

Instrumentalismo y la teoría electromagnética de Maxwell

Instrumentalism and Maxwell's electromagnetic theory

José Gustavo Sámano Dávila
Universidad de Guanajuato
rhapsody_91@hotmail.com

Recepción 05-02-2019 • Aceptación 20-11-2019

Resumen

James Clerk Maxwell unificó las leyes experimentales de la electricidad y el magnetismo en un solo cuerpo teórico que simplificó la imagen que se tenía de ambos tipos de fenómenos. Sin embargo, el mismo Maxwell concibió hipótesis que difícilmente serían aceptadas por sus contemporáneos. Bajo argumentos instrumentalistas y pragmáticos, Maxwell desarrolló sus teorías por años. A pesar del origen plenamente instrumentalista de sus teorías, sería casi imposible no ver hoy en la teoría electromagnética una descripción real de los fenómenos eléctricos, por lo que se vuelve un interesante ejemplo de la controversia del realismo científico.

Palabras clave: fenómeno, instrumentalismo, leyes experimentales, realismo, teorías.

Abstract

James Clerk Maxwell unified the experimental laws of electricity and magnetism within a single theory which simplified the image of both kinds of phenomena. However, Maxwell himself created hypotheses that would have hardly been accepted by his contemporary people. With instrumentalist and pragmatic arguments, Maxwell delivered his theories by years. Despite the purely instrumental origin of his theories, it would be almost impossible now not to accept that the electromagnetic theory is a real description of the electric and magnetic phenomena, which makes this an interesting example of the scientific realism controversy.

Key words: Experimental Laws, Instrumentalism, Phenomena, Realism, Theories.

“The only laws of matter are those that our minds must fabricate
and the only laws of mind are fabricated for it by matter”.

James Clerk Maxwell

Realismo científico e instrumentalismo

El realismo científico es la posición filosófica que admite que las teorías científicas empíricamente exitosas describen de manera más o menos precisa el mundo real, independiente del sujeto cognoscente. Mientras más exitosa la teoría, más se puede confiar en el nivel de precisión de la descripción de la realidad: “El *realismo científico* dice que las entidades, los estados y los procesos descritos por teorías correctas realmente existen. Los protones, los fotones, los campos de fuerza y los hoyos negros son tan reales como las uñas de los pies...” (Hacking, 1996: 39).

El instrumentalismo puede ser caracterizado como la posición filosófica que defiende que todas las teorías científicas son sólo *herramientas* de simplificación de la aparente aleatoriedad de los fenómenos, y que no son, ni pretenden ser, descripciones de una realidad que provoca los fenómenos. Para los instrumentalistas, en general, el valor de las teorías científicas está dado por el valor pragmático de las mismas. Las teorías son valiosas, sobre todo, porque representan una *economía intelectual* para el científico: “...las teorías son a lo mucho legítimas, adecuadas, buenos instrumentos de trabajo, aceptables pero increíbles, o qué sé yo” (Hacking, 1996: 46)

El realismo científico se puede caracterizar por tres componentes, según el filósofo griego Stathis Psillos:

1. Un componente metafísico que afirma que el mundo tiene una estructura definida y natural independiente de la mente humana (*Realismo metafísico*).
2. Uno semántico, cuya implicación es que las teorías tienen un valor de verdad determinado por un criterio correspondentista. Es decir, las teorías científicas son verdaderas o falsas según si el mundo es como éstas lo describen o no. Además, el mundo debe estar configurado por las relaciones que éstas establecen y por las entidades que suponen, en el caso de ser verdaderas (*Verdad como adecuación / correspondencia*).
3. El componente epistémico dicta que las teorías más exitosas, o maduras, y bien confirmadas son aproximadamente verdaderas. Esto implica que entre más exitosa una teoría, más cercana es a la verdadera descripción del mundo (*Acercamiento a la verdad*) (1999: XIX).

Un científico realista admitirá, entonces, que existe un mundo independiente del sujeto que lo conoce, que una teoría es verdadera sólo si lo que dice acerca del mundo se corresponde con lo que éste es de hecho y, ante la objeción escéptica de «¿cómo saber si la descripción que la teoría hace del mundo es completa?», el realismo científico responderá que se puede confiar en que entre más exitosa, empíricamente hablando, la teoría más se puede confiar en que la descripción se acerque a la adecuación completa, aún si jamás se logra alcanzar la descripción completa del mundo real.

Para el instrumentalista, sin embargo, esta última objeción no puede ser ignorada. Mediante varios argumentos escépticos, el científico instrumentalista, que no tiene ninguna garantía de que una teoría, por buena que sea, establezca la descripción verdadera, en el sentido correspondentista, de la realidad, y tampoco se tiene alguna manera de obtener certeza del grado ajuste de esa hipotética correspondencia, puesto que teorías muy exitosas del pasado (el flogisto, la teoría geocéntrica de Ptolomeo y hasta la mecánica newtoniana) han resultado ser incorrectas, ha de concluir que el máximo valor

que ha de otorgársele a una teoría es el de servir de herramienta de cálculo y predicción de fenómenos controlados, *sin importar si es posible que representen*, en mayor o menor grado, *una realidad oculta a la experiencia sensible*. De hecho, una de las razones más fuertes para rechazar el realismo científico es, precisamente, que postular un estrato *nouménico* de realidad para explicar las apariencias sensibles supone una tesis metafísica indeseable para el conocimiento científico (Van Fraassen, 1996).

