo el primer volumen del *Traité de Mécanique Céleste* de Laplace al inglés. En 1823 Green se suscribió a la *Nottingham Subscription Library* que estaba situada en la *Bromley House* gracias a lo cual tuvo acceso a trabajos de los científicos de la época, como la recién mencionada traducción de Toplis o los *Philosophical Transactions*<sup>456</sup>.

En 1828, basándose en los desarrollos matemáticos franceses y haciendo uso de la función  $V$ , Green publicó su obra más importante "*An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism*"<sup>457</sup>. En este ensayo trata de encontrar una relación general entre la función  $V$  y las cantidades de electricidad en los cuerpos que la producen<sup>458</sup>. En palabras de Green, el objeto del ensayo es

---

<sup>455</sup> Véase Ivor Grattan-Guinness, "Why Did George Green Write His Essay of 1828 on Electricity and Magnetism?" *The American Mathematical Monthly* 102, no. 5 (1995): pp. 392-92.

<sup>456</sup> Para un estudio completo de la influencia sobre Green de la Biblioteca de Nottingham véase D.M. Cannell, *George Green: Mathematician and Physicist 1793-1841: The Background to His Life and Work* (London: Athlone Press, 1993).

<sup>457</sup> Este es el ensayo en el aparece por primera vez el término 'potencial' refiriéndose a la función de cuyos diferenciales dependen las fuerzas Cfr. George Green, "An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism" in *Mathematical Papers of the Late George Green*, ed. N.M. Ferrers (1828), p. 6.

<sup>458</sup> Cfr. *Ibid.*, pp. 6-7.

*“to submit to Mathematical Analysis the phenomena of the equilibrium of the Electric and Magnetic Fluids, and to lay down some general principles equally applicable to perfect and imperfect conductors”<sup>459</sup>.*

El método que se expone en el ensayo Green lo califica de “*remarkable*” por su simplicidad y su generalidad. Comienza estableciendo un principio general para ser capaz de determinar la ley de la distribución de electricidad en una superficie cerrada cuando ésta está sometida a la influencia de fuerzas eléctricas porque consideraba que no había ningún método disponible para determinar dicha ley que no requiriera de especificaciones para cada caso particular. En este contexto Green define del siguiente modo la función  $V$

*“If  $p$  be a particle of positive electricity under the influence of forces arising from any electrified body, the function in question, as is well known, will be obtained by dividing the quantity of electricity in each element of the body, by its distance from the particle  $p$ , and taking the total sum of these quotients for the whole body, the quantities of electricity in those elements which are negatively electrified, being regarded as negative”<sup>460</sup>.*

Posteriormente se encuentra la derivación del teorema de Green, en el que Green refiere las propiedades de funciones matemáticas, que después serán conocidas como funciones de Green, que determinan la relación entre la densidad de un fluido eléctrico en la superficie de un cuerpo y las funciones potenciales

---

<sup>459</sup> Ibid., p. 9.

<sup>460</sup> Ibid.

que surgen tanto fuera como dentro de la superficie<sup>461</sup>. La metodología que sigue es considerar las relaciones existentes entre la densidad de la electricidad en un sistema y la función potencial que se considera a partir de dicho sistema como la propiedad de que la función potencial es constante en una superficie siempre que la cantidad de electricidad sea constante, siendo  $\rho d\sigma$  la cantidad de electricidad en un elemento  $d\sigma$  de la superficie y  $V$  el valor de la función potencial para un punto  $p$  en dicha superficie<sup>462</sup>. La función de Green es la función  $G(r, r')$ , a saber, la función que determina el potencial en un punto  $r$  producido por una unidad de carga en un punto  $r'$  en el caso en el que hay regiones frontera. Así en notación moderna dicho potencial es

$$\phi(\vec{r}) = \int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \rho(\vec{r}') d\tau' + \int_S \left[ \phi(\vec{r}')' G(\vec{r}, \vec{r}') - G(\vec{r}, \vec{r}')' \phi(\vec{r}') \right] d\vec{S}' \quad (4.6.)$$

donde ' significa la derivada de la función correspondiente en la dirección de la normal a la superficie en la dirección hacia fuera del volumen. Esto quiere decir que el potencial es la superposición de los efectos de las cargas espaciales debidas a la carga con densidad  $\rho(\mathbf{r}')$  en el volumen  $V$  y a las cargas inducidas en la frontera para

<sup>461</sup> Cfr. *Ibid.*, pp. 23-27. Para un estudio de las ecuaciones de Green cfr. Cannell, *George Green: Mathematician and Physicist 1793-1841: The Background to His Life and Work*, pp. 171-76.

<sup>462</sup> Green, "An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism", p. 36.



esa distribución de carga, transmitiéndose la influencia de las cuales a través de la distribución de Green. Además, de este función es importante destacar que satisface la ecuación 4.2 (ecuación de Laplace) y tiene un valor finito en la superficie del conductor de  $1/r$ , siendo  $r$  el vector posición del punto dentro de la superficie, el cual es igual a 0 en la superficie<sup>463</sup>. Es decir, físicamente es el potencial inducido en una región limitada por una superficie conductora.

En Alemania la teoría del potencial cobró presencia gracias a que Gauß quien trató el problema de la atracción de los esferoides en su memoria "*Theoria attractionis corporum sphaeroidicorum ellipticorum homogeneorum methodus nova tractata*"<sup>464</sup> de 1822, en la que Gauß lleva a cabo lo que él considera una demostración de la solución del problema de la atracción de los esferoides de un modo más directo que el que había llevado a cabo Laplace<sup>465</sup>.

Gauß consideraba que en la naturaleza se presentan muchos fenómenos que se explican mediante la asunción de fuerzas que las partículas últimas de las sustancias ejercen unas sobre otras, actuando en proporción inversa al cuadrado de las distancias que

---

<sup>463</sup> Cfr. también Ibid., 12, 20-22.

<sup>464</sup> Carl Friederich Gauss, *Theoria Attractionis Corporum Sphaeroidicorum Ellipticorum Homogeneorum Methodo Nova Tractata* (Gottingen: 1822).

<sup>465</sup> Para un breve desarrollo de dicha demostración ver Isaac Todhunter, *A History of the Mathematical Theories of Attraction and the Figure of the Earth: From the Time of Newton to Laplace*, 2 vols., vol. 2 (London: Macmillan, 1873), pp. 235-41.

---

las separan. Señala además, que la primera fuerza de la que se supo que actuaba de esta manera es la de la gravedad, aunque la presenta como una fuerza que actúa, no entre masas como Newton, sino entre lo que él llama moléculas  $\mu$ , de manera que la fuerza lo que produce es una aproximación entre las moléculas. Para Gauß en el caso de la gravitación  $\mu$  es un elemento de masa, en el del magnetismo es un elemento de fluido magnético y lo mismo para el caso de los fluidos eléctricos. No obstante, en sus obras generalizó para todos los casos el término 'masa' considerando que esta solo hace referencia a la fuente de la que se imagina que proceden las fuerzas atractivas o repulsivas<sup>466</sup>. Para explicar los fenómenos magnéticos Gauß considera que si se asumen dos fluidos magnéticos y dos elementos magnéticos  $\mu$  y  $\mu'$  estos elementos ejercerán una fuerza también inversa al cuadrado de las distancia, atractiva si los elementos son de fluidos opuestos y repulsiva si son de los mismos fluidos.

Las principales aportaciones de Gauß en relación a la teoría del potencial se realizaron al hilo de las investigaciones sobre la atracción aplicada al magnetismo terrestre. Estas investigaciones fueron iniciadas por el astrónomo Alexander von Humboldt (1769-1859) y no fue hasta 1831 cuando Gauß comenzó a interesarse

---

<sup>466</sup> Cfr. C.F. Gauss, "General Propositions Relating to Attractive and Repulsive Forces Acting in the Inverse Ration of the Square of the Distance" *Scientific Memoirs Selected from the Transactions of Foreign Academies* 3, no. Part X (1843): p. 155.

también por dichos problemas. Gauß quería, en primer lugar dar una fundamentación teórica de las observaciones y los instrumentos en este campo. Por este motivo, el primer paso de Gauß para desarrollar una teoría matemática de los fenómenos del magnetismo terrestre fue dar con un principio físico que guiara la investigación. Por este motivo se ocupó, en primer lugar, de cuál es la distribución magnética de un cuerpo. Anteriormente el astrónomo y físico Jean Baptiste Biot (1744-1862) había considerado que incluso la parte más pequeña de un cuerpo magnético tenía una cantidad igual de "fluido norte" y "fluido sur", a saber, de los dos fluidos magnéticos. En cambio Gauß consideraba que en los polos había una clara desigualdad entre los fluidos y volvió su pensamiento hacia la teoría eléctrica de Poisson contenida en su "*Mémoire sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs*"<sup>467</sup> y, finalmente, llegó a determinar el principio que establece que una distribución de magnetismo en la superficie de un cuerpo que actúa en el exterior del cuerpo puede sustituir a otra distribución de magnetismo en la superficie de un cuerpo que actúa en el interior del cuerpo con las mismas fuerzas. Es más, en su camino para tratar el magnetismo terrestre, Gauß puede eliminar todas las anteriores asunciones físicas, como la de los fluidos magnéticos, gracias a la función potencial que introdujo en

---

<sup>467</sup> Poisson, "Mémoire Sur La Distribution De L'électricité À La Surface Des Corps Conducteurs".

su artículo "*Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*"<sup>468</sup>. Para ello dividió la tierra en elementos de volumen infinitesimales, cada uno conteniendo una cantidad infinitesimal de materia  $d\mu$ , de manera que la función potencial total resulta ser  $V = \int d\mu / \rho$ . De este modo, el estudio de esta función en este contexto proporcionó un método matemático tan general como para que fuera posible aplicarlo luego a más dominios que el del magnetismo terrestre<sup>469</sup>.

Aunque Gauß había trabajado con la función potencial en las obras recién señaladas, el estudio fundamental de las propiedades de esta función se encuentra en su estudio de 1840 "*Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die in verkehrten Verhältnisse des Quadrats des Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungs-kräfte*"<sup>470</sup> en el que ilustró la importancia física y matemática de dicha función. Gauß llama a la función  $V$  'potencial de las masas' entendiendo como masas lo que se ha señalado anteriormente.  $V$  es una función de  $x, y, z$ , las coordenadas rectangulares de un punto del espacio en el caso de que se considere  $V$  la suma de todas las partículas activas de masa, divididas respectivamente por las distancias a

---

<sup>468</sup> Carl Friederich Gauss, "Allgemeine Theorie Des Erdmagnetismus" in *Resultate Aus Den Beobachtungen Des Magnetischen Vereins Im Jahre 1838*, ed. Carl Friederich Gauss (Leipzig: 1838).

<sup>469</sup> Cfr. Christa Jungnickel and Russell McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature. Theoretical Physics from Ohm to Einstein: The Torch of Mathematics 1800-1870*, vol. 1 (Chicago: University of Chicago Press, 1986), pp. 66-69.

<sup>470</sup> Carl Friederich Gauss, *Allgemeine Lehrsätze in Beziehung Auf Die in Verkehrten Verhältnisse Des Quadrats Des Entfernung Wirkenden Anziehungs- Und Abstossungs-Kräfte* (Leipzig: 1840).

dicho punto: de esta manera la derivada de dicha función representa las componentes de la fuerza resultante. Por tanto, tanto el potencial como su derivada deben tener un valor asignable en cada punto del espacio, siendo la suma de las derivadas parciales igual a 0, como señaló Laplace.

Es importante señalar que Gauß subraya que su propuesta es sólo aplicable a las fuerzas centrales, es decir, que la función potencial determina los componentes de las fuerzas en los casos de las fuerzas de gravitación, electrostática y magnetostática. De hecho, aunque a comienzos del artículo menciona su intención de tratar el problema de la extensión de esta función a fuerzas electromagnéticas que no dependen de las distancias entre las moléculas en línea recta, esto no fue acometido hasta que lo hizo Neumann.

Entre los logros de dicho artículo se encuentra (a) la enunciación de diversos teoremas —como que las funciones potenciales son continuas— que luego servirán para posteriores desarrollos, que las superficies pueden ser descritas por funciones continuas, o que las ecuaciones diferenciales tienen soluciones. A su vez Gauß probó que el potencial en el interior de una masa que ejerce una fuerza satisface la ecuación de Poisson  $\nabla^2 V = 4 \pi \rho$ .

### **4.3.2 La electrodinámica**

El problema del atomismo y la acción a distancia eran problemas gemelos para los científicos alemanes de comienzos del

---

XIX, que tras el anti-atomismo de la *Naturphilosophie* comenzaron a debatir la validez de los átomos. Una característica de la ciencia alemana de esa época es su oposición sistemática a los modelos del continuo y también a la mecánica cinética (impacto de materia con materia). Según Molella lo átomos puntuales y las fuerzas centradas en ellos era la base física de la electrodinámica y su respaldo filosófico<sup>471</sup>.

En las manos de los teóricos alemanes los átomos eléctricos dieron lugar a una teoría abstracta expuesta en el artículo de Weber de 1848 "*Elektrodynamische Maassbestimmungen*"<sup>472</sup>. La primera parte de este artículo determina experimentalmente la corrección de la ley de Ampère. La segunda parte construye una ley con una aplicación más general que la de Ampère, siendo que la diferencia entre ambas leyes reside en que la de Ampère concierne a la acción de corrientes en alambres ponderables mientras que la de Weber concierne a la acción de masas eléctricas imponderables en el interior de los alambres. Como Fechner, Weber asumía que las corrientes eran masas eléctricas en movimiento: cada elemento de corriente contiene un número igual

---

<sup>471</sup> Arthur Philip Molella, "Philosophy and Nineteenth-Century German Electrodynamics: The Problem of Atomic Action at a Distance" (Ph.D., Cornell University, 1972), p. 11.

<sup>472</sup> Wilhelm Weber, "Elektrodynamische Maassbestimmungen Insbesondere Uber Die Energie Der Wechselwirkung" *Abhandlungen der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften* 11 (1878), Wilhelm Weber, "Elektrodynamische Maassbestimmungen" *Annalen der Physik und Chemie* 73 (1848).

de masas eléctricas positivas y negativas moviéndose con la misma velocidad pero en direcciones opuestas del alambre, y la medida de la corriente es el número de masas eléctricas pasando a través de un corte transversal de un alambre por unidad de tiempo.

La afirmación cuantitativa de la asunción de Weber es que la corriente es igual a una constante, a saber, la masa de la electricidad positiva por unidad de longitud de un conductor y a su velocidad a lo largo del conductor. Si se substituye esta definición de corriente separadamente para cada una de las clases de electricidad en la ley de Ampère, y después de manipular las fórmulas, Weber deriva la fuerza mutua entre un par de masas eléctricas en movimiento. Al combinar esta nueva fuerza con el principio fundamental de Coulomb de la electrostática Weber llega a un principio fundamental general para toda la teoría eléctrica.

En la ecuación que representa este principio, la acción electrostática es el caso límite de la acción electrodinámica cuando la velocidad relativa y la aceleración relativa de las masas eléctricas se desvanece. La acción expresada por la ley de Weber es instantánea y se dirige a lo largo de la línea conectando las masas eléctricas, pero no sólo depende de la separación de las masas eléctricas, como en el caso de la gravitación, sino también de su movimiento relativo.

Para Weber el hecho de que su ley fuera distinta a la de la gravitación no era un problema, puesto que para él una ley física fundamental es aquella que da la ley de la dependencia de las

fuerzas a partir de relaciones físicas dadas y no se supone que deben de dar explicaciones de las fuerzas en lo que refiere a sus verdaderas causas, sino sólo dar un método general útil para la determinación cuantitativa de las fuerzas por medio de medidas fundamentales establecidas en física para el espacio y el tiempo. Y por tanto no se puede objetar que una fuerza sea representada por una función del tiempo a demás de una función de la distancia. Es más, Weber esperaba que se encontrara dicha dependencia del movimiento en otras fuerzas. Para él esta dependenci introducía un nuevo concepto de fuerza, concepto que adquiriría una medida de realidad física<sup>473</sup>. Además, Weber considera que no sólo hay que investigar las leyes del movimiento de los cuerpos sino también las leyes de interacción, porque sin interacción los cuerpos permanecerían en su estado de reposo o movimiento para siempre. Dice que los cuerpos ejercen acciones mutuas tanto por contacto como a distancia y que hay que investigar estas últimas las primeras. Como al investigar las teorías de la electricidad y el magnetismo Ampère enunció la ley fundamental de la interacción de dos elementos de corriente, hay que reducir las interacciones del resto de los cuerpos a la mutua acción de pares de cuerpos<sup>474</sup>.

---

<sup>473</sup> Molella, "Philosophy and Nineteenth-Century German Electrodynamics: The Problem of Atomic Action at a Distance", p. 3.

<sup>474</sup> Weber, "Elektrodynamische Maassbestimmungen Insbesondere Uber Die Energie Der Wechselwirkung": p. 645.



Weber, consciente de otros desarrollos del electromagnetismo, debate que la forma de su ley de la fuerza electrodinámica fuera debida a la dependencia de la propagación de la fuerza en un medio interpuesto y compara este medio eléctrico con el éter luminífero, haciendo notar la relación descubierta por Faraday de la influencia de la electricidad en la luz. Pero, aunque fuera favorable a la existencia física de un éter, en la práctica se contentó con derivar su fórmula fundamental a partir de la simple asunción de una acción a distancia entre partículas de corriente. Weber usaba una representación atómica de la corriente porque era un modelo analizable matemáticamente que permitía que la acción electrodinámica a distancia fuera calculada.

Fechner, según Caneva, parece ser una excepción al uso hipotético de los modelos, ya que parece ser que él creía en la atomicidad fundamental de todos los fenómenos físicos. En su artículo "*Ueber die physikalische und philosophische Atomenlehre*"<sup>475</sup> dedica la primera mitad a la fundamentación física del atomismo y la segunda a las posibilidades físicas que permitía. En relación con la ciencia, el atomismo era una hipótesis para Fechner aunque muy probable, que tenía que ser juzgada en base a su éxito en dar cuenta de los fenómenos individuales y de proveer una idea

---

<sup>475</sup> Gustav Theodor Fechner, *Ueber Die Physikalische Und Philosophische Atomenlehre* (Leipzig: Hermann Mendelssohn, 1855; reprint, Para la segunda edición cfr. Fechner 1864. La conversión de Mach al anti atomismo tuvo lugar entre la primera y la segunda edición).

unificada de sus interconexiones. Fechner consideraba que lo que la ciencia necesitaba eran asunciones que llevaran a hechos confirmados experimentalmente y sostenía que como las ciencias matemáticas y mecánicas no podían descubrir las propiedades de los átomos, el modo de proceder era probar las relaciones hipotéticas entre los átomos confrontándolas con la experiencia en base al cálculo de sus consecuencias.