Durante el siglo XIX, algunos filósofos naturales ingleses empezaron a concebir distintas teorías matemáticas que ayudaran a estudiar los diferentes fenómenos físicos que no podían ser tratados con los métodos y teorías de Newton y de la filosofía mecanicista. Por lo que empezaron a construir y aceptar *hipótesis* que no eran consideradas necesariamente verdaderas, pero sí muy útiles para la investigación. Entre estas ideas estaban la hipótesis atómica y la de las líneas de fuerza de Faraday, por mencionar un par de ejemplos. James Clerk Maxwell se guió por una metodología que se puede caracterizar como estrictamente instrumentalista y, mediante estas tesis, llegó a construir la teoría definitiva que unificaría los fenómenos de la electricidad y el magnetismo.

Por otro lado, décadas después de la muerte de Maxwell y ante el éxito de la teoría electromagnética, los científicos y filósofos se empezarían a preguntar si, en efecto, las leyes de Maxwell constituirían la descripción *verdadera* de los fenómenos electromagnéticos, o si sólo representaban una economía intelectual para el investigador.

Las leyes de Maxwell

James Clerk Maxwell fue un físico escocés. Nació el 13 de Junio de 1831 y falleció el 5 de Noviembre de 1879. Actualmente es considerado uno de los más grandes físicos de todos los tiempos, y sus teorías sobre electricidad y magnetismo se encuentran entre las más fundamentales de la física; en el campo del electromagnetismo, su estatus es comparable al de Isaac Newton. Además de trabajar en la síntesis de la teoría electromagnética, Maxwell también desarrolló

la teoría cinética de gases, trabajó sobre la teoría del calor, explicó la estabilidad de los anillos de Saturno y la naturaleza de la luz, predijo la existencia de ondas electromagnéticas, entre otras cosas (Harman, 1998).

Su principal contribución a la física fue su trabajo teórico acerca de los fenómenos electromagnéticos. Durante las primeras cinco décadas del siglo XIX se desarrollaron importantes avances en la investigación de éste tipo de fenómenos. Poisson, Ohm, Oersted, Ampère y Faraday, entre otros, realizaron una gran cantidad de observaciones y experimentos que sentaron las bases del trabajo de Maxwell. Ampère, Faraday y Gauss desarrollaron las primeras versiones de lo que más tarde se conocerían como las *leyes de Maxwell*, mismas que constituyen el principal contenido de su teoría, junto con la noción de *campo electromagnético*. Para entender el alcance e importancia de sus teorías, es necesario hacer un rápido repaso histórico acerca de los principales conceptos implicados en la evolución de la física del siglo XIX. Una vez analizadas, se podrá entender la radicalidad de las ideas de Maxwell y, con base en esto, se podrá comprender su importancia desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia.

El primer abordaje científico serio acerca de los fenómenos de la electricidad y el magnetismo fue el libro *De magnete*, publicado en 1600, por el inglés William Gilbert. En esta obra, Gilbert analiza todos los fenómenos de este tipo conocidos hasta entonces, y hace una diferenciación entre fenómenos eléctricos y magnéticos: los primeros pueden ejemplificarse por el fenómeno que sucede al momento del frotamiento de la seda y el ámbar, mismos que empiezan a atraer pequeños trozos de otros materiales o bien repelerlos; y los segundos por la atracción del hierro por medio de la magnetita, que no requiere frotamiento. Mientras las observaciones y descripciones de Gilbert son exactas, sus explicaciones caen dentro de la tradición naturalista y con tendencias mágicas y animistas del Renacimiento, aunque su influencia llegaría a Kepler, Galileo y Newton. Lo importante es que Gilbert inaugura una tradición que *ve* dos tipos distintos de fenómenos y se tardará al menos 200 años en empezar a visualizar la relación entre ambos.

A partir del trabajo de Galileo Galilei, René Descartes y, sobre todo, de Isaac Newton, los filósofos naturales empiezan a trabajar bajo las directrices filosóficas del *mecanicismo*, una doctrina que dice que todos los fenómenos naturales encuentran su explicación última en la materia y el movimiento de ésta: en otras palabras, la realidad no es más que materia y movimiento. A partir de Newton, sin embargo, también se incluyen las *fuerzas* como un componente más del mecanicismo. Así pues, toda aleatoriedad de los fenómenos podrá reducirse a una explicación de la materia, su movimiento y las fuerzas implicadas. Para Newton y sus seguidores, la fuerza (lo que modifica la velocidad de un cuerpo con movimiento uniforme rectilíneo o en estado de reposo) puede ser *acción a distancia*, como la fuerza de gravedad. Para los cartesianos y algunos otros, como Leibniz, la fuerza a distancia será una especie de *causa oculta*, que Newton es incapaz de explicar (Westfall, 1980).

En cuanto a los fenómenos eléctricos y magnéticos, estos fueron estudiados al margen del mecanicismo, por la incapacidad de aplicar las leyes de la mecánica a los fenómenos de esta clase. Así que una buena parte de los estudiosos del tema invocaban la existencia de *fluidos* para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos. Por ejemplo, Benjamin Franklin creía que podría atrapar el fluido eléctrico en un frasco, lo cual lo llevó a su famoso experimento con la cometa; el mismo principio llevó al invento de la botella de Leyden. La tradición de explicar los fenómenos mediante *fluidos imponderables*, es decir, mediante una especie de materia *continua*, pero sin las características comunes de la materia o de otros fluidos, como los gases o los líquidos, era un recurso común en el siglo XVIII. En la química se trabajaba con la hipótesis del flogisto; también se concibió la hipótesis del calórico, para tratar de explicar los fenómenos del calor y la temperatura; en óptica se empezó a trabajar con el *éter*, una entidad teórica que no se desechó hasta bien entrado el siglo XX; etcétera.

Tras la invención de la pila de Volta, por Alessandro Volta, presentada ante la Royal Society en 1800, las investigaciones sobre la electricidad, el magnetismo y el *galvanismo*, pronto se multiplicaron y se hicieron más complejas. Hasta entonces, tan sólo se podía

trabajar con cargas electrostáticas, es decir, cargas en reposo. Pero con la invención de la pila voltaica se pudo trabajar con corrientes, o *flujos* constantes de electricidad. A partir de entonces, los progresos fueron bastante rápidos.

La electrostática tenía como base la ley de Coulomb, descubierta experimentalmente por Charles-Augustin de Coulomb, en 1785, y cuya forma era la de una ley del cuadrado de la distancia,¹ $f = ke \frac{q_1 q_2}{r^2}$, análoga a la ley de gravitación universal². Los franceses, por tal motivo, pretendían encontrar leyes generales de la electricidad y el magnetismo, que tuvieran esta misma forma, lo cual garantizaba que habría una explicación mecanicista y matemática del fenómeno. Es decir, se pensaba en la acción de las fuerzas eléctricas y magnéticas como fuerzas a distancia, análogas a la fuerza de gravedad.

Hans Oersted demostró, en 1819, que una corriente eléctrica que fluye por un alambre conductor podía desviar la aguja de una brújula que estuviera muy cerca del alambre, lo cual implicaba que una corriente eléctrica podía generar un efecto magnético.

Físicos como Ampère y Poisson trabajaron en desarrollar una teoría matemática que pudiera sistematizar en un solo cuerpo teórico los nuevos fenómenos y los ya conocidos. Además, generaron nuevos experimentos y leyes experimentales que expresaban, matemáticamente, sus resultados (Braun, 2014). De estas leyes, la más importante es la ley de circuitos de Ampère, enunciada en 1826, por André-Marie Ampère. Esta ley nos permite calcular la intensidad del campo magnético en una trayectoria cerrada irregular, o regular, que se genera alrededor de un cable por el que pasa una corriente. Es decir, es la expresión matemática del experimento de Oersted. Si se supone la trayectoria irregular, ésta se puede dividir en segmentos cortos de longitud Δl . Si se multiplica cada uno de esos segmentos por el componente del campo magnético paralelo a ese segmento,

1 Donde q_1 y q_2 son dos cargas que se encuentran a una distancia r , y ke es una constante conocida como *constante de Coulomb*, cuyo valor en unidades del Sistema Métrico (SI) es de $8.9875 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. La fuerza f puede ser de atracción o repulsión dependiendo del signo de las cargas. La constante de Coulomb es también la constante de la energía eléctrica o del campo eléctrico.

2 Universalmente conocida, pero aún así vale la pena mostrarla: $f = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$.

que se expresa como $B \cdot dl$, de acuerdo a Ampère, la suma de dichos productos sobre la trayectoria cerrada es igual a μ_0 veces la corriente neta I que pasa a través de la superficie rodeada por la trayectoria cerrada (Serway, R. & Faughn, J., 2005: 347-348). Su expresión matemática completa es:

$$\sum B_{\parallel} \Delta l = \mu_0 I$$

En pocas palabras, la ley de Ampère nos dice que una corriente eléctrica fluyendo a través de un alambre recto siempre genera un campo magnético, y su forma matemática nos ayuda a calcular la intensidad de dicho campo B .

El siguiente gran paso fue dado por Michael Faraday. Considerado por Maxwell como la máxima autoridad en física experimental y en las investigaciones sobre electricidad y magnetismo, Faraday realizó un gran número de experimentos, mismos que lo convierten en el mayor genio experimental de la historia de la ciencia. Dos de sus contribuciones más importantes fueron el concepto de *líneas de fuerza*, de las que Maxwell derivaría el concepto de *campo*,³ junto con J. J. Thompson y Weber, y la *ley de inducción de Faraday*. Además de demostrar la *polarización de la luz* mediante experimentos.

Faraday comenzó a desarrollar el concepto de *línea de fuerza* como un instrumento para *imaginar* las fuerzas magnéticas y eléctricas en acción. Ésta idea fue sugerida, además, por la experiencia: cuando se ponen limaduras de hierro en un papel y debajo de éste se pone un imán, las limaduras de hierro forman un patrón de líneas que parecen ir de un polo al otro. Análogamente, Faraday intenta explicar la acción de las fuerzas eléctricas y magnéticas *mediante* esas líneas. Poco a poco, Faraday empezará a creer que dichas líneas son *reales* y no tan sólo una herramienta que facilita el imaginar los mecanismos que rigen a los fenómenos.