Según Buchwald, Weber desarrolló en 1840 una forma de electrodinámica basada en las hipótesis físicas sobre la corriente eléctrica de Fechner. Los cuatro principios básicos de esta son: la carga consiste en dos grupos o clases de partículas eléctricas; la corriente eléctrica es el flujo igual y opuesto de estas partículas; las partículas ejercen fuerzas unas sobre otras que dependen de sus distancias y de la primera y segunda derivada de las distancias; la corriente en un circuito es proporcional a la fuerza neta que conduce las partículas eléctricas. Estos principios se basan directamente en la estructura física de la corriente<sup>476</sup>. De acuerdo con Buchwald desde un punto de vista metafísico, las fuerzas de Weber reflejaban el carácter irreducible e inmediato de interacciones bipartitas entre átomos. En este sentido, la fuerza

---

<sup>476</sup> Jed Z. Buchwald, *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves* (Chicago: University of Chicago Press, 1994), p. 8.

sería un símbolo físico de su interconexión: las cosas interactúan en pares<sup>477</sup>.

La teoría de Weber se diferencia de las dos otras grandes teorías de su época: las construidas en el contexto de la acción a distancia y las construidas en el contexto de la teoría de campos. Las teorías de Ampère y Gauss estaban construidas dentro del contexto de la física de la acción a distancia, es decir, en la formulación de la interacción electrodinámica elemental descuidaban la influencia del medio entre los elementos de corriente y el papel del tiempo en la propagación de la acción electrodinámica. Ese fue también el caso de Weber. No obstante, como Ampère y Gauss, Weber se esforzó por concebir la propagación de la acción electrodinámica. Si Ampère había propuesto una imagen mecanicista en la que la propagación de la acción electrodinámica era la estimulación consecutiva de capas del fluido eléctrico, Gauss planteó en una carta a Weber en 1845 la posibilidad de que la propagación fuera en el tiempo, a lo que Weber contestó que probablemente fuera la mejor solución. En 1846 Weber concibió un medio entre cargas en movimiento que podría probarse como esencial para la teoría de la interacción electrodinámica.

---

<sup>477</sup> Ibid., pág. 396. Véase también M. Norton Wise, "Atomism and Wilhelm Weber's Concept of Force" in *Atomvorstellungen Im 19. Jahrhundert*, ed. Charlotte Schönbeck (Paderborn: Ferdinand Schöningh, 1982), p. 60.

En el caso de las teorías de campos, una partícula altera directamente en el espacio que la rodea, alteración que se transmite continua y sucesivamente a regiones más remotas. Otra partícula es afectada cuando la alteración llega a su entorno. La expresión matemática es en función de ecuaciones con derivadas parciales que expresan el potencial en cada punto del espacio. Las teorías de la acción a distancia deudoras de Newton son aquellas en las que las fuerzas actúan a distancia instantáneamente y en las que las fuerzas entre las partículas son centrales, es decir, a lo largo de la línea que une las partículas. No obstante, para Weber, la expresión matemática de una fuerza como actuando a distancia está separada de la causa de la fuerza.

#### 4.4. LA TEORÍA DE CAMPOS

La concepción de las fuerzas como 'campos' es una concepción que se opone a la de las fuerzas actuando a distancia. Después de analizar todas las interpretaciones que han dado de este concepto los estudiosos de la obra de Faraday<sup>478</sup>, científico que acuñó el término, y los de la obra de los físicos que posteriormente hicieron uso de ella, Nersessian señala que el rasgo que todas tienen en común es considerar que esta concepción "*was distinguished by the idea of continuous transmission of action through an intervening*

---

<sup>478</sup> Cfr. Nancy J. Nersessian, "Faraday's Field Concept" in *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*, ed. David Gooding and F.A.J.L. James (Basingstoke: MacMillan Press, 1985).

*medium*"<sup>479</sup>. Esta concepción se diferencia de la ya señalada concepción que Hesse ofrece en *Forces and Fields*<sup>480</sup>, que sostiene una variante matemática de este concepto en el que la idea de 'campo' está ligada a una descripción de los puntos de una región del espacio en términos de unas funciones.

Como se indicó al comienzo de este capítulo la concepción de Hesse es la concepción del 'campo' de la física matemática actual. Pero esta concepción no mantiene todas las connotaciones que el término 'campo' tuvo en su origen. Sobre todo, carece de las connotaciones que hacen referencia a un modo de transmisión de la acción que se ofrece como alternativa a las acciones a distancia de las fuerzas centrales.

El origen del término campo (*field*) se encuentra en las investigaciones de Faraday acerca del electromagnetismo. Faraday introdujo el término 'campo'<sup>481</sup>, concretamente, '*Magnetic Field*', en

---

<sup>479</sup> Ibid., p. 177. Nersessian señala que las diferencias entre unas interpretaciones y otras radica en cómo estas determinen qué es un proceso de transmisión y cómo determinen la naturaleza del medio. Gooding considera que para Faraday el concepto de campo era descriptivo, operacional y físico y denotaba la región cerca de un polo magnético. Según Gooding Faraday caracterizaba el campo por la fuerza en cada uno de sus puntos, cfr. David Gooding, "Faraday, Thomson and the Concept of the Magnetic Field" *British Journal for the History of Science* 13 (1980): p. 111.pág. 111; Por su parte Williams sitúa el origen de la noción de campo en los desarrollos del descubrimiento de la inducción electromagnética, cfr. L. Pearce Williams, *Michael Faraday: A Biography* (London: 1965), pp. 204-05.

<sup>480</sup> Cfr. Texto citado en p. 236 de este estudio.

<sup>481</sup> Acerca de cómo la noción de 'campo' estaba presente de modo implícito en las primeras investigaciones de Faraday cfr. Elspeth Crawford, "The

---

1845<sup>482</sup> al describir la región de acción magnética entre dos polos; pero no fue hasta 1859<sup>483</sup> cuando Faraday introdujo dicho término como un nuevo concepto teórico, a saber, "*Any portion of space transversed by lines of magnetic power, may be taken as such a field [magnetic field]*". Esta definición, como puede observarse, establece que el 'campo' es una noción vinculada a la noción de 'líneas de fuerza', en este caso las "*lines of magnetic power*". El origen de esta última noción, 'líneas de fuerza' está en el conjunto de las investigaciones de Faraday sobre los fenómenos electromagnéticos, investigaciones que determinan la caracterización del campo que Nersessian sostiene frente a la de Hesse. Por tanto, conviene subrayar el contexto de surgimiento de este concepto, que no es otro que la respuesta que de Faraday a la propuesta de Ørsted.

#### 4.4.1. Primeras investigaciones de Faraday

Al contrario que en el continente, antes de la llegada de las noticias del descubrimiento de Ørsted en octubre de 1820, los principales científicos ingleses no habían acometido estudios

---

Concepts of 'Particle' and 'Field in Michael Faraday's Work, 1831-1845" (Tesis Doctoral, University of London, Chelsea Campus, 1985), p. 169.

<sup>482</sup> Michael Faraday, *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*, ed. Thomas Martin, vol. IV. 12 de noviembre de 1839 - 26 de junio de 1847 (London: G. Bell & Sons, 1933), p. 333, par. 8108, 10 de noviembre de 1845.

<sup>483</sup> Michael Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3 (New York: Dover Publications, 1965), p. 203, par. 2806.

importantes sobre electromagnetismo. Uno de los primeros experimentos de los que hay constancia en relación con el descubrimiento de Ørsted en Inglaterra es el experimento realizado por Wollaston en la *Royal Institution* en marzo de 1821. En dicho experimento Wollaston trataba de descubrir si se podía lograr que un alambre electromagnético rotara sobre su propio eje. También Faraday, quien pronto dedicaría el resto de su vida a la investigación de los fenómenos electromagnéticos, por ese entonces, mayo de 1821, estaba realizando sus propios experimentos para tratar de observar los efectos de un imán permanente sobre un arco eléctrico<sup>484</sup>, es decir, realizaba investigaciones que tenían como fin comprender la naturaleza del descubrimiento reciente de Ørsted de que las corrientes eléctricas producen efectos magnéticos. Al realizar dicho experimento Faraday no tenía intención de comenzar un estudio sistemático de los fenómenos electromagnéticos. Tal estudio sistemático tuvo lugar a raíz de que, a comienzos del verano de 1821, el editor de los *Annals of Philosophy*, Richard Phillips (1778-1851), propusiera a Faraday escribir un informe acerca de los avances que se habían realizado hasta entonces en la ciencia del electromagnetismo. El resultado de sus investigaciones fue publicado bajo el título

---

<sup>484</sup> Michael Faraday, *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*, ed. Thomas Martin, vol. I, septiembre de 1820 - 17 de diciembre de 1823 (London: G. Bell & sons, 1932), pp. 45-46, 21-5-1821.

---

*"Historical Sketch of Electromagnetism"*<sup>485</sup>. En esta obra, un informe publicado en tres partes: septiembre y octubre de 1821 y febrero de 1822, Faraday repitió todos los experimentos clásicos sobre electricidad y el magnetismo. No obstante, consciente de su falta de posición en el ámbito científico, Faraday no firmó dicho informe. De hecho, Faraday no llegó a reconocer la autoría<sup>486</sup> de esta serie de artículos hasta un año después cuando escribió el *"Historical Statement respecting Electro-Magnetic Rotation"*<sup>487</sup>.

En la primera y en la segunda parte de este *"Historical Sketch"* Faraday analiza los resultados experimentales logrados hasta entonces en el campo del electromagnetismo. En cambio, en la tercera parte, Faraday se centra en dar explicaciones sobre las teorías acerca de los fenómenos electromagnéticos.

En primer lugar Faraday analiza la teoría de Ørsted de quien subraya que establece como equivalentes la electricidad y el

---

<sup>485</sup> M. Faraday, "Historical Sketch of Electro-Magnetism. Parts 1 and 2." *Annals of Philosophy* 18, no. Series 2, volume 2, numbers 3 and 4. (1821). Michael Faraday, "Historical Sketch of Electromagnetism" *Annals of Philosophy* 19 (1822).

<sup>486</sup> El establecer dicha autoría era importante, puesto que algunos de los experimentos realizados para la redacción de este informe —y con anterioridad al mismo— dieron lugar al descubrimiento de las rotaciones electromagnéticas por parte de Faraday, descubrimiento que Faraday no había anunciado hasta que publicó en 1821 el artículo Michael Faraday, "On the New Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism" *Quarterly Journal of Science* 12 (1821)., autoría que se le atribuía a Wollaston, amigo Davy —el mentor de Faraday

<sup>487</sup> Michael Faraday, "Historical Statement Respecting Electro-Magnetic Rotation" *Quarterly Journal of Science* 15 (1823).



magnetismo. También destaca que la noción de “conflicto eléctrico” de Ørsted –la que se establece en un alambre conductor y se extiende al espacio adyacente actuando en círculos– actuaría solo en las partículas magnéticas de la materia, mientras que a las otras les sería impermeable<sup>488</sup>; este “conflicto eléctrico” estaría producido por dos fluidos eléctricos actuando en espiral a través del alambre, el negativo hacia la derecha y el positivo hacia la izquierda, de modo que el fluido eléctrico negativo actuaría sobre el polo norte y el positivo sobre el polo sur del imán sobre el que ejercería un poder.

En segundo lugar, de Ampère<sup>489</sup> destaca que sus opiniones teóricas son las más extensas y precisas<sup>490</sup> siendo las únicas que formarían propiamente, a su juicio, una teoría. De igual manera que en el caso de Ørsted, Faraday asume que Ampère habla de dos fluidos. También señala que, según Ampère, el material del que están constituidos los imanes son porciones de materia de un alambre conductor en el estado en que se encuentran cuando unen los extremos de una pila voltaica; sobre esto Faraday critica que Ampère no diera una explicación clara de dicho estado dado que sus descubrimientos son explicados basándose en dicha

---

<sup>488</sup> Cfr. Faraday, "Historical Sketch of Electromagnetism": p. 108.

<sup>489</sup> Faraday conoció a Ampère en su viaje a Europa entre 1813 y 1815. Cfr. Michael Faraday, "Common Place Book Vol. 2" in *UK0108 SC MSS 002/1/2* (1813-1824), pp. 213-14.

<sup>490</sup> Cfr. Faraday, "Historical Sketch of Electromagnetism": p. 111.

---

asunción<sup>491</sup>. Además Faraday reprocha la identificación de un imán con una hélice de alambre conductor que Ampère hace.

Las investigaciones de Faraday posteriores a los "*Historical Sketch*" –que llevaron, como se ha señalado, al descubrimiento de las "rotaciones electromagnéticas– continuaron en la línea de la teoría de Ørsted, teoría que sostiene que hay una fuerza que hace que una aguja imantada tienda a dar vueltas en torno a un alambre conductor de una pila voltaica, y que ese movimiento, –que es el que pasaría a conocerse como 'rotaciones electromagnéticas– era primitivo, mientras que las atracciones entre alambre y aguja eran secundarias<sup>492</sup>. Ampère, en cambio, debido a que su electrodinámica dependía del ideal laplaciano –de acuerdo con el cual los fenómenos quedaban reducidos a la acción de fuerzas elementales actuando a distancia<sup>493</sup>–, consideraba que dichas atracciones eran primitivas. Al no tener compromisos con dicho ideal, Faraday pudo optar sin problemas por proseguir la línea establecida por Ørsted.

El descubrimiento de las "rotaciones electromagnéticas" empieza a vislumbrarse en los experimentos de Faraday de 1821. En su cuaderno de notas de laboratorio, conocido como *Diary*, se registra el 3 de Septiembre de 1821 que se ha detectado que un

---

<sup>491</sup> Ibid.: p. 112.

<sup>492</sup> Cfr, Faraday, "On the New Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism": p. 76.

<sup>493</sup> Cfr. Olivier Darrigol, "The Electrodynamics of Moving Bodies from Faraday to Hertz" *Centaurus* 36 (1993): p. 250.

alambre se mueve en torno a un imán y viceversa<sup>494</sup>. Además, Faraday demostró con dichos experimentos que el polo, o “poder motriz”, de un imán no se encuentra en sus extremos, como sostenía Ampère, sino alejado de las extremidades y que, en cambio, es el “poder motriz” de una hélice el que se encuentra justo en el extremo de ésta<sup>495</sup>. De igual modo, al contrario que Ampère, Faraday sostiene que no hay atracción entre los polos de un imán y un alambre sino solo movimiento circular<sup>496</sup>. Es decir, la diferencia fundamental entre las teorías de Ampère y Faraday es que en la de Ampère fenómenos magnéticos se reducen a la interacción de corrientes eléctricas — por lo que la interacción elemental tenía lugar según una fuerza central entre elementos de corriente— y para Faraday, en cambio, el hecho básico es la rotación del alambre respecto el imán que indica que el fenómeno

---

<sup>494</sup> Faraday, *Faraday's Diary V.1*, Quarto I, 3 de septiembre de 1821. El Diario de Faraday aparece en el *Minuto Book* de la *Royal Institution* (el libro en el que se marcan las entradas de manuscritos) bajo el título de “*Various philosophical notes of experimental investigation of foolscap paper, paged in series, and partly bound in five volumes*”. Antes de fallecer Faraday llegó a encuadernar también el volumen 6. Las primeras anotaciones que Faraday realizó las hizo en libretas de cuartilla encuadernados (Quarto I y Quarto II) y posteriormente utilizó folios en formato de pliegos (*foolscap*) para ser encuadernados al finalizar.

<sup>495</sup> Faraday, "On the New Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism": p. 93.

<sup>496</sup> Cfr. Faraday, *Faraday's Diary V.1*, Quarto I, 4 de septiembre de 1821. Cfr. también Michael Faraday, "The Correspondence of Michael Faraday, (1811-1831)", ed. F.A.J.L. James (London: Institution of Electrical Engineers, 1991), Carta 148 a Gaspard de la Rive, pp. 22, 12-09-1821.

del que se está tratando se debe de un “poder” circunferencial – en clara oposición al carácter de una fuerza central.

Durante el periodo de 1825 a 1828 Faraday realizó experimentos tratando de determinar la influencia un imán sobre una corriente (es decir, la “influencia” que estaba en el origen de las “rotaciones magnéticas”), pero ninguno dio resultado. También trató de inducir una corriente en un alambre mediante otro alambre paralelo conectado a una batería<sup>497</sup>, es decir, de buscar una influencia entre corrientes, pero los experimentos con los que buscaba este efecto también resultaron infructuosos.

Durante el resto de la década de los años 20 Faraday realizó una serie de informes tanto para el gobierno como para particulares. Entre otras cosas analizó el contenido de oxígeno del aire del Antártico traído de una expedición, encontrando que se hallaba en una concentración menor en un 2% que el aire de Londres. También realizó uno de sus estudios más importantes, que llevó a cabo con Richard Phillips –químico y meteorólogo editor de los *Annals of Philosophy*– sobre un caso de polución industrial en Swansea y, en el contexto de esta investigación, comenzó a recopilar por primera vez en un cuaderno de nombre “*Chemical Notes, Hints, Suggestions and Objects of Pursuit*”, diversas notas de carácter científico que había ido tomando en hojas sueltas. Fue también en este periodo cuando Faraday fue nombrado

---

<sup>497</sup> Faraday, *Faraday's Diary V.1*, Quarto II, 28 de noviembre de 1825.

miembro de la *Royal Society* y cuando comenzó a desarrollar una continuada correspondencia con científicos del continente como Ampère, el físico suizo De la Rive o el matemático francés Jean Nicholas Hachette (1769-1834)<sup>498</sup>.

#### 4.4.2. Faraday y la inducción electromagnética

En el verano de 1831 Faraday comenzó de nuevo a investigar cuestiones relacionadas con la electricidad y mandó preparar un anillo de hierro ligero, que posteriormente sería recubierto con un alambre, para realizar nuevos experimentos eléctricos. El historiador John Whitaker<sup>499</sup> señala que, al retomar de nuevo estas investigaciones, Faraday esperaba encontrar alguna analogía entre el comportamiento de la electricidad en movimiento —las corrientes— y el comportamiento de la electricidad en reposo —la electricidad estática. De la electricidad estática se sabía que poseía el poder de lo que se llamaba “inducir”, es decir, causar un estado eléctrico opuesto en los cuerpos alrededor del conductor. Ese efecto era el que Faraday trataba de detectar en el caso de las

---

<sup>498</sup> La correspondencia científica de Faraday es una de las principales fuentes de conocimiento de su obra y pensamiento. La edición completa en 6 volúmenes de las 4900 cartas ha sido llevada a cabo por Frank A.J.L. James a lo largo de un periodo de 20 años (1991-2011), como proyecto de la *Royal Institution*. Este proyecto puede encontrarse en el sitio web oficial “Michael Faraday’s Correspondence” <http://www.rigb.org/our-history/michael-faraday/michael-faraday-correspondence> (consultada el 11 de enero de 2017).