3 La palabra *campo* fue utilizada por primera vez por Michael Faraday en 1845 para referirse al campo magnético. Thompson utilizó el término *campo de fuerza* en 1849 y fue James Clerk Maxwell quien utilizó el término *campo electromagnético* en 1865 (Harman, 1982: 72).

Por otro lado, Faraday se hace la siguiente pregunta: si una corriente eléctrica puede generar un campo magnético, ¿es posible que un *flujo* magnético genere corriente eléctrica? En efecto, experimentalmente, Michael Faraday logra obtener una corriente eléctrica de un campo magnético, o más precisamente, de *la variación en el tiempo del flujo magnético*. Por lo tanto, pensaba Faraday, la electricidad y el magnetismo debían estar relacionados. En efecto, si se enrolla un cable en espiras (una bobina) y se pasa un imán por el centro de ellas, el cambio relativo de la posición de ambos producirá una corriente eléctrica *inducida*.

Si un circuito contiene N espiras enrolladas y el flujo (magnético) a través de cada espira cambia en la cantidad de $\Delta\Phi_B$ durante el intervalo Δt , la fem inducida promedio en el circuito durante el tiempo Δt es $\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$

Éste es un enunciado de la ley de Faraday de la inducción magnética (Serway & Faughn, 2005: 370).

En la ley de inducción de Faraday descansa el principio que hace posible la existencia de los transformadores. Así que, a partir de los experimentos de Michael Faraday, fue posible obtener cantidades de corriente mucho mayores que las disponibles con las baterías de entonces. Además, quedaba asentado el terreno para sintetizar los fenómenos eléctricos y magnéticos bajo un mismo esquema o sobre los mismos principios.

La ley de Gauss también forma parte de las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, existe una ley de Gauss para la electricidad y otra para el magnetismo. Estas leyes, describen la intensidad de los campos y de los flujos eléctricos y magnéticos a través de las superficies que rodean a las cargas.

La ley de Gauss para la electricidad, enunciada en 1835 por Carl Friedrich Gauss, establece que “el flujo eléctrico que atraviesa cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta Q en el interior de la superficie dividido entre ϵ_0 ” (Serway & Faughn, 2005: 233):

$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Teóricamente, la ley del Gauss describe la forma del campo eléctrico alrededor de una carga estática, por lo que se le puede considerar una generalización de la ley de Coulomb; es decir, la ley de Coulomb se puede deducir de la ley de Gauss para el campo eléctrico.

Finalmente, la ley de Gauss para el campo magnético indica que no existen monopolos magnéticos. Si se imagina los campos como constituidos por las líneas de fuerza de Faraday, el campo eléctrico en la vecindad de una carga electrostática se podría representar como líneas que salen de la carga puntual hacia afuera, indicándose con una flecha su dirección. Cuando las líneas se alejan de la carga se dice, por convención, que la carga es positiva; cuando las líneas se dibujan hacia el interior de la carga puntual, se dice que la carga es negativa. Las cargas eléctricas son de esos dos tipos, positivas y negativas; las cargas de un mismo tipo se repelen y las de signo opuesto se atraen. Con las líneas de fuerza de Faraday se puede *visualizar* un mecanismo que lo explica: las líneas de fuerza que salen de la carga positiva terminan en una carga negativa; pero las mismas se encontrarían y se doblarían al encontrarse con una carga del mismo signo.

Un imán no tiene cargas positivas o negativas, tiene *polos*, que se han designado como *norte* y *sur*. Si se parte un imán, resultarán dos piezas con sus respectivos polos norte y sur, indefinidamente. Si se piensa en las líneas de fuerza de Faraday, esto quiere decir que las líneas parten de uno de los polos del imán y terminan en el otro polo. Sin embargo, a diferencia de las cargas eléctricas, la ley de Gauss para el campo magnético nos dice que, simple y llanamente, no puede existir ningún polo que exista aislado de su otro polo; en otras palabras, las líneas de fuerza nacen y mueren en el mismo *punto*.

Otra forma de expresar la ley de Gauss para el magnetismo es decir que el *flujo magnético* neto exterior de cualquier superficie cerrada es igual a cero, lo cual es equivalente a la expresión usada más arriba.

Las cuatro leyes expuestas hasta aquí son las formulaciones más simples de lo que se conocen como las leyes de Maxwell. Sin embargo, el físico escocés logró generalizarlas matemáticamente, de manera que constituyeran las bases de su teoría electromagnética: en otras palabras, estas leyes se volvieron los principios generales de un sistema teórico complejo que lograba sistematizar todos los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos en una sola estructura lógica impecable, tal como lo había hecho Newton para los fenómenos mecánicos.

Sin embargo, James Clerk Maxwell realizó esta síntesis del electromagnetismo guiado por razones tanto filosóficas como metodológicas. Sus reflexiones acerca de la naturaleza, de la ciencia y de la relación de la física con las matemáticas fueron determinantes para que éste lograra alcanzar su objetivo. Las consideraciones acerca de la *realidad* de ciertos elementos de su teoría son, como se verá más adelante, fundamentales para entender el desarrollo histórico de la teoría electromagnética.

El instrumentalismo del siglo XIX

Se puede afirmar, a grandes rasgos, que desde Copérnico hasta Newton, existió un espíritu realista que acompañó al desarrollo de la física. Es decir, el realismo científico fue una meta legítima de la investigación científica: los filósofos naturales aspiraban a encontrar la verdadera descripción de la naturaleza, sus fundamentos últimos de explicación o la verdadera imagen de la realidad. Existió un optimismo epistemológico en el primer siglo de existencia de la ciencia moderna y, por extensión, de la física. Los fundamentos filosóficos, tanto epistemológicos como metafísicos, coinciden en gran parte con lo expuesto sobre Galileo Galilei en el subcapítulo anterior.

Fue, sin embargo, precisamente en el punto culminante del desarrollo de la dinámica en el que este optimismo llegó a cuestionarse. En el siglo XVI, la filosofía mecanicista, expuesta por Descartes en sus *Principios Filosóficos*, postulaba que los fenómenos que se presentaban ante la experiencia serían explicables tan sólo en términos de la materia y el movimiento de ésta. Para todos los fines

prácticos, existía, pues, un compromiso ontológico-epistemológico: la verdadera realidad que subyace a los fenómenos es la materia y el movimiento, por lo que una explicación verdadera se alcanzaría sólo cuando una explicación se constriñera a estos conceptos. Proponer una hipótesis que no cumpliera con esta condición implicaba el rechazo por la comunidad científica y conllevaba la condena de la misma por recurrir a «causas ocultas».

Precisamente, durante el siglo XVIII, en los campos de la óptica, la electricidad, el magnetismo y la química, por mencionar sólo algunos, se recurría a la explicación de los fenómenos mediante entidades imperceptibles, como los fluidos *imponderables*. El calor se consideraba un efecto del fluido imponderable llamado *calórico*; antes de Lavoisier, un fluido imponderable invocado en las investigaciones químicas era el *flogisto*; en óptica, el *éter* era un fluido de la misma naturaleza imponderable que los anteriores, en el cual se desplazaban las ondas luminosas, según la teoría ondulatoria de Huygens, quien la recuperó del trabajo de Thomas Young.

El mismo Thomas Young escribía en su libro *On the theory of light and colors* ideas claramente instrumentalistas:

A pesar de la invención de hipótesis plausibles, independientes de cualquier conexión con observaciones experimentales, pueden ser de muy poco uso en la promoción del conocimiento natural, sin embargo, el descubrimiento de principios uniformes y simples, por los cuales un gran número de fenómenos aparentemente heterogéneos son reducidos a leyes universales y coherentes, deben ser siempre permitidos de ser de considerable importancia para la mejora del intelecto humano. (1802/1981: 47)

Ante la proliferación de diversas hipótesis que trataban de explicar la naturaleza de la luz, entre las que figuraban la corpuscular de Newton, la ondulatoria de Young y la de los torbellinos de Descartes⁴, la emergencia de una actitud sinceramente escéptica fue

4 Sobre la polémica entre las teorías cartesianas y newtonianas sobre la naturaleza de la luz véase (Aboites, 2014).

inevitable. Esta misma actitud se continuará manifestando en diferentes áreas de la física, sobre todo las que atañen a los conceptos de *línea de fuerza*, *campo*, *éter* y *átomo*. La misma teoría ondulatoria de la luz, que ganaría adeptos después de la obra de Huygens, tendría que esperar algunas décadas antes de ser aceptada por la mayoría de los investigadores, y posteriormente reformada por Maxwell.

La evolución de las ideas de Maxwell en el campo del electromagnetismo pueden ser seguidas a través de sus obras: *On Faraday's lines of force*, de 1855; *On physical lines of force*, publicadas entre 1861 y 1862 y *A dynamical theory of the electromagnetic field*, de 1864. En estas tres obras, es evidente una evolución en las tesis presentadas, sobre todo en función del *realismo* y el *instrumentalismo* bajo el cual debían ser interpretadas las teorías del físico. En general, puede hablarse de una actitud meramente *instrumentalista*, aunque guiada por una preocupación realista genuina. En su trabajo más influyente, *A treatise on electricity and magnetism*, dichas consideraciones, estrictamente filosóficas y metodológicas, fueron desechadas en aras de una exposición más técnica, lo cual ha dejado la impresión de que el trabajo de Maxwell fue sistemático desde un inicio y, más importante para el actual trabajo, que no dependía de consideraciones extracientíficas o filosóficas.

En *On Faraday's lines of force*, James Clerk Maxwell intenta hacer un modelo geométrico de la electricidad y el magnetismo, basado en las ideas de Michael Faraday, en especial el concepto de *líneas de fuerza*. En *Experimentos sobre la electricidad y el magnetismo*, Michael Faraday indicaba que las líneas de fuerza son un buen modo de *representar* la transmisión de fuerzas electromotrices, imaginando que las líneas representan tanto la dirección como la intensidad de las fuerzas magnéticas y eléctricas (1839-55/1922).