<sup>499</sup> Cfr. Edmund Whittaker, *A History of the Theories of Aether & Electricity* (New York: Dover Publications, 1989), pp. 170-71.

corrientes. En cambio Romo<sup>500</sup> considera que lo que Faraday buscaba era la reciprocidad del efecto Ørsted, ya que considera que para Faraday, si la electricidad influenciaba a una aguja imantada, lo lógico era buscar también la creación de corriente por la acción de un imán. No obstante, dado que el recíproco del efecto Ørsted no hubiera sido la “creación” de una corriente, sino la “influencia” de una corriente debida a la acción de un imán –ya que en el efecto Ørsted no se “crea” magnetismo a partir de la corriente– parece acertada la interpretación de Whitaker, es decir, que Faraday tuviera como marco de investigación la analogía entre electrostática y corrientes al investigar sobre si las corrientes pueden “inducir” algo.

La génesis de los experimentos que condujeron al descubrimiento de la inducción electromagnética<sup>501</sup> ha sido profusamente estudiada<sup>502</sup>, por lo que en este estudio se dará cuenta brevemente del descubrimiento siguiendo la detallada obra

---

<sup>500</sup> Cfr. José Romo Feito, "El Concepto De Estado Electro-Tónico En Faraday" (Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 1991), p. 40.

<sup>501</sup> Sobre las notas de los experimentos relacionados con el descubrimiento de la inducción electromagnética cfr. Faraday, *Faraday's Diary V.1*, pp. 367-97.

<sup>502</sup> Cfr. Howard J. Fisher, *Faraday's Experimental Researches in Electricity. Guide to a First Reading*, 1 ed. (Santa Fe, New Mexico: Green Lion Press, 2001), pp. 1-28. Geoffrey N. Cantor, David Gooding, and F.A.J.L. James, *Faraday* (London: Macmillan Education, 1991), pp. 72-77. David Gooding and F.A.J.L. James, eds., *Faraday Rediscovered. Essays on the Life and Work of Michael Faraday 1791-1867*, Reprint of 1989 ed. (Houndmills: MacMillan Press, 1985), pp. 189-209. Joseph Agassi, *Faraday as a Natural Philosopher* (Chicago: University of Chicago Press, 1971), pp. 95-103. Romo Feito, "El Concepto De Estado Electro-Tónico En Faraday", 50-123.

de Fisher<sup>503</sup>, destacando los aspectos en los que Hesse hace más hincapié en *Forces and Fields*: la acción contigua como modo de acción las fuerzas electromagnéticas y la representación de las acciones electromagnéticas mediante líneas de fuerza.

Como se he señalado, debido a los recientes descubrimientos de Ørsted, Faraday tenía la esperanza de obtener electricidad a partir del magnetismo. El aparato ideado por Faraday para descubrir los efectos magnéticos de un corriente consistía en dos hélices paralelas de alambre de cobre alrededor de un cilindro de madera, siendo que una de las hélices estaba conectada a un galvanómetro mientras que la otra estaba conectada a una batería. En un primer momento, y ante la falta de efectos en el experimento, Faraday decidió incrementar la longitud del cable. Posteriormente, al seguir sin detectar ningún efecto, decidió aumentar la potencia de la batería, momento en el cual comenzó a observar una pequeña desviación en las agujas del galvanómetro al conectar y desconectar dicha batería, es decir, comenzó a observar un efecto entre las hélices. Por tanto, como se indica en su *Diary*<sup>504</sup>, el 29 de Agosto de 1831, Faraday descubrió el fenómeno de la inducción, a saber, la deflexión, al establecerse una corriente en una bobina enrollada en la otra mitad del anillo, de una aguja de un galvanómetro que estaba conectada a otra bobina de alambre enrollada a la mitad de un anillo de hierro. A raíz de este

---

<sup>503</sup> Fisher, *Guide to the Experimental Researches in Electricity*.

<sup>504</sup> Faraday, *Faraday's Diary V.1*, Folio I, par. 3, 29 de agosto de 1831.

descubrimiento Faraday denominó 'inducción' al poder de las corrientes eléctricas de causar un estado concreto en la zona que rodea a dicha corriente. Concretamente, llamó 'inducción volta-eléctrica' al caso en el que el encendido y el apagado de un circuito inducían corriente en un circuito conductor localizado en las proximidades del primero; e 'inducción electromagnética' al caso en el que el movimiento de, o bien una corriente o bien de un imán en las proximidades de un circuito conductor, producía una corriente en el conductor, corriente que desaparecía en el momento en el que los elementos en movimiento quedaban en reposo alrededor del alambre. Es decir, Faraday descubrió en 1831 que una corriente es "inducida" en un circuito, o bien cuando la fuerza (*strength*) de una corriente adyacente se altera, o bien cuando un imán se acerca al circuito. La interpretación de Faraday del hecho que la inducción ocurriera en ambas circunstancias se basaba en que en ambos casos se establecía un movimiento relativo entre el circuito y las líneas de fuerza magnética<sup>505</sup> que se disponían en los alrededores del circuito.

Una de las primeras conclusiones a las que Faraday llegó a partir de su descubrimiento fue que el magnetismo inducido por la corriente a través del cable era momentáneo, es decir, de naturaleza similar a las descargas de corriente de la jarra de

---

<sup>505</sup> Sobre el concepto de 'líneas de fuerza' se tratará en el subepígrafe siguiente.



Leyden<sup>506</sup>, y no como las corrientes producidas por pilas voltaicas, que son continuas. Posteriormente, como se puede ver en los párrafos 18-24 de los "*Experimental Researches in Electricity*" (ERE)<sup>507</sup>, Faraday desarrolla un nuevo experimento acercando y alejando el cable sobre el que se quiere producir la inducción del cable con corriente. Al realizar este nuevo experimento observa que se produce un desvío en la aguja del galvanómetro, desvío que es permanente mientras que los movimientos se alejan y se acercan. De este modo concluye que lo que se obtiene es un efecto continuo que está relacionado con el movimiento del cable.

El siguiente paso que llevó a cabo fue determinar si la electricidad tradicional —la electricidad estática por fricción— tenía las mismas consecuencias inductoras<sup>508</sup>. Sin embargo, los efectos inductores de una descarga debida a una jarra de Leyden no eran muy claros, lo que Faraday atribuyó al hecho de que una jarra de Leyden podía no producir inducción sino simplemente traspasar carga, es decir, que la relación entre las electricidades que

---

<sup>506</sup> Sobre el origen y función de la jarra de Leyden cfr. Janet Ho, Richar T. Jow, and Steven Boggs, "Historical Introduction to Capacitor Technology" *IEEE Electrical Insulation Magazine* 26, no. 1 (2010): doi. 10.1109/MEI.2010.5383924, p. 23.

<sup>507</sup> Michael Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 1-2 (New York: Dover Publications, 1965), pp. 5-6.

<sup>508</sup> Puesto que en aquel momento la unidad entre la electricidad estática y las corrientes no era un asunto que estuviera claro, poder afirmar esto supondría un avance en lo que se refiere al establecimiento de la relación entre ambas.

con este experimento se podía establecer consistía solo en que ambas electricidades “inducían” fenómenos: las corrientes voltaicas inducían corrientes y la estática inducía electrificación.

Los desarrollos posteriores de las investigaciones de Faraday se centraron en diseñar un nuevo aparato para detectar la producción de electricidad a partir del magnetismo. Este aparato consistía en un anillo soldado hecho de una barra de hierro blanda; cada una de las partes del anillo se cubrían con alambre de cobre y se aislaban, tanto del anillo hierro, como unas de otras; las hélices de alambre de uno de los lados del anillo se conectaron al galvanómetro y la del otro lado a una pila voltaica. En este segundo experimento, al conectar la pila, el galvanómetro se desvió en una grado mucho mayor que en los casos anteriores; pero el efecto no permanecía cuando se continuaba el contacto; y, en cambio, el desvío volvía aparecer cuando se cortaba la corriente. Más tarde, como se recoge en parágrafo 35 de los *ERE*<sup>509</sup>, Faraday sustituyó el cilindro de hierro del primer experimento por uno de cobre, y ningún efecto que no hubiera ocurrido sin él tuvo lugar, por lo que con de que la presencia del hierro era relevante. Esto le llevó a un tercer experimento en el que no había corriente inductora, y en el que conectó una serie de hélices con el galvanómetro e introdujo en el interior de las hélices un cilindro de hierro al cual conectaría dos barras de imán dispuestas como una

---

<sup>509</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 1-2, p. 10.

herradura — es decir, cada uno de los polos tocando un extremo del cilindro de hierro. Durante este experimento Faraday observó que al comenzar o al romper el contacto magnético la aguja se desviaba, pero que la aguja permanecía indiferente si el contacto se mantenía. A continuación Faraday observó que si invertía la dirección de contacto de los polos la aguja se desviaba en la dirección contraria y llegó a la conclusión de que la corriente inducida dependía de la dirección de influencia del imán. Como indica en el párrafo 39<sup>510</sup>, para corroborar la influencia del imán, Faraday sustituyó el cilindro de hierro por un imán; al ser introducido este en el hueco de la hélice la aguja se desviaba como en los casos anteriores. Aunque los efectos en este último caso no eran muy grandes, introduciendo y sacando el imán siguiendo un ritmo de manera tal que los impulsos del efecto se sumaran unos a otros, consiguió aumentar el efecto. El siguiente paso fue aislar el cable de manera que no hubiera contacto con el imán y observó que los efectos continuaban. De este modo Faraday concluyó, en el párrafo 57, que todos estos experimentos mostrados prueban la producción de electricidad a partir de magnetismo ordinario<sup>511</sup> cuando existe un movimiento relativo entre alambre y el imán.

Uno de los conceptos que Faraday introduce a raíz del descubrimiento de la inducción electromagnética es el de 'estado

---

<sup>510</sup> Ibid., p. 11.

<sup>511</sup> Ibid., p. 15.

electrotónico'. En el párrafo 60 de los *ERE*<sup>512</sup> Faraday lo describe como la condición eléctrica de la materia cuando está bajo los efectos de una inducción electro-voltaica o magnetoeléctrica. De este estado afirma que en él la materia se resiste a la formación de una corriente eléctrica y que tampoco reacciona ante la presencia de fuerzas (*powers*) atractivas o repulsivas. Ya en el párrafo 71<sup>513</sup> Faraday define el 'estado electrotónico' como un estado de tensión que puede ser considerado como "equivalente"<sup>514</sup> al de la corriente de electricidad. Es más, él considera que es un estado que se relaciona con las partículas, y no con la masa, del alambre o de la substancia que está bajo el efecto de la inducción.

El otro concepto clave que Faraday acuña a partir de este experimento es el 'cuervas magnéticas' el cual, como se ha señalado al comienzo de este epígrafe, está estrechamente relacionado con el concepto de 'campo'. La primera vez que aparece este término es en el párrafo 114 de los *ERE*:

*"By magnetic curves I mean the lines of magnetic forces, however modified by the juxtaposition of poles which would be depicted by*

---

<sup>512</sup> Ibid., p. 16.

<sup>513</sup> Ibid., p. 19.

<sup>514</sup> El subrayado es suyo. La importancia de este concepto reside en que es la primera interpretación física que Faraday da de los procesos que estaba investigando. Sobre el concepto de 'estado electrotónico' cfr. José Romo, "El Concepto De Estado Electro-Tónico En Faraday" (Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 1991).

*iron fillings; or those to which a very small magnetic needle would form a tangent*"<sup>515</sup>.

Faraday hizo uso de su concepto de 'líneas magnéticas' –en este caso eran curvas– para representar la ley que gobierna el fenómeno de la inducción electromagnética. De este modo, de acuerdo con Faraday, la intersección entre las curvas magnéticas y un circuito da lugar a una corriente, y la ley que rige este fenómeno consiste en que el mero hecho de cortar las curvas magnéticas sin necesidad de cambio en la variación de la intensidad magnética es suficiente para inducir las corrientes. A partir de este momento las curvas magnéticas pasaron a ser el nuevo modo de representar físicamente la acción magnética, haciendo innecesario el concepto de 'estado electrotónico'<sup>516</sup> –con

---

<sup>515</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 1-2, p. 32, par. 114, nota al pie. Según Manuel Doncel, el concepto de curva magnética no aparece en el manuscrito de la Serie 1, a la que pertenece este párrafo, que fue leído ante la *Royal Society*, cfr. Manuel Doncel, "Reconsidering Faraday: The Process of the Conversion to His Magnetic Curves" *Physis* 33 (1996): p. 54.

<sup>516</sup> Crawford considera que Faraday nunca había abandonado el concepto de estado electrotónico a favor de las líneas de fuerza porque sostiene que eran explicaciones a dos niveles distintos. Las líneas de fuerza serían descripciones de los fenómenos, mientras que el estado electrotónico era un concepto que explicaba los fenómenos en términos de sus causas subyacentes. Esta interpretación de Crawford señala que el estado electrotónico era la causa de los fenómenos electromagnéticos de manera que permitía actuar a las fuerzas eléctricas y magnéticas y ser conectadas por las partículas de materia. En una nota señala que el estado electrotónico indica una disposición interna de las fuerzas en la materia y que se suponía que era un estado de tensión que cuando se relajara podía ser visto como una fuerza magnética o eléctrica. El problema de esta interpretación de los niveles de

el que Faraday había explicado anteriormente la inducción—, puesto que este último concepto no servía para determinar la ley de la inducción mientras que las curvas magnéticas sí que servían<sup>517</sup>.

### 4.4.3. El rol de las líneas de fuerza

El hecho, que se ha señalado en el subepígrafe anterior, de que Faraday, en vez de optar por el ‘estado electrotónico’, optara por las ‘curvas magnéticas’ como noción central de su teoría porque con ellas se podía explicar la ley de la inducción evidencia que, en

---

Crawford reside principalmente en que dichos niveles no aparecen explícitamente en los textos y que además Faraday no buscaba explicaciones en términos de causas, ya que consideraba que no se podían llegar a ellas. Elspeth Crawford, "Learning from Experience" in *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*, ed. David Gooding and F.A.J.L. James (Basingstoke: MacMillan Press, 1985), pp. 216-17. Además, el hecho de que Por otra parte, sí es verdad que, aunque no hiciera uso de él en sus explicaciones científicas, Faraday no había desechado completamente esa noción, como puede observarse en una carta que escribió a Whewell: "*With respect to induction remember that when I first used the terms I believed that the neighboring wire assumed & retained a peculiar state (called the **electrotonic state**) as long as the original current was continued; and considered the two currents produced only as the particular conditions belonging to the commencement & conclusion of this state (...) I have given up this electrotonic **state** for the time as an experimental result (remember my researches are **experimental**) because I could find no fact to prove it but I cling to it in fancy or hypothesis from general impressions produced by the whole series of results*": F.A.J.L. James, *The Correspondence of Michael Faraday (1832-1840)*, vol. 2 (London: Institution of Electrical Engineers, 1993), Letter 814, Faraday to William Whewell, pp. 278-79, 19 de septiembre de 1835. El subrayado es de Faraday

<sup>517</sup> Cfr. Crawford, "The Concepts of 'Particle' and 'Field' in Michael Faraday's Work, 1831-1845", p. 60.

un primer momento, en rol del concepto de 'línea de fuerza' en el trabajo de Faraday era claramente heurístico. Mediante ellas explicó cada uno de los fenómenos que fue descubriendo. Además de explicar en 1831 la ley de la inducción, las 'líneas de fuerza' se utilizaron en 1845 para dar cuenta de la acción del magnetismo sobre la luz; a partir de 1846 para explicar las diferencias entre los cuerpos magnéticos y, los recién descubiertos cuerpos diamagnéticos; en 1850 para definir el campo; a partir de la década de 1850 para explicar la polaridad de los imanes; y, finalmente, para explicar mediante ellas los fenómenos de las vibraciones radiantes como la luz —aunque esto último no fue presentado como un resultado de investigación sino que apareció en uno de los escritos especulativos de Faraday. Por otra parte, en varias ocasiones Faraday sopesó la posibilidad de adscribir a las líneas de fuerza un rol que no fuera meramente representativo sino también carácter físico, es decir, que, como existentes, fueran independientes de la materia. Cuál fue la última palabra de Faraday a este respecto no está claro, puesto que Faraday volvería una y otra vez a afirmar —cuando era preguntado sobre el carácter de las líneas de fuerza— que él entendía las líneas de fuerza como representación de la dirección y de la cantidad de fuerza y puesto que, también, hasta el último momento de su vida, Faraday trató de realizar experimentos que avalaran su intuición del carácter físico de dichas líneas. Esta ambigüedad del rol de las líneas de fuerza a lo largo de los años de investigación posteriores al

---

descubrimiento de la inducción electromagnética es acerca de lo que se tratará a continuación.

#### 4.4.3.1. Las 'líneas de fuerza eléctrica'

Con posterioridad a su descubrimiento de la inducción electromagnética, Faraday se dedicó a investigar acerca la naturaleza de la electricidad. Primeramente, en la Serie 3 de los *ERE* de 1833, trató sobre la identidad de las diferentes electricidades según su origen<sup>518</sup> y especialmente acerca de las diferencias entre la electricidad estática (o común) y la dinámica (o voltaica)<sup>519</sup>. Su estudio de la electricidad se amplió entre 1833 y 1835 con el estudio de la descomposición electroquímica, ya que le parecía que la aplicación de la electricidad común a la descomposición química podría mostrar "*new conditions of that action*" y "*evolve new views of the internal arrangements and changes*"<sup>520</sup> de las sustancias en descomposición. Sus estudios sobre la pila voltaica —que contrariamente a la teoría del contacto referían los efectos eléctricos de la pila a las combinaciones químicas— le llevaron a enfrentarse por primera vez con el hecho de que la transmisión de una acción se realizara a través de partículas contiguas, y no a distancia, como resultado de una acción directa: es decir, en el caso de la pila, la causa de la

---

<sup>518</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 1-2, pp. 76-102, pars. 265-360.

<sup>519</sup> *Ibid.*, pp 102-07, pars. 361-79.

<sup>520</sup> *Ibid.*, p. 127, par. 451.



disociación era la existencia de una tensión en las moléculas que se propagaba de una a otra, y no de la acción directa de los polos, como defendían los partidarios de la hipótesis del contacto. En palabras de Faraday, la acción electrolítica era

*“an action of **contiguous** particles, through the intermediation of which the electric force, originating or appearing at certain place, is propagated to or sustained at a distance, appearing there as a force of the same kind exactly equal in amount, but opposite in its direction and tendencies”*<sup>521</sup>.

De este modo, según Faraday hay una tensión que rompe las moléculas y causa que la descomposición se propague sucesivamente de una partícula a otra contigua.

En este contexto de la investigación sobre la descomposición electroquímica es donde aparecen mencionadas por primera vez las ‘líneas eléctricas’. En el párrafo 521 de la Serie 5 de los *ERE* Faraday habla de que las líneas de acción, que se supone que representan las corrientes eléctricas pasando a través del líquido que descompone, tienen formas irregulares y no son líneas rectas<sup>522</sup>. A partir de ese momento Faraday tratará las fuerzas en términos de direcciones como una noción abstracta de la electricidad que le permite dar cuenta de los fenómenos, aunque no le parezca que con ello se pueda decir mucho acerca de las causas de dichas fuerzas<sup>523</sup>.

---

<sup>521</sup> Ibid., p. 409, par. 1295. El subrayado es mío.

<sup>522</sup> Cfr. Ibid., p. 149, par. 521.

<sup>523</sup> James, *Faraday's Correspondence V. 2*, Letter 712, Faraday to Charles Lemon, p. 178, 25 de abril de 1834.

---

Por aquel entonces, como se puede observar en su correspondencia, Faraday no tenía una teoría propia sobre estos fenómenos que investigaba experimentalmente, aunque sospechaba que las teorías vigentes en aquel momento no eran adecuadas para explicar los fenómenos. Concretamente Faraday reconoce en una carta a Charles Lemon que no cree que las nociones que se suelen adscribir a ‘positivo’ y ‘negativo’ –en relación a los fenómenos electromagnéticos– sean correctas, aunque él no tenga aún una opinión clara de qué terminología sería más conveniente usar. Además, Faraday consideraba que los términos que hasta ese momento describían los fenómenos electromagnéticos desde las diferentes teorías existentes no definían la verdadera naturaleza de dichos fenómenos. Por estos motivos, cuando William Whewell (1794-1866)<sup>524</sup> le sugirió sustituir la terminología que él estaba usando por el término de Ampère ‘electrodinámica’, Faraday se negó, considerando que su terminología, al no estar ligada a ninguna teoría estaba más próxima a describir adecuadamente los fenómenos:

*“My words **Volta-induction, magneto-electric-induction, magneto-electricity, electro-magnetism** &c are merely intended to indicate how the effect included under them are obtained whereas Ampere by the word ‘**Electro-dynamic**’ essentially implies a theory which theory may be wrong. The origin of all these effects may be something in such a state that when we come to know what it is the word **electrodynamic** may not apply. I may be equally wrong, nay more so by far, in the word induction but at all event*

---

<sup>524</sup> William Whewell fue Master del *Trinity College* en Cambridge y trabajó como historiador y filósofo de la ciencia.

*the prefixes, Volta, magneto, magneto electric, electromagnetic, pledge me to no theory, and yet have certain distinctness of sense which makes the useful*"<sup>525</sup>.

En cambio sí que aceptó el término que en 1836<sup>526</sup> Whewell le sugirió, acuñando el término ‘dieléctrico’ para denominar a las sustancias con una capacidad inductiva mayor que las sustancias eléctricas y que permitían el paso de las líneas de acción inductiva con más facilidad. Faraday dejó entonces de utilizar la terminología estándar —es decir, de hablar de conductores y aislantes— y pasó a hablar de conductores y sustancias no conductoras, los dieléctricos<sup>527</sup>. La primera vez que Faraday hizo uso de dicho término en una publicación fue en la nota al párrafo 1168 de la ya referida Serie 11 de los *ERE*. Allí señala que usa la palabra ‘dieléctrico’ para expresar la substancia a través de la cual las fuerzas eléctricas están actuando<sup>528</sup>.

Una vez asumidos los dieléctricos, Faraday re-define la inducción como “*an action of the continuous particle of the dielectric, which being thrown into a state of polarity and tension, are in mutual*

---

<sup>525</sup> James, *Faraday's Correspondence V. 2*, Letter 814, Faraday To William Whewell, p. 228, 19 de octubre de 1835. El subrayado es de Faraday.

<sup>526</sup> *Ibid.*, Letter 960, Faraday to William Whewell, p. 398, 20 de diciembre de 1836.

<sup>527</sup> Durante esas fechas Faraday sostenía que la “electricidad común” residía en la superficie de los aislantes y no en la de los conductores. Para Faraday la polarización era una propiedad de los aislantes que, cuando entraban en contacto con un conductor, lo cargaban.

<sup>528</sup> Cfr. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 1-2, p. 364, par. 1168, nota al pie.

---

*relation by their forces in all directions*"<sup>529</sup>. La acción de las partículas de dicho medio estaría representada por las líneas de fuerza. Además que entre esas líneas se produce una tensión lateral que Faraday considera como una repulsión que se ejerce entre las líneas de fuerza<sup>530</sup> y que es causante de su curvatura.

La curvatura de las líneas eléctricas es algo que Faraday descubrió experimentalmente en 1837, como se expone en la Serie 11 de los *ERE*, y justificó gracias a la repulsión lateral entre las líneas de fuerza. El experimento fue el siguiente: se situaba una semiesfera metálica en lo alto de un cilindro de laca para ver cómo la semiesfera alteraba la acción inductiva de la electricidad estática y se descubrió que las líneas de fuerza eléctricas podían no ser rectas sino curvas<sup>531</sup>. Esto era importante, dado que Faraday ya había determinado que la vieja teoría de la acción a distancia en líneas rectas no podía dar cuenta del fenómeno de inducción y este resultado le permitía proponer una acción de otro tipo.

En el mismo párrafo en el que habla de las líneas laterales Faraday refiere lo que se extraer de su concepto de tal línea: "*I use the term **line of inductive force merely** as a temporary mode of expressing the directions of the power in cases of induction*"<sup>532</sup>.

e, igualmente señala que

---

<sup>529</sup> Ibid., p. 383, par. 1224. El subrayado es mío.

<sup>530</sup> Ibid., p. 386, par. 1231.

<sup>531</sup> Ibid., p. 383, par. 1224.

<sup>532</sup> Ibid., p. 386, par. 1231.

*"I have used the phrases **lines of inductive force** and **curved lines** of force in a general sense only, just as we speak of the lines of magnetic force. The lines are imaginary, and the force in any part of them is of course the resultant of compound forces, every molecule being related to every other molecule in **all** directions by the tensions and reaction of those which are contiguous. The transverse force is merely this relation considered in a direction oblique to the lines of inductive force, and at present I mean no more by the phrase. With respect to the term **polarity** also, I mean at present only a disposition of force by which the same molecule acquires opposite powers on different parts"*<sup>533</sup>,

en donde la fuerza transversal se refiere a la fuerza lateral mencionada anteriormente, y en donde el estado de polarización de las partículas es un estado forzado<sup>534</sup> ya que dichas partículas a vuelven su condición normal una vez ha cesado la inducción. Por tanto, las líneas de fuerza, en este momento, no tenían un carácter físico.

Durante los primeros años de la década de 1840 Faraday sufrió una crisis de agotamiento que le mantuvo alejado de su trabajo experimental. No fue hasta 1845 que Faraday volvió a realizar otro gran descubrimiento. Tal como se describe en su *Diary* Faraday descubrió el 13 de septiembre de tal año que la acción magnética de un imán afectaba al plano de polarización de un rayo de luz atravesando un cristal muy denso<sup>535</sup>. Esto se debía, según Faraday, a la acción de las líneas de fuerza magnética que surgían del cristal. De este modo, dichas líneas pasaron de nuevo a estar al frente de

---

<sup>533</sup> Ibid., p. 411, par. 1304.

<sup>534</sup> Ibid., p. 534, par. 1671.

<sup>535</sup> Faraday, *Faraday's Diary* V. 4, p. 264, par. 7505, 13 de septiembre de 1845.

los conceptos investigados por Faraday. En la Serie 19 de los ERE titulada “*On the Magnetic Affection of Light and on the Distinction between the Ferromagnetic and Diamagnetic Conditions of Matter*”<sup>536</sup>, que Faraday consagra al fenómeno de la magnetización de la luz, aparece otra definición de ‘líneas de fuerza’, esta vez tanto las magnéticas como las eléctricas, del siguiente modo:

*“Thus, by **line of magnetic force**, or **magnetic line of force**, or **magnetic curve**, I mean that exercise of magnetic force which is exerted in the lines usually called magnetic curves, and which equally exist as passing from or to magnetic poles, or forming concentric circles round an electric current. By **line of electric force**, I mean the force exerted in the lines joining two bodies, acting on each other according to the principles of static electric induction, which may also be either in curved or straight lines”*<sup>537</sup>.

Como se puede observar, tanto la definición de ‘líneas de fuerza magnética’ como la de ‘líneas de fuerza eléctrica’ son muy similares en esencia a las anteriores definiciones ya que, de nuevo, la línea de fuerza hace referencia al ejercicio de la acción. Sin embargo, en esta nueva definición, al no indicarse, expresamente que las líneas son imaginarias, o qué de la fuerza representan, – como si aparece en anteriores definiciones – la interpretación de que las líneas no sólo representan la acción sino que son la acción misma es un interpretación posible, máxime cuando en la definición de ‘línea de fuerza eléctrica’ equipara esta con las

---

<sup>536</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3, pp. 1-26.

<sup>537</sup> *Ibid.*, p. 2, par. 2149. El subrayado es de Faraday.

fuerza. Es más, al detallar más las características de su experimento, Faraday, señala que

*“it may be again stated, that it is the magnetic lines of force **only** which are effectual on the rays of light, and they **only** (in appearance) when parallel to the ray of light, or as they tend to parallelism with it”*<sup>538</sup>,

adscribiendo “efectividad” –en este caso sobre los rayos de luz– a las líneas de fuerza magnética

#### 4.4.3.2. La materia, el espacio y el magnetismo

La hipótesis de Faraday de que los cuerpos magnéticos actúan a partir de partículas intermedias se vio reforzada por sus investigaciones acerca de la magnetización de la luz<sup>539</sup>. En los experimentos que realizó, detectó que el material óptico a través del cual pasa el rayo de luz adquiriría un estado magnético y que la fuerza magnética no actuaba directamente sobre el rayo de luz sino a través de la mediación de la materia<sup>540</sup>. Sin embargo, dicho estado no era un estado magnético ordinario, sino una nueva clase de estado que Faraday, una vez más con la ayuda de Whewell, denominó ‘diamagnetismo’. Así, por diamagnético entenderá *“a body through which lines of magnetic force are passing, and which does not by their action assume the usual magnetic state of iron”*<sup>541</sup>. A partir

---

<sup>538</sup> Ibid., p. 20, par. 2223. El subrayado es de Faraday.

<sup>539</sup> Cfr. Faraday, *Faraday's Diary V. 4*, p. 287, par. 7796, 26 de septiembre de 1845.

<sup>540</sup> Cfr. Ibid., p. 287, par. 7693, 26 de septiembre de 1845.

<sup>541</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity, V. 3*, p. 3, par. 2149.

---

de dicho descubrimiento Faraday se dedicó a investigar la diferencia entre el magnetismo y el diamagnetismo la cual, en último término, era algo que también estaba se daba en función de las líneas de fuerza. Además, la existencia del diamagnetismo significaba que la acción magnética era una acción que podía extenderse potencialmente a todos los materiales<sup>542</sup> y no solo a los que se consideraba tradicionalmente como magnéticos, es decir, su influencia tenía el mismo alcance que la influencia eléctrica. Este hecho hizo considerar a Faraday que había una unidad entre dichas fuerzas.

En un primer momento Faraday no esclareció si la nueva condición magnética a la que estaban sujetas las substancias diamagnéticas debía ser considerada una nueva fuerza o bien una nueva condición de la materia<sup>543</sup>. Eso sí, Faraday tenía claro que dicha condición era un estado de tensión, puesto que cualquier elemento diamagnético volvía a su estado normal una vez que había finalizado la inducción magnética. Una peculiaridad que se detectó en los cuerpos diamagnéticos fue que tienden a situarse en

---

<sup>542</sup> De hecho, Faraday afirmaría posteriormente que las líneas de fuerza magnética inducen un estado en todos los cuerpos y que los cuerpos en dicho estado desempeñan un papel similar al que las partículas de materia desempeñan en la inducción electrostática. Cfr. Michael Faraday, *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*, ed. Thomas Martin, vol. VI, 11 de noviembre de 1851 - 5 de noviembre de 1855 (London: G. Bell & sons, 1935), p. 178, par. 12610, 28-09-1852.

<sup>543</sup> Cfr. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3, p. 21, par. 2227.



ángulo recto a las líneas de fuerza magnética bajo la acción de un imán, lo que Faraday interpretó como la posible repulsión de dicha materia por los polos magnéticos. Posteriormente Faraday enunció la ley que permitía diferenciar los cuerpos diamagnéticos de los magnéticos: los primeros tienden a ir desde lugares de acción magnética “más fuerte” (*stronger*) a lugares de acción magnética más débil (*weaker*)<sup>544</sup>, mientras que los cuerpos magnéticos tienden a lo contrario. Dichos movimientos podían explicarse como consecuencia de que la inducción magnética causara sobre ellos un estado contrario al que producía sobre los cuerpos magnéticos. Esto le llevó a tratar de descubrir si en los cuerpos diamagnéticos se había inducido una polaridad de la misma clase que en los cuerpos magnéticos, pero en dirección reversa<sup>545</sup>, lo que implicaría que los cuerpos diamagnéticos son polares en el campo magnético. Este planteamiento era precisamente el defendido por Weber en el continente. En un primer momento, después de leer el artículo sobre el diamagnetismo de Weber, Faraday dudaba aún de la polaridad de los cuerpos diamagnéticos, concretamente del bismuto<sup>546</sup>. Por este

---

<sup>544</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 69, par. 2418. Y Michael Faraday, *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*, ed. Thomas Martin, vol. V, 6 de septiembre de 1847 - 17 de octubre de 1851 (London: G. Bell & sons, 1934), p. 71, 2-09-1848.

<sup>545</sup> Cfr. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3, p. 137, par. 2640.

<sup>546</sup> Cfr. Faraday, *Faraday's Diary* V. 5, p. 153, 27-03-1849.

---

motivo, en 1850, realizó una serie de experimentos entre los que repitió los de Weber; sin embargo, no llegó a obtener resultados experimentales que avalaran la opinión hipotética de la polaridad diamagnética<sup>547</sup>. Durante un tiempo el tema de la polaridad de los cuerpos diamagnéticos y los cuerpos magnéticos continuó siendo el objeto de estudio de Faraday pero, finalmente, y debido a una investigación ulterior sobre la conducción magnética<sup>548</sup>, Faraday va a negar la existencia de dichos polos.

La siguiente serie de investigaciones, la Serie 25 de 1850 titulada "*On the Magnetic and Diamagnetic Condition of the Bodies*"<sup>549</sup>, es en la que Faraday trata de determinar el 0 magnético, es decir, la ausencia total de condición magnética. En un primer lugar consideró que el vacío era el mejor candidato como lugar de 0 magnético, por lo que sus primeros experimentos se dirigieron a abordar la relación del magnetismo con el espacio libre de materia. En su *Diary* especula que,

*"it is not probable that some bodies may affect the transmission of this forces across space when they occupy it, without having the circular currents set up in their particle either in one direction or the other, by an act or process which I have endeavored to express by the word conduction?"*<sup>550</sup>.

---

<sup>547</sup> Cfr. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3, p. 157, par. 2693 y pp. 145-146, par. 62.

<sup>548</sup> Por conducción magnética Faraday entiende "*a general expression of the capability which bodies may possess of effecting transmission of magnetic force*", *Ibid.*, p. 200, par. 2797.

<sup>549</sup> *Ibid.*, pp. 169-99.

<sup>550</sup> Faraday, *Faraday's Diary* V. 5, p. 302, par. 10837, 8-04-1850.

Sin embargo, debido a que sus experimentos mostraron que tanto el hierro como el bismuto eran obedientes a un imán en el vacío, Faraday tuvo que concluir que las líneas de fuerza podían atravesar el espacio vacío (*mere space*) y afirmar que “*space has a magnetic relation of its own*”<sup>551</sup>. No obstante, Faraday afirmó que el carácter magnético del espacio era diferente al de los cuerpos magnéticos y diamagnéticos, ya que el “*mere space cannot act as matter acts*”<sup>552</sup>, es decir, afirma que el espacio se comporta independientemente de la materia, y que no es el candidato al verdadero 0 magnético, sino que este habría de buscarse entre las variedades de materia. De este modo, dichas variedades de materia,

*“which produce no effect when added to space, appear to me to be neutral or to stand to zero. Those which bring with them an effect of one kind will be on the one side of zero, and those which produce an effect of the contrary kind will be on the other side of zero; by this division they constitute the two subdivisions of magnetic and diamagnetic bodies”*<sup>553</sup>.

Por tanto, para Faraday existía una gradación de las cualidades magnéticas de la materia<sup>554</sup> en función de su poder conductor del magnetismo. Los cuerpos no diamagnéticos —que Faraday

---

<sup>551</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3, p. 194, par. 2787.

<sup>552</sup> Ibid.

<sup>553</sup> Ibid., p. 195, par. 2789.

<sup>554</sup> En este punto de las investigaciones de Faraday se puede sostener que, para él, el magnetismo era una clase general de fenómenos en los que se incluyen todos los fenómenos y efectos producidos por el poder magnético, y que el diamagnetismo y el paramagnetismo eran subdivisiones de dichos fenómenos y efectos.

---

denominó ‘paramagnéticos’<sup>555</sup>— serían buenos conductores de las líneas de fuerza mientras que los diamagnéticos pobres serían conductores pobres. Por este motivo, los cuerpos paramagnéticos situados en un campo magnético hacían converger las líneas de fuerza, ya que el mejor conductor —en este caso el material paramagnético—, transportaba más fuerza durante la mayor distancia posible, y el peor conductor —en este caso el espacio— transmitía la mínima fuerza en el menor tiempo posible<sup>556</sup>. En el caso de los cuerpos diamagnéticos la situación era la contraria dado que el espacio era mejor conductor que dicho cuerpo y, por tanto, las líneas de fuerza divergían cuando se sitúa un cuerpo diamagnético en un campo. De este modo, como se indicó al comienzo de esta sección, los diferentes cuerpos magnéticos se caracterizaban en función de las líneas de fuerza.

#### 4.4.3.3. El carácter de las líneas de fuerza

En 1851 Faraday va a tratar uno de los temas fundamentales acerca de las líneas de fuerza, a saber, su carácter y su distribución<sup>557</sup>. En primer lugar Faraday da de nuevo la definición de ‘línea de fuerza’, a saber, que

*“A line of magnetic force may be defined as that line which is described by a very small magnetic needle, when it is so moved in either direction correspondent to its length, that the needle is*

---

<sup>555</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3, p. 196, par. 2790.

<sup>556</sup> *Ibid.*, p. 204, par. 2807.

<sup>557</sup> *Ibid.*, pp. 325-70. Series On the Lines of Magnetic Force.