El trabajo de Michael Faraday fue determinante para el desarrollo de la teoría electromagnética de Maxwell. Faraday fue uno de los más grandes genios experimentales que ha dado la física y la química; sin embargo, al ser de origen humilde no tuvo acceso a educación matemática avanzada, por lo que sus trabajos publicados no están elaborados en el lenguaje del cálculo más abstracto que se acostumbraba a desarrollar a partir de las grandes aportaciones

matemáticas de Lagrange, Laplace y Gauss, entre muchos otros. De la misma manera, el mismo Faraday fue autodidacta en cuestiones de electricidad y magnetismo. Hizo sus investigaciones sobre éste último tópico por su cuenta, aunque influido por las investigaciones de su maestro, Humphry Davy (Carmona, 2016). Éste desarrollo intelectual le permitió a Faraday desarrollar un trabajo que poco se parecía al desarrollado por otros físicos, como Ampère, y que además estaba desligado de cualquier prejuicio o teoría preconcebida, permitiéndole expresar solamente lo que los fenómenos le mostraban.

En una carta a Ampère, Faraday escribía:

Soy naturalmente escéptico en materia de teorías y por lo tanto usted no debe molestarse conmigo por no admitir lo que usted ha anticipado de inmediato. Su ingenio y aplicaciones son asombrosas y exactas, pero yo no puedo comprender cómo son producidas las corrientes y, particularmente, si se debe suponer que existan alrededor de cada átomo o partícula, así que esperaré por pruebas adicionales de su existencia antes de admitirlas finalmente (Siegel, 1991: 8).⁵

A pesar de su escepticismo, el mismo Faraday llegaría a admitir la existencia de las líneas de fuerza, y llegaría a construir una teoría electromagnética haciendo uso de este concepto, junto al de *estado electrotónico*.⁶ Estos conceptos y el método de Faraday serán los elegidos para el estudio de Maxwell, afirmando su primacía sobre los de cualquier otro estudioso del tema. Clerk Maxwell afirmaba que los métodos de Faraday eran también matemáticos, aunque sus resultados no fueran expresados según los utilizados por los más eminentes

5 Todas las traducciones son mías.

6 Sobre el concepto de estado electrotónico, que no vale la pena exponer aquí, se recomienda la lectura de la tesis doctoral de José Romo Feito "El concepto de estado electro-tónico en Faraday", de la Universidad de Barcelona (Romo, 1991). Disponible para consulta en línea.

matemáticos; las líneas de fuerza constituían una representación geométrica, y la geometría era también una forma de matemática.⁷

Bajo esas consideraciones, Maxwell escribe una serie de reflexiones tanto epistémicas como metodológicas acerca del trabajo que ha de exponer:

El primer proceso, por lo tanto, es el estudio efectivo de la ciencia, debe ser uno de simplificación y reducción de los resultados en la previa investigación a una forma en la cual la mente pueda asirla. Los resultados de esta simplificación pueden tomar la forma de una fórmula matemática pura o de una hipótesis física. (1855/1965: 155)

En este último párrafo, Maxwell muestra la principal dicotomía existente en la práctica científica del siglo XIX. Por un lado, en el siglo XIX, era una tarea del científico expresar leyes experimentales en forma matemática; por otro, había que encontrar la verdadera *explicación* de los fenómenos. Muchas veces, dichas actividades eran desarrolladas de manera completamente independiente e, incluso, excluyente. En efecto, fue durante el siglo XIX que se empezó a generar la brecha entre científicos experimentales y teóricos; estos últimos tenían la misión de elaborar las teorías matemáticamente, sin esto último una teoría no podía considerarse satisfactoria (Siegel, 1991).

James Clerk Maxwell abogará por un “método de investigación” que le permita generar una “concepción física clara” del fenómeno estudiado, pero sin estar “comprometido” con ninguna hipótesis física particular (1855/1965: 156). Ésta estrategia le otorgará una libertad conceptual para generar diferentes hipótesis que le permitan

7 “It is true that no one can essentially cultivate any exact science without understanding the mathematics of that science. But we are not to suppose that the calculations and equations which mathematicians find so useful constitute the hole of mathematics. The calculus is but a part of mathematics, the geometry of position is an example of mathematical science established without the aid of a single calculation. Now Faraday’s line’s of force occupy the same position in electromagnetic science that pencils of lines do in geometry of position. They furnish a method to building up an exact mental image of the thing we are reasoning about” (Maxwell, 1864/1996: 1-2).

concebir o imaginar los mecanismos que puedan explicar, en algún grado, los fenómenos electromagnéticos, pero sin tener que defender el contenido veritativo de dichas hipótesis; es decir, Maxwell defiende un método de explicación *ex hypothesi*, como si fuera el caso. Lo cual le desprende de cualquier compromiso explicativo y, en todo caso, ontológico con la teoría o hipótesis expuesta.

[...] espero hacer evidente que no pretendo establecer ninguna teoría física de una ciencia en la que difícilmente he hecho un solo experimento, y que el límite de mi diseño es ver cómo, mediante la estricta aplicación de las ideas y métodos de Faraday, la conexión de diferentes clases de fenómenos, los cuales él ha descubierto, pueden ser claramente presentados ante una mente matemática. (1855/1965: 157-58).