*constantly tangent to the line of motion; or it is direction, there is no tendency to the formation of any current in the wire, whilst if moved in any other direction there is such a tendency; or it is that line which coincides with the direction of the magnecrystallic axis of a crystal of bismuth, which is carried in either direction along it. The direction of these lines about and amongst magnets and electric currents is easily represented and understood, in a general manner, by the ordinary use of iron fillings”<sup>558</sup>*

y posteriormente pasa a señalar lo que significan para él dichas líneas:

*“I desire to restrict the meaning of the term **line of force**, so that it shall imply no more than the **condition of the force in any given place**, as to strength and direction; and **not to include** (at present) any idea of the **physical cause** of the phenomena (...) Still, there is no impropriety in endeavoring to conceive the method in which the physical forces are either excited, or exist, or are transmitted; nor, when these, by experiment and comparison are ascertained in any given degree, in representing them by any method which we adopt to represent the mere forces, provided no error is thereby introduced. On the contrary, when the natural truth and the conventional representation of it more closely agree, then are we most advanced in our **knowledge**”<sup>559</sup>.*

No obstante, los experimentos que va a realizar ulteriormente para determinar el carácter definido de las líneas de fuerza magnética van a hacer que Faraday se replantee de nuevo la existencia física de dichas líneas.

En su artículo de 1852, “*On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force*”, en la versión publicada en la *Philosophical*

---

<sup>558</sup> Ibid., p. 328, par. 3071.

<sup>559</sup> Ibid., p. 330, par. 3075. Cfr. también Michael Faraday, "On the Lines of Magnetic Force" in The Royal Institution Library of Science, ed. Lawrence Bragg and George Porter (London: Applied Science Publishers, 1851), pp. 25-26.

---

*Magazine*<sup>560</sup>, Faraday va a realizar una serie de especulaciones sobre el carácter físico de las líneas de fuerza. Según Faraday, se podría afirmar la existencia física de las líneas de fuerza si cumplen alguno de los siguientes cuatro requisitos: en primer lugar, si las líneas pueden ser afectadas, ya sea comprimiéndolas, ya sea afectando sus cualidades como cuando un rayo de luz se polariza; en segundo lugar, si las líneas tardan tiempo en propagarse; en tercer lugar si son curvas; y, por último, si son independientes de sus fuentes<sup>561</sup>.

En la versión publicada por la *Royal Institution* de "On the Physical Lines of Magnetic Force"<sup>562</sup> en 1852 y en su polémico artículo "Thoughts on Ray Vibrations"<sup>563</sup>, —del que se tratará en la siguiente sección— Faraday distingue entre diversas clases de líneas de fuerza, sobre las cuales determina si son físicas o no: las líneas de fuerza gravitatoria, las líneas de fuerza electrostática y las líneas de fuerza electrodinámica.

---

<sup>560</sup> Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force".

<sup>561</sup> En cambio, la concepción de la acción a distancia incluye que la acción es instantánea, en línea recta y que no es afectada por el medio interpuesto. Cfr. Nersessian, *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 41.

<sup>562</sup> Michael Faraday, "On the Physical Lines of Magnetic Force" in *The Royal Institution Library of Science*, ed. Lawrence Bragg and George Porter (London: Applied Science Publishers, 1852).

<sup>563</sup> Michael Faraday, "Thoughts on Ray Vibrations" *Philosophical Magazine* 28, no. Serie 3 (1846).

Según Faraday, las líneas de fuerza gravitatoria se caracterizan porque son líneas rectas, y porque no se puede concebir el poder gravitatorio como independiente de los cuerpos, sino que al menos debe haber dos cuerpos presentes para que se dé. Estas características tan opuestas a las de las líneas de los fenómenos anteriormente estudiados hace que Faraday conciba las líneas de fuerza gravitatoria como meras líneas que describen la dirección de la fuerza, y afirme que son ideales, porque no cumplen ninguno de los requisitos señalados anteriormente para que sean físicas.

Al tratar acerca de las líneas de electricidad Faraday tiene primero en consideración las líneas de electricidad estática. Estas se caracterizan por ser la manifestación de un poder dual, en el que los cuerpos en los extremos de las líneas, aunque de la misma naturaleza, no son iguales. Estas líneas estarían presentes en todos los casos de inducción eléctrica y terminan en las superficies de los conductores bajo inducción. Aunque no se había encontrado ninguna relación entre dichas líneas y el tiempo<sup>564</sup>, al cumplir los dos requisitos de “actuar en curvas” y “ser afectadas” —en este caso comprimidas— por medios con diferente capacidad inductiva, Faraday afirma que dichas líneas físicas.

De las líneas de electricidad dinámica también afirma que son físicas, ya que pueden ser afectadas comprimiéndolas o expandiéndolas de acuerdo con la acción transversal del conductor

---

<sup>564</sup> Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force": p. 404, par. 3249.

de la batería voltaica y porque, en el caso de un circuito voltaico, son curvas cerradas.

#### **4.4.3.4. El artículo “*Thoughts on Ray Vibrations*” y el estatus de las líneas de fuerza magnética**

Conviene analizar este artículo al margen de la exposición de las investigaciones experimentales de Faraday puesto que este artículo es de carácter especulativo y todos los anteriormente señalados eran de carácter científico. Escrito en 1846, refleja las inquietudes de Faraday acerca del estatus de las líneas de fuerza. La principal intuición detrás de este artículo es que las líneas de fuerza transmiten vibraciones, es decir, que se puede “*affect these lines of force in a manner which may be conceived as partaking of the nature of a shake or lateral vibration*”<sup>565</sup>. Con esta afirmación Faraday quiere desechar la idea de que exista un éter que sea el medio de transmisión de la acción y considerar que la radiación es una especie de vibración en las líneas de fuerza que conectan los cuerpos. Además, dichas vibraciones no serían como las ondas del agua, que son directas, sino que serían vibraciones “laterales”.

Más adelante, en el artículo, sostiene que las líneas de fuerza eléctrica y de fuerza magnética son físicas porque pueden ser afectadas haciéndolas vibrar. Sin embargo, en este momento Faraday no llega a comprometerse con esta idea sino que sigue buscando más argumentos sobre la existencia física de las líneas

---

<sup>565</sup> Faraday, “Thoughts on Ray Vibrations”: p. 348.



magnéticas, que son los que expondrá en el citado artículo "*On the Physical Lines of Magnetic Force*".

La especulación más polémica que Faraday realiza en este artículo es describir los rayos de luz como líneas de fuerza. Estos rayos de luz o líneas de fuerza cumplirían todos los requisitos para ser líneas físicas: en primer lugar, pueden ser afectados, por ejemplo cambiando su dirección mediante la refracción; en segundo lugar, se puede lograr que tomen un curso que describa una curva; en tercer lugar, tardan tiempo en desplazarse; y, por último, son independientes de la materia puesto que, incluso cuando desaparece el origen que los causó, todavía se pueden encontrar rayos dirigiéndose a su objetivo.

Si se acepta la argumentación de "*Thoughts on Ray Vibrations*" acerca de los rayos de luz, también las líneas de fuerza magnética serían físicas, porque se podrían afectar produciendo vibraciones. No obstante, como se ha señalado, este artículo es principalmente una especulación. De hecho, en el ya mencionado artículo de 1852, Faraday afirma que no se ha hallado aún prueba de que las líneas magnéticas sean afectadas<sup>566</sup>, por lo que, para que fueran físicas, o bien debía de ser curvas, o bien independientes de su origen, o bien estar relacionadas con el tiempo.

El problema del tiempo en las líneas de fuerza magnética fue un tema recurrente, incluso a lo largo de los últimos años de

---

<sup>566</sup> Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force": p. 405, par. 3252.

---

investigación en la vida de Faraday. Ya en 1832, en una nota sellada que envió a la *Royal Society*, en la que Faraday exponía ideas suyas que no tenía tiempo de experimentar pero de las que quería dejar clara su autoría<sup>567</sup>, afirma que él piensa que la acción magnética es progresiva y requiere tiempo, aunque en 1852 ya pudo afirmar que ninguna relación con el tiempo había sido descubierta aún en las líneas de fuerza magnética<sup>568</sup>. No se desanimó con ello, y en febrero de 1857 Faraday escribe a George Biddell Airy (1801-1902), Astrónomo del Real Observatorio de Greenwich, que estaba explorando la posibilidad de probar la existencia del elemento 'tiempo' en los fenómenos magnéticos<sup>569</sup>. De igual modo, cuatro días más tarde, Faraday escribía a Maxwell que en el verano quería trabajar sobre el tiempo que tarda la acción magnética, concretamente, el tiempo requerido para la asunción del estado electrotónico<sup>570</sup>.

Además de lo que dicha carta aporta al debate sobre el carácter de las líneas de fuerza, es importante considerar esta carta en lo

---

<sup>567</sup> Sobre el descubrimiento del contenido de esta nota sellada ver G.R.M. Garratt, "Magnetism and Electricity in 1832" *Wireless World* 5 (1938).

<sup>568</sup> Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force": p. 405, par. 3253.

<sup>569</sup> L. Pearce Williams, Rosemary Fitzgerald, and Oliver Stallybrass, *Selected Correspondence of Michael Faraday (1849-1866)*, vol. 2 (Cambridge: Cambridge University Press, 1971), Letter 652, Faraday to George Bidell Airy, p. 863, 21 de marzo de 1857.

<sup>570</sup> *Ibid.*, Letter 654, Faraday to James Clerk Maxwell, p. 864, 25 de marzo de 1857.

que supone como evidencia de que Faraday, tan tarde como en 1857, seguía creyendo en el estado electrotónico. De hecho, en relación con este tema conviene señalar también que en 1852 Faraday había acabado con la dualidad entre el estado electrotónico y las líneas de fuerza magnética—dualidad que él había establecido en la Serie 1 de los *ERE* Serie 1— unificando las dos concepciones:

*“Again and again the idea of an **electro-tonic** state has been forced on my mind; such a state would coincide and become identified with that which would then constitute the physical lines of magnetic force”<sup>571</sup>.*

A pesar de estas palabras, Romo sostiene que Faraday no está afirmando una identificación, sino que las líneas de fuerza de Faraday serían un estado dinámico de la fuerza magnética que tendría su fundamento en un estado estático<sup>572</sup> y que ese estado estático sería el estado electrotónico. De este modo se unificarían en estos dos estados magnéticos las fuerzas laterales, tanto las electrostáticas como las corrientes<sup>573</sup>. No obstante, conviene establecer que la interpretación de Romo es demasiado libre, ya que en ningún escrito suyo Faraday distingue dos estados en las líneas de fuerza. Es más, de poseer un estado sería solamente el

---

<sup>571</sup> Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force": p. 413, par. 3269.

<sup>572</sup> Cfr. Romo Feito, "El Concepto De Estado Electro-Tónico En Faraday", p. 244.

<sup>573</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 234-36 y 47.

---

estático<sup>574</sup>. En cambio, resulta más coherente la interpretación de Nersessian según el cual el estado electrotónico había sido en primer lugar un estado de tensión en el conductor, posteriormente – al tratar Faraday de los dieléctricos – pasó a ser la explicación de la repulsión de las líneas de fuerza para, finalmente en los últimos años, convertirse en la tensión en las líneas de fuerza mismas. Es decir, el hecho de que este estado pasó de ser una condición de la materia a una condición del espacio libre de ella<sup>575</sup>.

Volviendo al debate acerca del estatus de las líneas de fuerza magnética, interesa señalar que, según Faraday, en el caso de estas líneas los dos requisitos de la curvatura y la independencia están vinculados. Como afirma en "*On the Physical Character of Lines of Magnetic Force*", si se pudiera probar en el caso de las líneas de fuerza magnética que existe una acción en líneas o direcciones "curvas", esto también probaría su existencia física externa al imán del cual dependen<sup>576</sup>. Por supuesto cabe preguntarse si la disposición de las limaduras de hierro en formas curvas alrededor del imán – que es el modo principal con el que Faraday representa

---

<sup>574</sup> También Williams afirma que las líneas de fuerza magnética no podían tener efectos dinámicos, porque eso violaría el principio de la conservación de la fuerza ya que no se podría explicar de dónde aparece el poder del movimiento en dichas líneas. Por eso dice que Faraday señaló que eran tensiones estáticas. Cfr. Williams, *Michael Faraday: A Biography*, pp. 452-53.

<sup>575</sup> Nersessian, *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, p. 43 y 60.

<sup>576</sup> Cfr. Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force": p. 406, par. 3254.

las líneas de fuerza — no sería prueba suficiente de que son curvas. Sin embargo Faraday rechaza dicho pensamiento porque considera que podría darse el caso de que tal curvatura se debiera a la presencia de las limaduras.

El tema de la curvatura de las líneas de fuerza magnética es un tema complejo. No sólo guarda relación con la independencia de las líneas, sino también con la existencia de los polos de un imán y la distribución de dichas líneas a lo largo del imán, es decir, sobre la naturaleza del imán. Ya antes de 1835 se encuentra recogida una anotación en su cuaderno de notas en la que Faraday afirma que es imposible conseguir un solo polo del imán<sup>577</sup>. Este hecho de la relación intrínseca entre los polos le hace preguntarse a Faraday acerca de la conexión entre dichos polos a través de las líneas de fuerza. En 1851 Faraday publica la Serie 28 de los *ERE*, titulada “*On lines of Magnetic Force, their definite character*”<sup>578</sup>. En este artículo Faraday descubre que la cantidad de electricidad de una corriente es proporcional a las líneas de fuerzas cortadas<sup>579</sup>. El dispositivo que usó para llegar a esta conclusión es el siguiente: un aro de alambre es conectado a un galvanómetro y la aguja del galvanómetro tarda un tiempo en volver a su origen una vez desviada; si en ese tiempo se induce más corriente, la aguja se desvía más aún, partiendo desde la posición en la que estaba

---

<sup>577</sup> Michael Faraday, in *RI MSS F4D* (-1835).

<sup>578</sup> Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, V. 3, pp. 328-70, pars. 3070-176.

<sup>579</sup> *Ibid.*, p. 346, par. 3115.

cuando se desvió por primera vez. Teniendo esto en cuenta, Faraday desplaza el alambre sobre el imán desde una posición externa a dicho imán, de manera que en este movimiento corte las líneas de fuerza. Luego lo vuelve a llevar a la posición inicial fuera del imán y vuelve a pasarlo por encima, y así varias veces, todo ello rápidamente. Cada vez que retrocedía el imán, Faraday apagaba el galvanómetro, de manera que la desviación final de la aguja se debiera solo a los movimientos de acercamiento. De este modo Faraday descubrió que las desviaciones de la aguja del galvanómetro eran proporcionales al número de líneas cortadas. Como señala Fisher, este descubrimiento era de gran importancia, porque si la cantidad de acción eléctrica es proporcional a la cantidad de líneas magnéticas, entonces cada línea magnética debe ser contada como responsable de una determinada parte del efecto total y, por tanto, las líneas magnéticas de fuerza se confirman como “agentes”, cada una incorporando una determinada parte de poder<sup>580</sup>. Por tanto, dado que para estar en “acción” hay que ser de carácter “físico”, Faraday había obtenido una prueba experimental de la existencia física de las líneas de fuerza magnética

Una vez determinado que las líneas de fuerza magnética son físicas conviene recordar que Faraday había sostenido que la existencia de líneas curvas determinaba la participación de partículas contiguas de un medio en la acción a la que las líneas

---

<sup>580</sup> Cfr. Fisher, *Guide to the Experimental Researches in Electricity*, p. 478.

hicieran referencia. Sin embargo, como señala Fisher<sup>581</sup>, esto entra en contradicción con que Faraday mantuviera que se dan líneas de fuerza magnética en el vacío<sup>582</sup>. De tener que compaginar ambas afirmaciones, o bien ahora el espacio juega el papel adscrito antes a la materia, o bien ahora dichas líneas no necesitan de un medio y son portadoras de la acción por derecho propio. Teniendo en cuenta que las líneas de fuerza son agentes a la hora de inducir electricidad en un alambre, parece necesario sostener esto último. Por tanto, como se ha señalado al tratar el artículo de 1852, se ha de abandonar la idea de que solo la materia es un agente físico y admitir que el espacio tiene una condición magnética.

Una vez establecida, la teoría de Faraday acerca de las líneas de fuerzas<sup>583</sup>, que sostiene que estas son líneas como líneas físicas de poder, esenciales tanto para la existencia de las fuerzas dentro del imán como para su ejercicio sobre los cuerpos magnéticos a distancia<sup>584</sup> Faraday va contraponerla con otras tres teorías que explican la naturaleza física de la acción magnética. Él considera que la suya es inconsistente con las otras tres –dado que estas

---

<sup>581</sup> Ibid., p. 572.

<sup>582</sup> Faraday, "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force": p. 408, par. 3258.

<sup>583</sup> Esta teoría estaba empezaba ya a ser justificada matemáticamente: William Thomson comunicó a Faraday dice que las líneas de fuerza daban los mismos resultados matemáticos que la teoría de Coulomb y que lo hacían mediante un análisis más simple.

<sup>584</sup> Cfr. Michael Faraday, "On Some Points of Magnetic Philosophy" *Philosophical Magazine* 9, no. Serie 4 (1855): p. 82, par. 3302.

dependen de la acción a distancia exclusivamente, mientras que en la suya se considera como necesaria la acción del medio para explicar los fenómenos— y que ninguna de ellas es capaz de dar cuenta del diamagnetismo, ni de que el dualismo de la electricidad y el magnetismo estén siempre relacionados, ni de que las dualidades de un imán aislado no están relacionadas mediante líneas rectas a través del imán<sup>585</sup>.

La primera teoría de que trata, que atribuye a Euler, consiste en que la acción magnética se explica mediante éteres que fluyen a través del imán y también en su entorno. La segunda es la que explica la acción magnética a partir de dos fluidos magnéticos que se acumulan en los polos del imán y causan así las atracciones y repulsiones de los cuerpos que distan de ellos. La última teoría que menciona es la de Ampère, en la que se asume la existencia de corrientes eléctricas alrededor del imán y actuando a distancia sobre otras partículas con las mismas corrientes, y de la que critica específicamente que no puede dar cuenta de la relación de los polos de un imán,

*“If the charged and polar state of a magnet be supposed to depend upon molecular electric currents, held by some internal condition in a position of parallelism, it is **impossible that these can act backwards** upon each other through the magnet in straight lines,*

---

<sup>585</sup> Michael Faraday, "Magnetic Remarks" *Philosophical Magazine* 9, no. Serie 4 (1855): p. 255.



*so as to put the northerners and southerners of the pole in mutual dependence*"<sup>586</sup>.

#### 4.4.3.5. ¿Es este "Faraday" el "Faraday" de Hesse?

Existen varios puntos de discrepancia entre la interpretación de Hesse acerca de la obra de Faraday y lo que se ha presentado en este epígrafe.

1. Hesse sostiene que fue el descubrimiento de la inducción electromagnética el que llevó a Faraday a proponer una acción contigua. Si bien es posible que Faraday tuviera en consideración por aquel entonces este modo de entender la acción no fue, como se ha señalado, hasta que desarrolló años más tarde su teoría de la pila voltaica cuando Faraday se enfrentó por primera vez al hecho de que la transmisión de una acción se realizara a través de partículas contiguas, y no a distancia.

2. Hesse afirma que la acción curva es lo que llevó a sostener a Faraday que esta tenía lugar entre partículas contiguas. No obstante, la relación entre estos dos hechos, como se ha visto, varió sustancialmente a lo largo de los años.

3. Hesse sostiene que el abandono de la concepción de que la acción se transmite entre partículas contiguas se debió a que, al tratar acerca de los aislantes y los conductores, Faraday

---

<sup>586</sup> Faraday, "On Some Points of Magnetic Philosophy": p. 98, par. 3333. El subrayado es mío.

encontró una contradicción que no le permitía continuar con dicha afirmación acerca de la acción. Sin embargo, como ha quedado establecido la idea de la acción contigua fue descartada definitivamente mucho después, en el contexto del estudio de la relación entre el magnetismo y la luz.

Es más, Hesse comienza su capítulo acerca de la teoría de campos señalando que el origen de esta está en la hidrodinámica de Euler, lo cual resulta especialmente controvertido si se considera que el científico que acuñó, desarrolló y asentó el concepto de campo<sup>587</sup> afirmó explícitamente, como se ha señalado, que su teoría de campos se diferenciaba claramente de la teoría de Euler.

Por todo esto se puede afirmar que el análisis de Hesse no es lo suficientemente preciso y que esta es la causa que le permite subsumir el resto de modelos fundamentales como modelos matemáticos del modelo fundamental “teoría de campos”. Un análisis más exhaustivo, como el que aquí se ha señalado, muestra, en cambio, que la diferencia entre las fuerzas centrales y las fuerzas entendidas como las entiende Faraday es una diferencia conceptual insalvable.

---

<sup>587</sup> Acerca de su teoría Maxwell escribió a Faraday afirmando que “*nothing is clearer than your description of all sources of force keeping up a state of energy in all that surrounds them, which state by its increase or diminution measure the work done by any change in the system*”: Williams, Fitzgerald, and Stallybrass, *Selected Correspondence*, Letter 670, James Clerk Maxwell to Faraday, pp. 881-82, 9 de noviembre de 1857.

#### 4.5. ¿ES EL SIGLO XIX TAL Y COMO LO PRESENTA HESSE?

Hesse señala que uno de los problemas de la física matemática es el determinar cuánto se puede abstraer de la situación física de manera que se establezca un modelo simple y útil matemáticamente que tenga el mínimo posible de asunciones físicas<sup>588</sup>. El nivel de abstracción es lo que va a determinar el grado de realismo de dicho modelo, ya que para Hesse, el realismo es una descripción literal de un proceso. Este debate ha estado presente a lo largo de todo *Forces and Fields*. El modelo fundamental “corpuscularismo” es el único al que no hace corresponder ningún modelo matemático, solo modelos mecánicos, y aún así, establece una distinción clara entre las explicaciones mecánicas y “*the philosophy underlying mechanical explanations*”<sup>589</sup> en el caso de Boyle, subrayando la importancia de que este filósofo natural no llegó a conclusiones acerca de la naturaleza de la materia. En el modelo fundamental “fuerzas centrales” la importancia de que los modelos tengan una formulación matemática empieza a estar más presente, viéndose como un avance que estas formulaciones permitan aplicar el modelo a otros fenómenos como el magnetismo, la cohesión o la electricidad<sup>590</sup>, y subrayando, de nuevo, que los filósofos naturales,

---

<sup>588</sup> Cfr. Hesse, *Forces and Fields*, p. 189.

<sup>589</sup> *Ibid.*, p. 115.

<sup>590</sup> “*It is proper to speak of the theory [of gravitation] as a ‘model’, for it has the characteristics of a model in being generalisable in such a way that its resulting new*

---

como Newton, no se comprometían con ninguna aseveración acerca de la naturaleza de los procesos que tenían lugar. Es más, en relación a los modos de acción indica que la aplicabilidad de la teoría de las fuerzas centrales así entendida (en su formulación matemática) muestra que no es necesario que los modos de acción tengan un análogo que sea del sentido común como los modelos mecánicos, ya que los modelos matemáticos dotan de inteligibilidad porque son sistemas lógicos coherentes y no porque son fáciles de imaginar o construir. Señala también que, precisamente por ese motivo, aunque posteriormente se siguió haciendo uso de modelos mecánicos, ya no fue porque se relacionaban con un proceso familiar sino porque su estructura era susceptible de ser expresada mediante expresiones matemáticas<sup>591</sup>. De hecho, como se ha visto en este capítulo, los modelos mecánicos quedan subsumidos bajo el “supuesto” modelo fundamental “teoría de campos” y pasan a ser uno de sus subtipos, a saber, los modelos físicos. Pero dichos modelos, como se ha visto, no son tales. Los científicos franceses y los alemanes realizan aproximaciones matemáticas pero toman como punto de partida distintas conceptualizaciones: los franceses toman como primitivo

---

*properties can be compared experimentally with the phenomena: thus, having used the equation  $F = mf$  in the particular case  $F = Mm/r^2$ , the mathematical apparatus associated with it can be exploited and tested in connection with other forms of  $F$ ”:*

Ibid., p. 156.

<sup>591</sup> Cfr. Ibid.

las propiedades individuales de las partículas y los alemanes las interacciones entre dos partículas.

Por otra parte, la teoría del potencial no puede ser equiparada a la de campos solo porque ambas hagan uso de las ecuaciones diferenciales porque, como se ha podido comprobar, el enfoque de la teoría de potencial es el de la integración, es decir, el considerar como primitiva la suma de los elementos que actúan, mientras que la teoría de campos considera como primitivos los elementos.

En cualquier caso, la única teoría del siglo XIX — a la que Hesse más tiempo dedica— que es puramente física (candidata a ser modelo físico y, por tanto mecánico y, por tanto, fundamental) es la de Faraday, quien considera que las explicaciones sobre la transmisión, al contrario que Hesse, sí son fuente de conocimiento, consideración que hace en un contexto en el que se trata acerca del conocimiento científico<sup>592</sup>. Es decir, la única teoría que se ajusta a la teoría de Hesse de los modelos fundamentales, teoría que le llevó a Hesse a considerar que las afirmaciones sobre los modos de acción pertenecen al ámbito de la metafísica, no relega las explicaciones sobre la transmisión de la acción a dicho ámbito. Por tanto, no está justificado, por parte de Hesse, afirmar que las explicaciones sobre modos de acción forman parte de asunciones metafísicas en base a la teoría de modelos que se presenta en *Forces and Fields* si el caso

---

<sup>592</sup> Cfr. Nota al pie 559.

histórico de dicha obra que en principio debería avalar dicha afirmación la contradice.

Por tanto, con respecto a las preguntas con las que se inició este capítulo se puede decir ahora: ¿Es el modelo de las fuerzas centrales un campo matemático que se opone al campo físico de Faraday? No, puesto que el modelo de fuerzas centrales, como señala Faraday, no acepta la necesidad de un medio para la propagación. ¿Es dicho modelo un “campo” en cualquier caso? No, puesto que no depende de las características del medio y sus fenómenos se consideran como instantáneos y no “tomando tiempo”. No tuvieron ningún impacto los desarrollos de la ciencia alemana de la época? Sí que lo tuvieron, puesto que el enfoque matemático que presentaron es el que posteriormente dio lugar a la teoría de Wheeler que Hesse menciona en el capítulo en el que trata acerca de la ciencia moderna, y eso fue posible porque ampliaron el marco conceptual de cómo tratar la teoría de las fuerzas centrales ¿Representa algo que dichos desarrollos se basaran en fuerzas que actúan en línea recta y no en curva siendo que lidian con los mismos fenómenos que Faraday? Sí, representa que pertenece a una tradición matemática y conceptual diferente con herencias irrenunciables, tradición que no se puede hacer converger con otra por motivos de la aceptación de un argumento propio. Cada tradición presenta un modo coherente y relevante de dar cuenta de los fenómenos.

## CONCLUSIONES

En esta tesis hemos estudiado el problema de la acción dentro del contexto de la obra de Mary Hesse *Forces and Fields*. En este contexto el problema de la acción es el problema de la función de los modelos fundamentales en la ciencia.

En el Capítulo 1 se describe el programa de la obra de Hesse. Este programa incluye su presentación de la teoría de los modelos como alternativa a las teorías positivistas y realistas *naïve* de las explicaciones científica; su intención de analizar la función de los modelos a lo largo de la historia de la ciencia; y las conclusiones sobre los modos de acción que presenta al final de su obra, en las cuales se establece que el estatuto epistemológico de los modos de acción no es científico.

En el Capítulo 2 se establece, a partir de los textos de Hesse, una tipología de los modelos y analogías a lo largo de la historia de la ciencia y cuáles son los modos de acción que se asocian a cada uno de ellos. Esta tipología diferencia entre los modelos fundamentales que Hesse considera como los propios de los siglos XVII-XIX y que son aquellos que tienen como propiedad los modos

de acción, y aquellos que no lo son, a saber, las analogías pre-científicas y los modelos matemáticos de la ciencia moderna.

En el Capítulo 3 se actualiza, con respecto al de la época en la que Hesse redacta su obra, el debate acerca de las explicaciones científicas. En el contexto de este debate se introduce la teoría de modelos de Nancy Nersessian, teoría que, teniendo puntos significativos en común con la teoría de modelos de Hesse, no excluye, sino lo contrario, los modos de acción del ámbito de la ciencia.

Por último, el Capítulo 4 se centra en el análisis de la lectura que Hesse hace de la ciencia en el siglo XIX y se compara con tres estudios de caso correspondientes a las tres tradiciones científicas del siglo XIX. Esta comparativa muestra que la lectura de Hesse no es acorde a lo que estos casos presentan acerca de cuáles son los principios fundamentales que rigen dichas tradiciones científicas, principios que determinan el tipo de modo de acción que cada una presupone.

Del estudio anterior se sigue la siguiente conclusión, a saber, que una teoría de modelos de la explicación científica no excluye *per se* los modos de acción del ámbito epistemológico científico. Esta conclusión se articula en una tesis negativa y otra positiva. La tesis negativa concierne a la exclusión por parte de Hesse de los modos de acción del ámbito científico. La tesis positiva consiste en que una teoría de modelos genuina como la de Nersessian sí que permite considerar los modos de acción como científicos.



La exclusión por parte de Hesse de los modos de acción del ámbito científico se debe a dos factores:

(a) Que los modelos fundamentales van perdiendo protagonismo en su análisis de la historia de la ciencia a favor de los modelos matemáticos los cuales no afirman nada acerca de los modos de acción (como se puede comprobar especialmente en la discusión del Capítulo 4).

(b) Que la dependencia de la teoría de modelos de Hesse de la teoría semántica de las explicaciones científicas le induce a una consideración de los modos de acción como no falsables y, por tanto, no pertenecientes al ámbito de la ciencia. Esta dependencia no se hace explícita hasta el final del Capítulo VII, '*Action at a Distance*':

*"The physics of the imponderable elastic fluids was largely qualitative, and their disappearance was accelerated by the increasingly mathematical aspect of theories from the beginning of the nineteenth century onwards. The demand for precision and falsifiability which had been heard in the seventeenth century in regard to Aristotle and Descartes was now heard in connection with the multiplicity of theories of elastic fluids into which almost any combination of phenomena could be fitted by repeated modifications"*<sup>593</sup>.

Hesse había subrayado con anterioridad el hecho de que las teorías de la antigüedad griega eran *ad hoc* y no se podían testar. En este párrafo —ya en el contexto de los modelos fundamentales— realiza una similitud entre dicha situación y la desaparición de las teorías de los fluidos elásticos imponderables a partir del siglo

---

<sup>593</sup> Hesse, *Forces and Fields*, p. 188. El subrayado es mío.

XVIII. Hesse indica que las explicaciones mediante fluidos quedaron obsoletas porque no eran 'falsables', al igual que había establecido que las explicaciones griegas quedaron obsoletas por no ser 'testables'. Pero la noción de 'falsabilidad' no tiene las mismas connotaciones que la noción de 'testabilidad', de la cual Hesse había hecho uso hasta este momento. 'Falsabilidad' conlleva toda la carga de las teorías semánticas de la explicación científica.

Por otra parte, Nersessian sí que permite considerar los modos de acción como científicos porque su teoría de modelos no pertenece a la tradición semántica y, por, tanto, está libre de las restricciones que esta impone sobre el significado de los conceptos, en este caso, el concepto de 'modos de acción'.

## REFERENCIAS

- "Action at a Distance (Abstract)." *Bulletin of the British Society for the History of Science* 1, no. 10. Supplement Number 8 (1954): 257-58.
- Agassi, Joseph. *Faraday as a Natural Philosopher*. Chicago: University of Chicago Press, 1971.
- Aiton, E.J. "The Cartesian Vortex Theory." In *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics. Part A: Tycho Brahe to Newton*, edited by René Taton and Curtis Wilson, 207-21. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- Ampère, A.M. "Mémoire Sur La Théorie Mathématique Des Phénomènes Électrodynamiques, Uniquement Déduite De L'expérience." In *Mémoires De L'Académie Des Sciences De L'institut De France, T. 6, Année 1823*, 175-388. Paris: Institut de France, 1826.
- Ampère, André-Marie. "Sur L'action Mutuelle Entre Deux Courans Électriques, Entre Un Courant Électrique Et Un Aimant Ou Le Globe Terrestre, Et Entre Deux Aimans." *Annales de Chimie et de Physique* (1820): 59-76 y 170-208.
- Archibald, William Thomas. "'Eine Sinnreiche Hypothese': Aspects of Action-at-a-Distance Electromagnetic Theory, 1820-1880." Tesis Doctoral, University of Toronto, 1987.
- Aristóteles. *Aristotle's Prior and Posterior Analytics. A Revised Text with Introduction and Commentary by W. D. Ross*. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 1957.
- — —. *Aristotle on Coming-to-Be & Passing-Away. A Revised Text with Introduction and Commentary by Harold H. Joachim*. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1922.
- — —. *Física*. Translated by Ute Schmidt Osmanczik. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.
- — —. *Física. Edición Bilingüe*. Translated by Ute Schmidt. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.
- Attal, Stéphane "Operator and Spectral Theory. Lectures on Quantum Noise Theory." Institut Camille Jordan, Université Lyon 1.

- Baconis, Roger. *Specula Mathematica in Qua, De Specierum Multiplicatione, Earundemque in Inferioribus Virtute Agitur*. Francofurti: Wolfgang Richter, 1614.
- Bailer-Jones, Daniela M. *Scientific Models in the Philosophy of Science*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2009.
- Baird, Forrest E. *Philosophical Classics, Volume I: Ancient Philosophy*. 6 ed. New York: Routledge, 2016.
- Bartha, Paul. "Analogy in the Natural Science: Meeting Hesse's Challenge." *Philosophical Inquiries* 3, no. 1 (2015): 47-68.
- Bedford, A. *Hamilton's Principle in Continuum Mechanics*. San Francisco, CA: Pitman Advanced Publishing Program, 1985.
- Bennett, J.A. "The Mechanic's Philosophy and the Mechanical Philosophy." *History of Science* 24 (1986): 1-28.
- Black, Max. "Metaphor." In *Proceedings of the Aristotelian Society, New Series, 273-94*: Blackwell Publishing, 1954.
- Blits, Jan H. "Hobbesian Dualism: Hobbes's Theory of Motion." *The Southern Journal of Philosophy* 28, no. 2 (1990): 135-47.
- Blondel, Christine. *Ampère Et La Création De L'électrodynamique (1820-1827), (Ministère De L'éducation National Comités Des Travaux Historiques Et Scientifiques, Mémoires De La Section Des Sciences, 10.)*. Paris: Bibliothèque Nationale, 1982.
- — —. "Sur Les Premières Recherches De Formule Électrodynamique Par Ampère." *Revue d'Histoire des Sciences* 31 (1978): 64-65.
- — —. "Vision Physique 'Éthérienne', Mathématisation 'Laplacienne': L'électrodynamique D' Ampère, La Mathématisation 1780-1830." *Revue d'Histoire des Sciences et leurs Applications* 42 (1989): 123-37.
- Boscovich, Ruggero Giuseppe. *Theoria Philosophiae Naturalis*. Vienna: Officina Libraria Kaliwodiana, 1758.
- Boya, Luis J. "The Thermal Radiation Formula of Planck (1900)." *Revista de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*. 58 (2003): 91-114.
- Boyle, Robert. "About the Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis (Publ. 1674)." In *Selected Philosophical Papers of Robert Boyle*, edited by M. A. Stewart, 138-54. Indianapolis, IN.: Hackett Publishing Company, 1991.
- — —. "About the Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis [Publ. 1674]." In *Selected Philosophical Papers of Robert Boyle*, edited by M. A. Stewart, 138-54. Indianapolis, IN.: Hackett Publishing Company, 1991.
- — —. *The Works of Robert Boyle*. Edited by Michael Hunter and Edward B Davis. 14 vols. London: Pickering & Chatto, 1999.
- Brackenridge, J. Bruce. *The Key to Newton's Dynamics: The Kepler Problem and the Principia. Containing an English Translation of Sections 1, 2, and 3 of Book One from the First (1687) Edition of Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley: University of California Press, 1996.

- — —. "Newton's Mature Dynamics: A Crooked Path Made Straight." In *Isaac Newton's Natural Philosophy*, edited by Jed Z. Buchwald and I. Bernard Cohen, 105-38. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press, 2004.
- Bridgman, Percy W. *The Logic of Modern Physics*. New York: The Macmillan Company, 1927.
- Bridgnes, J. H. , ed. *The 'Opus Majus' of Roger Bacon*. 2 vols. Vol. 1. London: Williams and Norgate, 1900.
- Buchwald, Jed Z. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.
- — —. "Fresnel and Diffraction Theory." *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 33, no. 110 (1983): 36-111.
- Burns, William E. *Science in the Enlightenment. An Encyclopedia*. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO, 2003.
- Burt, Edwin Arthur. *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*. New York: Dover Publications, 2003.
- Callender, Craig, and Jonathan Cohen. "There Is No Special Problem About Scientific Representation." *Theoria* 55 (2006): 67-85.
- Campbell, Robert Norman. *Physics. The Elements*. Cambridge: Cambridge University Press, 1920.
- Caneva, Kenneth L. "Ampère, the Etherians and the Oersted Conexion." *British Journal for the History of Science* 13, no. 44 (1980): 121-38.
- — —. "Colding, Öersted, and the Meanings of Force." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 28, no. 1 (1997): 1-138.
- — —. "From Galvanism to Electrodynamics; the Transformation of German Physics and Its Social Context." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 9, no. 1 (1978): 63-159.
- — —. "Physics and *Naturalphilosophie*: A Reconnaissance." *History of Science* 35, no. 1 (1997): 35-106.
- Cannell, D.M. *George Green: Mathematician and Physicist 1793-1841: The Background to His Life and Work*. London: Athlone Press, 1993.
- Cantor, Geoffrey N., David Gooding, and F.A.J.L. James. *Faraday*. London: Macmillan Education, 1991.
- Cohen, H. Floris. *The Scientific Revolution: A Historiographical Enquiry*. Chicago: Chicago University Press, 1994.
- Cohen, I. Bernard. *The Newtonian Revolution: With Illustration of the Transformation of Scientific Ideas*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
- Colodny, Robert Garland, ed. *Frontiers of Science and Philosophy*. Pittsburgh: The University of Pittsburgh Press, 1962.
- Copérnico, Nicolás. *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Norimbergae: Iohannum Petreium, 1543.
- Coulomb, Charles Agustin. *Collection De Mémoires Relatifs À La Physique*. 2 vols. Vol. 1, Mémoires de Coulomb. Paris: Société Française de Physique, 1884.