Maxwell basa su método en “analogías físicas” (156). Para generar una idea fructífera, la proposición de *modelos*, aunque improbables, puede ayudar a resolver problemas del investigador, reformular preguntas, arrojar nuevos problemas, etcétera. El valor de dichos modelos estará en la *utilidad* que muestren al investigador y al experimentador. En otras palabras, sugerir hipótesis y teorías para tratar de sistematizar la aparente heterogeneidad de los fenómenos siempre será de alguna utilidad. En esto reside el valor de «imaginar hipótesis»:

¿Cuál es, pues, el uso de imaginar un estado electrotónico del cual no se tiene una distinguida concepción física, en lugar de una fórmula de atracción la cual podemos entender enseguida? He de responder que es una buena cosa el tener dos maneras de ver en una cuestión y admitir que existen dos formas de ver las cosas (1855/1965: 208).

En efecto, los científicos franceses buscaban una teoría de la electricidad y el magnetismo que fuera compatible con la mecánica newtoniana, y veían fuerzas a distancia y espacio vacío ahí donde Michael Faraday y James Clerk Maxwell veían la acción de un medio.

Sin embargo, la mera expresión matemática de un fenómeno, tal como la ley de Coulomb, no arrojaba mucha explicación acerca del fenómeno en sí: de la realidad subyacente al mismo. La ley de Coulomb puede ser interpretada como fuerzas de atracción y/o repulsión a distancia o bien puede ser interpretada bajo la suposición de que la fuerza actúa mediante un campo (eléctrico). En ambos casos, los resultados deberán ser los mismos. Maxwell razona que, si ese es el caso para las demás leyes experimentales de la electricidad y el magnetismo, entonces nada impide desarrollar una multiplicidad de modelos que expliquen, o que traten de hacerlo, las diferentes leyes encontradas. El verdadero valor del modelo recaerá en su capacidad de síntesis, pero en todo caso su estatus de verdad no podrá ser defendido. Estos modelos son, meramente, *ficciones* que el teórico fabrica esperando obtener alguna utilidad: deberá servir de “guía al experimentador, pero sin impedir el progreso de la verdadera teoría cuando ésta aparezca” (Clerk Maxwell, 1855/1965: 208).

Su siguiente trabajo importante en electromagnetismo, *On physical lines of force*, supone otorgarle cierto grado de realidad a las líneas de fuerza de Faraday, por lo que iniciará definiéndolas, aunque de manera pragmática.⁸ Si bien Clerk Maxwell no afirma con total seguridad la realidad de las líneas de fuerza, sí deja que el lector se persuada de esa posibilidad. Al hablar sobre las líneas de limadura de hierro, Maxwell escribe: “Esta bella ilustración de la presencia de fuerza magnética, permitida mediante la experimentación, naturalmente tiende a hacernos pensar en las líneas de fuerza como algo real” (1861-2/1965: 451).

En *Sobre las líneas de fuerza de Faraday*, Clerk Maxwell sigue un estilo de exposición matemático similar al de su mentor, William Thompson, más conocido como Lord Kelvin. Sin embargo, en *Sobre las líneas de fuerza físicas*, Clerk Maxwell muestra algunos

8 “Suppose that the direction of the force at any point is known, then, if we draw a line so that in every part of its course it coincides in direction with the force at that point, this line may be called a *line of force*, since it indicates the direction of the force in every part of its course.

By drawing a sufficient number of lines of force, we may indicate the direction of the force in every part of the space in which it acts” (Maxwell, 1861-2/1965: 451).

compromisos filosóficos importantes, con lo que se distancia un poco de la física matemática de Thompson y desarrolla una perspectiva propia. El historiador Peter Hartmann caracteriza dicha diferencia entre ambos físicos: en contraste a la exposición matemática de Lord Kelvin, Maxwell “escribe como un filósofo natural, siempre preocupado por desarrollar una visión del mundo” (1998: 82). El físico escocés pretende desarrollar un modelo mecanicista de las líneas de fuerza de Faraday, lo que en la práctica equivalía a proporcionar algún grado de realidad a dichas entidades.

Para proporcionar un modelo mecanicista de las fuerzas eléctricas y magnéticas, Maxwell desarrollará una «teoría molecular de los vórtices».⁹ Con un planteamiento similar al de los vórtices cartesianos, Maxwell imagina que las líneas de fuerza como el resultado de la rotación de vórtices moleculares en el éter. Este modelo le permite trabajar los fenómenos de manera matemática y en consistencia con el trabajo desarrollado por Faraday. Pero el mayor logro de este modelo, que «si bien no es verdadera», es altamente fructífera conectando fenómenos diferentes: los eléctricos, los magnéticos y, para su propia sorpresa, de la luz. Al otorgar realidad a las líneas de fuerza de Faraday, Maxwell puede plantearse la cuestión acerca de la vibración de dichas líneas y la velocidad que dichas vibraciones, u ondas, deberían tener.

La velocidad de ondas transversales en nuestro hipotético medio, calculado desde los experimentos electromagnéticos de M. M. Kohlrausch y Weber, concuerda tan exactamente con la velocidad de la luz, calculada desde los experimentos ópticos de M. Fizeau, que apenas podemos evitar inferir que *la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos* (Maxwell, 1861-2/1965: 500).

9 “I propose to examine magnetic phenomena from a mechanical point of view, and to determine what tensions in, or motion of, a médium are capable the mechanical phenomena observed. If, by the same hypothesis, we can connect phenomena and with those of induced currents, we shall have found a theory which, if not true, can only be proved to be erroneous by experiments which will greatly enlarge our knowledge of this part of physics” (Maxwell, 1861-2/1965: 452).