- — —. *Mémoires Sur L'électricité Et Le Magnétisme. Extraits Des Mémoires De L'académie Royale Des Sciences De Paris, Publiés Dans Les Années 1785 À 1789*. Paris: Chez Bachelier, 1789.
- — —. "Sur L'électricité Et Le Magnétisme." *Mémoria de l'Academie Royale des Sciences* (1785-1789).
- Craik, Alex D.D. "The Origins of Water Wave Theory." *Annual Review of Fluid Mechanics* 36, no. 1-28. (2004).
- Crawford, Elspeth. "The Concepts of 'Particle' and 'Field' in Michael Faraday's Work, 1831-1845." Tesis Doctoral, University of London, Chelsea Campus, 1985.
- — —. "Learning from Experience." In *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*, edited by David Gooding and F.A.J.L. James, 212-27. Basingstoke: MacMillan Press, 1985.
- Crockett, Timothy. "Continuity in Leibniz's Mature Metaphysics." *Philosophical Studies* 94, no. 1/2 (1988): 119-38.
- Crosland, Maurice. *The Society of Arcueil: A View of French Science at the Time of Napoleon I*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1967.
- Chalmers, Alan. *The Scientist's Atom and the Philosopher's Stone. How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms*. Dordrecht: Springer, 2009.
- Challis, Lawrie, and Fred Sheard. "The Green of Green Functions." *Physics Today* December (2003): 41-46.
- Chang, Hasok, and Nancy Cartwright. "Measurement." In *The Routledge Companion to the Philosophy of Science*, edited by Martin Curd and Stathis Psillos, 367-75. New York: Routledge, 2008.
- D'Alembert, Jean le Rond. "Recherches Sur La Courbe Que Forme Une Corde Tendue Mise En Vibration." *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles-lettres de Berlin pour l'année 1747* (1750): 214-19.
- Darrigol, O., and Uriel Frisch. "From Newton's Mechanics to Euler's Equations." *Physica D: Nonlinear Phenomena* 237, no. 14-17 (2007): 1855-69.
- Darrigol, Olivier. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- — —. "The Electrodynamics of Moving Bodies from Faraday to Hertz." *Centaurus* 36 (1993): 245-360.
- De Broglie, Louis. "Recherches Sur La Théorie Des Quanta." *Annales de Physique* 10, no. 3 (1925): 22-128.
- — —. "A Tentative Theory of Light Quanta." *Philosophical Magazine* 47, no. 278 (1924): 446-58.
- De Groot, Jean. *Aristotle's Empiricism: Experience and Mechanics in the Fourth Century B.C*. Las Vegas: Parmenides Publishing, 2014.
- Descartes, René. *Principia Philosophiae*. Amstelaedami: Ludovicum & Danielem Elzevirios, 1644.
- Dijksterhuis, E.J. *Die Mechanisierung Des Weltbildes*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1956.

- — —. *The Mechanization of the World Picture*. Translated by C. Dikshoorn. Oxford: Oxford University Press, 1961.
- Dijksterhuis, Fokko Jan. *Lenses and Waves. Crhistaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- DiSalle, Robert. *Understanding Space-Time. The Philosophical Development of Physics from Newton to Einstein*. New York: Cambridge University Press, 2006.
- Dobbs, B.J.T. "Newton's Alchemy and His 'Active Principle' of Gravitation." In *Newton's Scientific and Philosophical Legacy*, edited by P.B. Scheurer and G. Debrock, 55-80. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Doncel, Manuel. "Reconsidering Faraday: The Process of the Conversion to His Magnetic Curves." *Physis* 33 (1996): 53-84.
- Duhem, Pierre. *La Théorie Physique. Son Objet Et Sa Structure*. Paris: Chevalier & Rivière, 1906.
- Dulong, Pierre Louis, and Alexis Petit. "Recherches Sur La Mesure Des Températures Et Sur Les Lois De La Communication De La Chaleur." *Annales de Chimie et de Physique* 2, no. 7 (1818): 113-54, 225-64 y 337-67.
- Eddington, Arthur. *The Mathematical Theory of Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press, 1923.
- Einstein, Albert. "Die Grundlage Der Allgemeinen Relativitätstheorie." *Annalen der Physik* 49 (1916): 769-822.
- — —. "The Generalised Principle of Relativity [A. Einstein's Second Paper on the Generalised Principle First Published in 1916]." In *The Principle of Relativity Original Papers*, edited by Albert Einstein and H. Minkowski, 89-164. Calcutta: University Press of Calcutta, 1920.
- — —. "Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality." In *James Clerk Maxwell: A Commemorative Volume 1831-1931*, edited by Cambridge University Press, 66-73. New York: Cambridge University Press, 1931.
- — —. "On the Electrodynamics of Moving Bodies. [Einstein's First Paper on the Restricted Theory of Relativity, Originally Published in the Annalen Der Physik in 1905.]." In *The Principle of Relativity Original Papers*, edited by Albert Einstein and H. Minkowski, 1-34. Calcutta: University Press of Calcutta, 1920.
- — —. "Über Das Relativitätsprinzip Und Aus Demselben Gezogenen Folgerungen." *Jahrbuch der Radioaktivität und Elecktronik* 4 (1907): 411-162.
- — —. "Über Einen Die Erzeugung Und Verwandlung Des Lichtes Betreffenden Heuristischen Gesichtspunkt." *Annalen der Physik* 17, no. 6 (1905): 132-48.
- — —. "Zur Elektrodynamik Bewetger Körper." *Annalen der Physik* 17 (1905): 891-921.
- Erlichson, Herman. "André-Marie Ampère, The "Newton of Electricity" And How the Simplicity Criterion Resulted in the Disuse of His Formula." *Physis* 37, no. 1 (2000): 53-71.

- — —. "Motive Force and Centripetal Force in Newton's Mechanics." *American Journal of Physics* 59, no. 9 (1991): 842-49.
- Faraday, M. "Historical Sketch of Electro-Magnetism. Parts 1 and 2." *Annals of Philosophy* 18, no. Series 2, volume 2, numbers 3 and 4. (1821): 195-200; 74-90.
- Faraday, Michael. In *RI MSS F4D*, -1835.
- — —. "Common Place Book Vol. 2." In *UK0108 SC MSS 002/1/2*, 1813-1824.
- — —. "The Correspondence of Michael Faraday, (1811-1831)." edited by F.A.J.L. James. London: Institution of Electrical Engineers, 1991.
- — —. *Experimental Researches in Electricity*, V. 1-2. New York: Dover Publications, 1965.
- — —. *Experimental Researches in Electricity*, V. 3. New York: Dover Publications, 1965.
- — —. *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*. Edited by Thomas Martin. Vol. IV. 12 de noviembre de 1839 - 26 de junio de 1847. London: G. Bell & Sons, 1933.
- — —. *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*. Edited by Thomas Martin. Vol. I, septiembre de 1820 - 17 de diciembre de 1823. London: G. Bell & sons, 1932.
- — —. *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*. Edited by Thomas Martin. Vol. V, 6 de septiembre de 1847 - 17 de octubre de 1851. London: G. Bell & sons, 1934.
- — —. *Faraday's Diary. Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigations Made by Michael Faraday During the Years 1820-1862*. Edited by Thomas Martin. Vol. VI, 11 de noviembre de 1851 - 5 de noviembre de 1855. London: G. Bell & sons, 1935.
- — —. "Historical Sketch of Electromagnetism." *Annals of Philosophy* 19 (1822): 107-21.
- — —. "Historical Statement Respecting Electro-Magnetic Rotation." *Quarterly Journal of Science* 15 (1823): 288-92.
- — —. "Magnetic Remarks." *Philosophical Magazine* 9, no. Serie 4 (1855): 253-55.
- — —. "On Some Points of Magnetic Philosophy." *Philosophical Magazine* 9, no. Serie 4 (1855): 81-113.
- — —. "On the Lines of Magnetic Force." In *The Royal Institution Library of Science*, edited by Lawrence Bragg and George Porter, 25-28. London: Applied Science Publishers, 1851.
- — —. "On the New Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism." *Quarterly Journal of Science* 12 (1821): 74-96.
- — —. "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force." *Philosophical Magazine* 3, (Serie 4) (1852): 401-28.



- — —. "On the Physical Lines of Magnetic Force." In *The Royal Institution Library of Science*, edited by Lawrence Bragg and George Porter, 60-63. London: Applied Science Publishers, 1852.
- — —. "A Speculation Touching Electric Conduction and the Nature of Matter." *Philosophical Magazine* 24 (1844): 136-44.
- — —. "Thoughts on Ray Vibrations." *Philosophical Magazine* 28, no. Serie 3 (1846): 345-50.
- Fechner, Gustav Theodor. *Ueber Die Physikalische Und Philosophische Atomenlehre*. Leipzig: Hermann Mendelssohn, 1855. Reprint, Para la segunda edición cfr. Fechner 1864. La conversión de Mach al anti atomismo tuvo lugar entre la primera y la segunda edición.
- Feigl, Herbert, Michael Scriven, and Grover Maxwell, eds. *Concepts, Theories, and the Mind-Body Problem*. Vol. II, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1958.
- Feynman, R. P., R. B. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics, Vol. I: Mainly Mechanics, Radiation, and Heat*. Reading, (MA): Addison-Wesley, 1977.
- Fisher, Howard J. *Faraday's Experimental Researches in Electricity. Guide to a First Reading*. 1 ed. Santa Fe, New Mexico: Green Lion Press, 2001.
- Fourier, Joseph. *Théorie Analytique De La Chaleur*. Paris: Firmin Didot, 1823.
- Fox, Robert. "The Rise and Fall of Laplacian Physics." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 4 (1974): 89-136.
- Fraser, Craig G. "D'Alembert's Principle: The Original Formulation and Application in Jean D'Alembert's *Traite De Dynamique* (1743)." *Centaurus* 28, no. 2 (1985): 145-59.
- Freeland, Cynthia. "Aristotle on the Sense of Touch." In *Essays on Aristotle's De Anima*, edited by Amélie Oksenberg Rorty and Martha C. Nussbaum, 227-49. Oxford: Clarendon Press, 1995.
- Fresnel, Augustine. "Elementary View of the Undulatory Theory of Light." *The Quarterly Journal of Science, Literature and Art* 23, no. 1 (1827): 127-41.
- Friedman, Michael. *Kant's Construction of Nature. A Reading of the Metaphysical Foundations of Natural Science*. New York: Cambridge University Press, 2013.
- Furley, David. *The Greek Cosmologists. Volume I. The Formation of the Atomic Theory and Its Earliest Critics*. Surrey: Cambridge University Press, 1987.
- Garratt, G.R.M. "Magnetism and Electricity in 1832." *Wireless World* 5 (1938): 400-01.
- Gauss, C.F. "General Propositions Relating to Attractive and Repulsive Forces Acting in the Inverse Ration of the Square of the Distance." *Scientific Memoirs Selected from the Transactions of Foreign Academies* 3, no. Part X (1843): 153-96.
- Gauss, Carl Friederich. *Allgemeine Lehrsätze in Beziehung Auf Die in Verkehrten Verhältnisse Des Quadrats Des Entfernung Wirkenden Anziehungs- Und Abstossungs-Kräfte*. Leipzig, 1840.

- — —. "Allgemeine Theorie Des Erdmagnetismus." In *Resultate Aus Den Beobachtungen Des Magnetischen Vereins Im Jahre 1838*, edited by Carl Friederich Gauss, 1-57; 146-48. Leipzig, 1838.
- — —. *Theoria Attractionis Corporum Sphaeroidicorum Ellipticorum Homogeneorum Methodo Nova Tractata*. Gottingen, 1822.
- Giere, Ronald N. "How Models Are Used to Represent Reality." *Philosophy of Science* 71, no. 5 (2004): 742-52.
- — —. *Scientific Perspectivism*. Chicago: University of Chicago Press, 2006.
- Gilbert, William. *De Magnete, Magneticisque Corporibus, Et De Magno Magnete Tellure*. 1 ed. London: Peter Short, 1600.
- Gillispie, Charles Coulston. *Pierre-Simon Laplace, 1749-1827: A Life in Exact Science*. Princeton, NJ.: Princeton University Press, 1997.
- Giovanni, Marco Panza. "Lagrange's Theory of Analytical Functions and His Ideal of Purity of Method." *Archive for History of Exact Sciences* 66 (2012): 95-197.
- Giulini, Domenico. *Special Relativity. A First Encounter. 100 Years since Einstein*. New York: Oxford University Press, 2005.
- Glennan, Stuart. "Rethinking Mechanistic Explanation." *Philosophy of Science* 69, no. S3 (2002): 342-53.
- Godfrey-Smith, Peter. *Theory and Reality. An Introduction to the Philosophy of Science, Science and Its Conceptual Foundations*. Chicago: University of Chicago Press, 2003.
- Goldstein, Bernard R. "Copernicus and the Origin of His Helioncentric System." *Journal for the History of Astronomy* 33, no. 3 (2002): 219-35.
- Gooding, David. "Faraday, Thomson and the Concept of the Magnetic Field." *British Journal for the History of Science* 13 (1980): 91-120.
- Gooding, David, and F.A.J.L James, eds. *Faraday Rediscovered. Essays on the Life and Work of Michael Faraday 1791-1867*. Reprint of 1989 ed. Houndmills: MacMillan Press, 1985.
- Gower, B. "Speculation in Physics: The Theory and Practice of *Naturphilosophie*." *Studies in History and Philosophy of Science* 3 (1973): 301-56.
- Grattan-Guinness, Ivor. *Joseph Fourier, 1768-1830*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1975.
- — —. "Why Did George Green Write His Essay of 1828 on Electricity and Magnetism?" *The American Mathematical Monthly* 102, no. 5 (1995): 387-96.
- Green, George. "An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism." In *Mathematical Papers of the Late George Green*, edited by N.M. Ferrers, 1-83, 1828.
- Grosholz, Emily. "Was Leibniz a Mathematical Revolutionary?" In *Revolutions in Mathematics*, edited by Donald Gillies, 353. New York: Oxford University Press, 1992.
- Halvorson, Hans. "Scientific Theories [Preprint]." Princeton University, 2015.

- Hall, Alfred Rupert. *From Galileo to Newton, 1630-1720*. New York: Dover Publications, 1981.
- Hallberg, Margareta. "Mary Brenda Hesse." In *The Dictionary of Twentieth-Century British Philosophers*, edited by Stuart Brown, 406-08. Bristol: Thoemmes Continuum, 2005.
- Harman, P.M. *Energy, Force, and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth Century Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- — —, ed. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell. Vol. I (1846-1862)*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- Hartmann, Stephan, Carl Hoefer, and Luc Bovens, eds. *Nancy Cartwright's Philosophy of Science, Routledge Studies in the Philosophy of Science*. New York: Routledge, 2008.
- Heath, Sir Thomas. *A History of Greek Mathematics. Volume I. From Thales to Euclid*. Vol. I. Mineola, N. Y.: Dover Publications, 1981.
- Heisenberg, Werner. "Über Den Anschaulichen Inhalt Der Quantentheoretischen Kinematik Und Mechanik." *Zeitschrift für Physik* 43, no. 3-4 (1927): 172-98.
- Heitler, Walter. "The Departure from Classical Thought in Modern Physics." In *Albert Einstein Philosopher-Scientist*, edited by Arthur Schilpp, 181-98. New York: MJF Books, 1970.
- Hempel, Carl G. "Two Models of Scientific Explanation." In *Philosophy of Science: Contemporary Readings*, edited by Yuri Balashov and Alexander Rosenberg, 45-55: Routledge, 2002.
- Hempel, Carl G., and Paul Oppenheim. "Studies in the Logic of Explanation." *Philosophy of Science* 15, no. 2 (1948): 135-75.
- Herivel, J. W. *The Background to Newton's Principia: A Study of Newton's Dynamical Researches in the Years 1664-84*. Oxford: Clarendon Press, 1965.
- Hesse, Mary. "Action at a Distance in Classical Physics." *Isis* 46, no. 4 (1955): 337-53.
- — —. *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. New York: Dover Publications, 2005.
- — —. *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. New York: Dover Publications, 1962.
- — —. *Models and Analogies in Science*. Notre Dame, Ind.: University of Notre Dame Press, 1966.
- — —. "Models in Physics." *British Journal for the History of Science* 4, no. 15 (1953): 198-214.
- — —. "Operational Definition and Analogy in Physical Theories." *The British Journal of the Philosophy of Science* 2, no. 8 (1952): 281-94.
- — —. *The Structure of Scientific Inference*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1974.
- Ho, Janet, Richar T. Jow, and Steven Boggs. "Historical Introduction to Capacitor Technology." *IEEE Electrical Insulation Magazine* 26, no. 1 (2010): 20-25.

- Hobbes, Thomas. *Elementorum Philosophiae Section Prima De Corpore*. Londini: Crook, Andrea, 1655.
- Hofmann, James R. "Ampere's Invention of Equilibrium Apparatus: A Response to Experimental Anomaly." *British Journal for the History of Science* 20 (1987): 309-41.
- Holton, Gerald. *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*. Revisited edition. First 1973 ed. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1998.
- Home, Roderick W. "Franklin's Electrical Atmospheres." *The British Journal for the History of Science* 6, no. 2 (1972): 131-51.
- Hooke, Robert. *Lectures De Potentia Restitutiva or of Spring*. London: John Martyn, 1678.
- — —. *Micrographia; or, Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses. With Observations and Inquiries Thereupon*. London: Jo. Martyn and Ja. Allestry, printers of the Royal Society, 1665.
- Huygens, Christiaan. *Traité De La Lumière, Où Sont Expliquées Les Causes De Ce Qui Luy Arrive Dans La Réflexion Et Dans La Réfraction Et Particulièrement Dans L'étrange Réfraction Du Cristal D'islande*. Leyde: p. Van der AA, 1690.
- James, F.A.J.L. *The Correspondence of Michael Faraday (1832-1840)*. Vol. 2. London: Institution of Electrical Engineers, 1993.
- James, Susan. *Passion and Action. The Emotions in Seventeenth-Century Philosophy*. Oxford: Clarendon Press, 1997.
- Jungnickel, Christa, and Russell McCormach. *Intellectual Mastery of Nature. Theoretical Physics from Ohm to Einstein: The Torch of Mathematics 1800-1870*. Vol. 1. Chicago: University of Chicago Press, 1986.
- Kant, Immanuel. *Metaphysische Anfangsgründe Der Naturwissenschaft*. Riga: Johann Friedrich Hartknoch, 1786.
- Kilmister, Clive M. *Eddington's Search for a Fundamental Theory Key to the Universe*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- Kitcher, Philip. "Explanatory Unification." *Philosophy of Science* 48 (1981): 507-31.
- — —. "Explanatory Unification and the Causal Structure of the World." In *Scientific Explanation*, edited by Philip Kitcher and Wesley C. Salmon, 410-505. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989.
- Kitcher, Philip, and Wesley C. Salmon, eds. *Scientific Explanation*. Edited by Ronald N. Giere and Herbert Feigl. Vol. XIII, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989.
- Knuuttila, Tarja. "Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-Based Representation." *Studies in History and Philosophy of Science* 42 (2011): 262-71.
- Kragh, Helge. "Confusion and Controversy: Nineteenth-Century Theories of the Voltaic Pile." In *Nuovo Voltiana: Studies on Volta and His Times*, edited by Fabio Bevilacqua and L. Fregonese, 133-57. Pavia: Università degli Studi di Pavia, 2000.

- Lagrange, Joseph Louis. "Essai D'une Nouvelle Méthode Poru Déterminer Les Maxima Et Les Minima Des Formules Intégrales Indéfinies." *Miscellanea Taurinensia* 2 (1760).
- — —. *Mécanique Analytique*. Paris: Chez La Veuve Desaint, 1788.
- Lang, Helen S. *The Order of Nature in Aristotle's Physics: Place and the Elements*. New York: Cambridge University Press, 1998.
- Laplace, P.S. "Mémoire Sur La Figure De La Terre." In *Oeuvres Complètes De Laplace*, edited by L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels, 3-32. Paris: Gauthier-Villars, 1786.
- — —. "Mémoire Sur La Théorie De L'anneau De Saturne." In *Oeuvres Complètes De Laplace*, edited by L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels, 275-92. Paris: Gauthier-Villars, 1789.
- — —. *Oeuvres Complètes 6. Exposition Du Sytème Du Monde*. Paris: Gauthier-Villars, 1884.
- — —. *Oeuvres Complètes De Laplace*. Edited by L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels. 14 vols. Paris: Gauthier-Villars, 1878-1912.
- — —. *Oeuvres Complètes V. I. Traité De Mécanique Céleste Première Partie*. Paris: Gauthier-Villars, 1878.
- — —. "Recherches Sur Le Calcul Intégral Et Sur Le Système Du Monde." In *Oeuvres Complètes De Laplace*, edited by L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels, 369-477. Paris: Gauthier-Villars, 1776.
- — —. "Recherches Sur Plusieurs Points Du Sytème Du Monde." In *Oeuvres Complètes De Laplace*, edited by L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels, 5-68. Paris: Gauthier-Villars, 1778.
- — —. "Recherches, 1<sup>o</sup>, Sur L'integration Des Équations Différentielles Aux Différences Finies, Et Sur Leur Usage Dans La Théorie Des Hasards. 2<sup>o</sup>, Sur Le Principe De La Gravitation Universelle, Et Sur Les Inégaliés Sécualires Des Plenètes Quen En Dépendent." In *Oeuvres Complètes De Laplace*, edited by L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels, 69-275. Paris: Gauthier-Villars, 1776.
- — —. "Théorie Des Attractions Des Sphéroïdes Et De La Figure Des Planètes." In *Oeuvres Complètes De Laplace*, edited by L'Académie des Sciences par MM. les secrétaires perpétuels, 341-419. Paris: Gauthier-Villars, 1785.
- — —. *Théorie Du Movement Et De La Figure Elliptique Des Planètes*. Paris, 1784.
- — —. *Un Mémoire Sur L'attraction Des Sphéroïdes Elliptiques*. Paris, 1783.
- Legendre, A.-M. "Recherches Sur L'attraction Des Sphéroïdes Homogènes." *Mémoires de mathématique et de physique présentés à l'Académie royale des sciences, par divers sçavans & lûs dans ses assemblées*. Anné 1785 (1783): 411-34.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm. "De Geometria Recondite Et Analsi Indivisibilium Atque Infinitorum." *Acta Eruditorum Anno 1686* (1686): 292-99.
- Liñán, Amable. "Las Ecuaciones De Euler De La Mecánica De Fluidos." In *La Obra De Euler: Tricentenario Del Nacimiento De Leonhard Euler (1703-1783)*,

- edited by Alberto Galindo and Manuel López, 151-77. Madrid: Instituto de España, 2009.
- Lloyd, G.E.R. *Polarity and Analogy. Two Types of Argument in Early Greek Thought*. London: Cambridge University Press, 1966.
- Mach, Ernest. *Popular Scientific Lectures*. Translated by Thomas J. McCormack, *Cambridge Library Collection*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Reprint, from the original of 1895, Chicago: Open Court Publishing.
- Mazlish, Bruce. *The Uncertain Sciences*. New Haven: Yale University Press, 1998.
- McGrew, Timothy, Marc Alspector-Kelly, and Fritz Allhoff, eds. *Philosophy of Science. A Historical Anthology*. Malden: Wiley-Blackwell, 2009.
- Merz, John Theodore. *A History of European Thought in the Nineteenth Century*. Vol. 1. Edinburgh: Blackwood and Sons, 1896.
- Michael, Emily. "Renaissance Theories of Body, Soul, and Mind." In *Psyche and Soma. Physicians and Metaphysicians on the Mind-Body Problem from Antiquity to Enlightenment*, edited by John P. Wright and Paul Potter, 147-72. New York: Oxford University Press, 2000.
- Michelson, Albert A., and Edward W. Morley. "Lviii. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether." *Philosophical Magazine* 24, no. 151 (1887): 449-63.
- Milne, E. A. . *Relativity, Gravitation and the World-Structure*. Oxford: Clarendon Press, 1935.
- Minkowski, H. "Principle of Relativity [H. Minkowski's Original Paper on the Restricted Principle or Relativity First Published in 1909.]" In *The Principle or Relativity Original Papers*, edited by Albert Einstein and H. Minkowski, 1-52. Calcutta: University Press of Calcutta, 1920.
- Molella, Arthur Philip. "Philosophy and Nineteenth-Century German Electrodynamics: The Problem of Atomic Action at a Distance." Ph.D., Cornell University, 1972.
- Mundy, Brent. "Scientific Theory as Partially Interpreted Calculus." *Erkenntnis* 27, no. 2 (1987): 173-96.
- — —. "Scientific Theory as Partially Interpreted Calculus Ii." *Erkenntnis* 28, no. 2 (1988): 165-83.
- Murray, James A. H. "Action." In *A New Dictionary of Historical Principles. Founded on the Materials Collected by the Philological Society*. Oxford: Clarendon Press, 1888.
- Nagel, Ernest. *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanations*. London: Routledge, 1961.
- Nauenberg, Michael. 2015. The Reception of Newton's Principia. En *arXiv:1503.06861*, (Último acceso 16 de abril, 2017).
- Nersessian, Nancy J. *Creating Scientific Concepts*. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 2008.

- 
- — —. "Faraday's Field Concept." In *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*, edited by David Gooding and F.A.J.L. James, 175-87. Basingstoke: MacMillan Press, 1985.
- — —. *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1984.
- — —. "Maxwell and 'the Method of Physical Analogy': Model-Based Reasoning, Generic Abstraction, and Conceptual Change." In *Reading Natural Philosophy. Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics*, edited by David B. Malament, 129-66. Chicago: Open Court, 2002.
- — —. "Mental Modeling in Conceptual Change." In *International Handbook of Research on Conceptual Change*, edited by Stella Vosniadou, 391-416. New York: Routledge, 2008.
- — —. "Model-Based Reasoning in Conceptual Change." In *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, edited by Lorenzo Magnani, Nancy J. Nersessian and Paul Thagard, 5-22. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- Newton, Isaac. *The Mathematical Principles of Natural Philosophy to Which Is Added Newton's System of the World*. Translated by Andrew Motte. New York: Daniel Adee, 1846.
- — —. *The Mathematical Principles of Natural Philosophy to Which Is Added Newton's System of the World*. Translated by Andrew Motte. New York: Daniel Adee, 1848.
- — —. *Opticks, or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light, Great Mind Series*. New York: Prometheus Books, 2003.
- — —. *Opticks: Or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. Also Two Treatises of the Species and Magnitude of Curvilinear Figures*. London: Sam Smith & Benjamin Walford, 1704.
- — —. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Edited by S. Pepys. 1 ed. Londini: Jessu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater, 1687.
- — —. "Vellum Manuscript." In *UCL MS Add. 3955-4007/ Add. 3958.3 45-47*. Cambridge, 1666.
- — —. "Waste Book." In *The Portsmouth Collection. ULC. MS. Add. 4004*. Cambridge, c. 1664.
- Oersted, H.C. "Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle." *Annals of Philosophy* 16, no. Series 1, number 94 (1820): 273-76.
- — —. "Review of Saxtorph 1802-3." *Kjøbenhavnske læerde Efterretninger for Aar 1809* 26-27 (1805): 401-15.
- Örsted, H.C. "Betrachtungen Über Den Elektromagnetismus." *Journal für Chemie und Physik* 32 (1821): 199-231.
- Ørsted, Hans Christian. *Ansicht Der Chemischen Naturgesetze Durch Die Neuen Entdeckungen Gewonnen*. Berlin: Realschulbuchhandlung, 1812.

- — —. "Betrachtungen Über Den Elektromagnetismus." *Journal für Chemie und Physik* 32 (1821): 199-231.
- Pancaldi, Giuliano. "The Physics of Imponderable Fluids." In *The Oxford Handbook of the History of Physics*, edited by Jed Z. Buchwald and Robert Fox, 267-98. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- Planck, Max. "Zur Theorie Des Gesetzes Der Energieverteilung Im Normalspectrum." *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900): 237-45.
- Plato. "Parmenides, Philebus, Symposium, Phaedrus." In *Platonis Opera. Tomus II*, edited by Ionnes Burnet. New York: Oxford University Press, 1901.
- Poincaré, Henri. *Science and Hypothesis*. New York: The Walter Scott Publishing Co, 1905.
- Poisson, Siméon Denis. "Mémoire Sur La Distribution De L'électricité À La Surface Des Corps Conducteurs." *Mémoires* 12 (1811): 1-92, 163-274.
- Portsmouth, Earl of. *A Catalogue of the Portsmouth Collection of Books and Papers Written by or Belonging to Sir Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1888.
- Pourciau, Bruce. "Newton's Argument for Proposition 1 of the Principia." *Archive for History of Exact Sciences* 57, no. 4 (2003): 267-311.
- Pulte, Helmut. "Order of Nature and Orders of Science. On the Mathematical Philosophy of Nature and Its Changing Concepts of Science from Newton and Euler to Lagrange and Kant." In *Between Leibniz, Newton and Kant: Philosophy and Science in the Eighteenth Century*, edited by Wolfgang Lefèvre, 61-92. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- Purinton, Robert D. *Physics in the Nineteenth Century*. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1997.
- Putnam, Hilary. "Intellectual Autobiography of Hilary Putnam." In *The Philosophy of Hilary Putnam*, edited by Randall E. Auxier, Douglas R. Anderson and Lewis Edwin Hahn, 3-110. Chicago, Illinois: Open Court, 2015.
- Ravetz, Jerome R. *Scientific Knowledge and Its Social Problems*. London: Transactions Publishers, 1996.
- Regt, Henk W. *Understanding Scientific Understanding*. New York: Oxford University Press, 2017.
- Reichenbach, Hans. *Philosophical Foundations of Quantum Mechanics*. Berkeley: University of California Press, 1944.
- — —. "The Philosophical Significance of Relativity." In *Einstein's Conception of Reality*, edited by Arthur Schilpp, 289-311. New York: MJF Books, 1970.
- Rennie, R. M., P. Sutcliffe, A. Vorobiev, and A. B. Cain. "Mathematical Modeling of Wind-Tunnel Thermal Behaviour." *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 29, no. 3 (2015): 524-32.
- Rentetzi, Maria. "The Metaphorical Conception of Scientific Explanation: Rereading Mary Hesse." *Journal for General Philosophy of Science* 36 (2005): 377-91.



- Richardson, Alan, and Thomas Uebel, eds. *The Cambridge Companion to Logical Empiricism*. New York: Cambridge University Press, 2007.
- Romo Feito, José. "El Concepto De Estado Electro-Tónico En Faraday." Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 1991.
- Romo, José. "El Concepto De Estado Electro-Tónico En Faraday." Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 1991.
- Salmon, Wesley C. "Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques." *Philosophy of Science* 64, no. 3 (1997): 461-77.
- — —. *Four Decades of Scientific Explanation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2006.
- — —. *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1984.
- — —. "Scientific Explanation: Causation and Unification." *Critica* 22, no. 66 (1990): 3-23.
- — —. "Why Ask "Why"?. An Inquiry Concerning Scientific Explanation." In *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association, vol. 51, n° 6*. San Francisco, California: American Philosophical Association, 1978.
- Schrödinger, Erwin. "Quantisierung Als Eigenwertproblem." *Annalen der Physik* 384, no. 4 (1926): 361-76.
- — —. "An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules." *Physical Review* 28, no. 6 (1926): 1049-70.
- Serfaty, Sylvia. "Lagrange and the Calculus of Variations." *Lettera Matematica* 2, no. 1 (2014): 39-46.
- Shah, Mohd Hazim. "Models, Scientific Realism, the Intelligibility of Nature, and Their Cultural Significance." *Studies in History and Philosophy of Science* 42 (2011): 253-61.
- Shapin, Steven. "Discipline and Bounding: The History and Sociology of Science as Seen through the Externalism-Internalism Debate." *History of Science* 30 (1992): 333-69.
- Silliman, Robert H. "Fresnel and the Emergence of Physics as a Discipline." *Historical Studies in the Physical Sciences* 4 (1974): 137-62.
- Stachel, John. "Development of the Concepts of Space, Time and Space-Time from Newton to Einstein." In *100 Years of Relativity. Space-Time Structure: Einstein and Beyond.*, edited by Abhay Astekar, 3-36. Singapore: World Scientific, 2005.
- Steinle, Friedrich. *Exploratory Experiments. Ampère, Faraday, and the Origins of Electrodynamics*. Translated by Alex Levine. Pittsburgh, PA.: University of Pittsburgh Press, 2016.
- Strevens, Michael. "The Causal and Unification Approaches to Explanation Unified-Casually." *Noûs* 38, no. 1 (2004): 154-76.
- — —. *Depth: An Account of Scientific Explanation*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2008.

- Suppe, Frederick. "Introduction: The Search for Philosophical Understanding of Scientific Theories." In *The Structure of Scientific Theories*, edited by Frederick Suppe, 3-242. Urbana: University of Illinois Press, 1977.
- — —. "Understanding Scientific Theories: An Assessment of Developments, 1969-1998." *Philosophy of Science* 67. Supplement. Proceedings of the 1998 Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association (1998): S102-S15.
- — —, ed. *The Structure of Scientific Theories*. 2nd ed. Urbana: University of Illinois Press, 1977.
- Swenson, Loyd S. *Ethereal Aether. A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930*. Austin: University of Texas Press, 2012.
- Tallarico, James. "Action at a Distance." *The Thomist: A Speculative Quarterly Review* 25, no. 2 (1962): 252-92.
- Thomson, William. "On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies, and Its Connexion with the Mathematical Theory of Electricity." *Reprinted Philosophical Magazine*, 1954. (1842): 1-24.
- Todhunter, Isaac. *A History of the Mathematical Theories of Attraction and the Figure of the Earth: From the Time of Newton to Laplace*. 2 vols. Vol. 2. London: Macmillan, 1873.
- Tuomeli, Raimo. *Theoretical Concepts*. Vol. 10, *Library of Exact Philosophy*. Wien: Springer-Verlag, 1973.
- van Fraassen, Bas. "The Pragmatics of Explanation." *American Philosophical Quarterly* 14, no. 2 (1977): 143-50.
- — —. *The Scientific Image*. Edited by L. Jonathan Cohen, *Clarendon Library of Logic and Philosophy*. New York: Oxford University Press, 1980.
- — —. *Scientific Representation. Paradox of Perspective*. New York: Oxford University Press, 2008.
- — —. *Scientific Representation. Paradox of Perspective*. New York: Oxford University Press, 2008.
- Vanzo, Alberto. "Corpuscularism and Experimental Philosophy in Domenico Guglielmini's 'Reflections' on Salts." In *The Idea of Principles in Early Modern Thought*, edited by Peter R. Anstey, 147-71. New York: Routledge, 2017.
- Watkins, J. W. N. "Confirmable and Influential Metaphysics." *Mind* 68, no. 267 (1958): 344-65.
- Weber, Wilhelm. "Elektrodynamische Maassbestimmungen Insbesondere Uber Die Energie Der Wechselwirkung." *Abhandlungen der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften* 11 (1878): 641-96.
- — —. "Elektrodynamische Maassbestimmungen." *Annalen der Physik und Chemie* 73 (1848): 193-240.
- Weinert, Friedel. "Theories, Models and Constraints." *Studies in History and Philosophy of Science* 30, no. 2 (1999): 303-33.
- Westfall, Richard S. *The Construction of Modern Science; Mechanisms and Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

- — —. *Force in Newton's Physics: The Science of Dynamics in the Seventeenth Century History of Science Library*. London: Macdonald and Co and American Elsevier, 1971.
- White, J. Michael. *The Continuous and the Discrete. Ancient Physical Theories from a Contemporary Perspective*. Reprint in 2002 ed. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1992.
- Whittaker, Edmund. *A History of the Theories of Aether & Electricity*. New York: Dover Publications, 1989.
- Wilson, Curtis. "D' Alembert Versus Euler on the Precession of the Equinoxes and the Mechanics of Rigid Bodies." *Archive for History of Exact Sciences* 37, no. 3 (1987): 233-73.
- Williams, L. Pearce. "Ampère's Electrodynamic Molecular Model." *Contemporary Physics* 4, no. 2 (1962): 113-23.
- — —. *Michael Faraday: A Biography*. London, 1965.
- — —. "What Were Ampere's Earliest Discoveries in Electrodynamics?" *Isis* 74, no. 274 (1983): 492-508.
- Williams, L. Pearce, Rosemary Fitzgerald, and Oliver Stallybrass. *Selected Correspondence of Michael Faraday (1849-1866)*. Vol. 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1971.
- Wise, M. Norton. "Atomism and Wilhelm Weber's Concept of Force." In *Atomvorstellungen Im 19. Jahrhundert*, edited by Charlotte Schönbeck, 57-66. Paderborn: Ferdinand Schöningh, 1982.
- Woit, Peter. *Quantum Theory, Groups and Representations. An Introduction*. Dordrecht: Springer, 2017.
- Woodward, James. *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation, Oxford Studies in Philosophy of Science*. Oxford: Oxford University Press, 2003.