El «método de analogías» de James Clerk Maxwell, presentaba uno de sus más impresionantes logros, al poder deducir la velocidad de la luz de su modelo de vórtices moleculares en el éter. William Berkson declaraba sobre dicho método que “alentaba el desarrollo de lo que uno cree que son *falsas* analogías por la luz que pudieran arrojar a la verdad”, y además “alentaba la invención de teorías que *nadie* creería por su posible fecundidad” (Maxwell, 1864/1996: 7). Sin embargo, el modelo de Maxwell había resultado muy fecundo, lo cual le disuadía a considerar que había algún contenido real en la teoría, si bien nunca se llegaría a declarar realista sobre la misma.¹⁰

A dynamical theory of the electromagnetic field resulta ser la culminación de sus investigaciones sobre la electricidad y el magnetismo. El nombre de éste ensayo encierra las principales características de su teoría:

La teoría que propongo puede, por tanto, llamarse teoría del *campo electromagnético*, porque tiene que ver con el espacio en la vecindad de los cuerpos eléctricos o magnéticos, y puede llamarse teoría *dinámica*, porque asume que en ese espacio hay materia en movimiento, mediante la cual se producen los fenómenos electromagnéticos observados (Maxwell, 1864/1996: 34).

Maxwell concibe que la ciencia del electromagnetismo debe ser compatible, en última instancia, con el mecanicismo, de la misma manera que la teoría cinética de gases y la termodinámica apuntaban

¹⁰ “The conception of a particle having its motion connected with that of a vortex by perfect rolling contact may appear somewhat awkward. I do not bring it forward as a mode of connection existing in nature, or even as that which I would willingly assent to as an electrical hypothesis. It is, however, a made of connections which is mechanically conceivable, and easily investigated, and it serves to bring out the actual mechanics connections between the known electromagnetic phenomena; so what I venture to say that anyone who understands the provisional and temporary character of this hypothesis, will find himself rather helped than hindered by it in his research after the true interpretation of the phenomena” (Maxwell, 1864/1996: 13).

a serlo.¹¹ Pero el concepto mismo de *campo* era incompatible con el mecanicismo. La teoría de Maxwell es una teoría del campo electromagnético y sus ecuaciones son la descripción del mismo. Además, la idea de un campo que media la interacción de las fuerzas eléctricas y magnéticas y que se delimita a la contigüidad de los cuerpos electromagnéticos es radicalmente distinta del concepto de fuerza a distancia de Newton. En todo caso, está más cerca de la física cartesiana que la del físico inglés del siglo XVII.

Maxwell ve en el éter el medio en el cual el campo electromagnético se manifiesta, sin embargo, las ecuaciones que utiliza no parecen depender mucho de este concepto. Las ecuaciones mediante las cuales se expresa la naturaleza del campo electromagnético son ecuaciones diferenciales parciales, y Maxwell reduce a veinte las necesarias para entender los fenómenos electromagnéticos.¹² Pero las principales premisas que ha utilizado son la ley de Ampère, de Faraday y la de Gauss, *independientemente de las hipótesis que utilizó para visualizar los fenómenos.*¹³

11 La teoría cinética de gases, debida a James Clerk Maxwell, asumía que los gases estaban constituidos por partículas, de las cuales se podía hacer un tratamiento estadístico para determinar las características fenomenológicas que se observaban en el gas, tales como la presión que se ejerce sobre las paredes, el volumen o la presión, tomando sólo en cuenta el momento (la velocidad multiplicada por la masa) de las partículas. La termodinámica también postula que el calor es el resultado del movimiento de las partículas y se relacionaba directamente con la teoría cinética de gases, haciendo de la segunda ley de la termodinámica, por poner un ejemplo, una ley estadística. Ambas teorías eran mecanicistas, al postular que los fenómenos observados eran resultado tan sólo del movimiento y la materia (Harman, 1982).

12 Tres ecuaciones para la fuerza magnética, tres para la corriente eléctrica, tres para la fuerza electromotriz, tres para la elasticidad eléctrica, tres para la resistencia eléctrica, tres para la totalidad de la corriente, una ecuación para la electricidad libre, una ecuación de continuidad (Maxwell, 1864/1996: 68).

13 "The conclusions arrived at in the present paper are independent of this hypothesis, being deduced from experimental facts of three kinds:

1. The induction of electric currents by the increase or diminution of neighbouring currents according to the changes of the lines of force passing through the circuit.
2. The distribution of magnetic intensity according to the variations of magnetic potential.
3. The induction (or influence) of stactical electricity through dielectrics" (Maxwell, 1864/1996: 71).

El método que ha utilizado le ha permitido llegar a una teoría matemática totalmente independiente de las hipótesis físicas de las que ha partido, por lo cual los modelos muestran su verdadero valor: el de la utilidad. Pero lo más impresionante es que dicho método de analogías y modelos le ha permitido deducir, del mismo sistema de ecuaciones, los fenómenos de la luz. Es decir, la teoría física que propone le permite incluir en ella más fenómenos físicos que los que se proponía explicar en un principio. Como se indicó más arriba, su resultado más sorprendente consiste en deducir la velocidad de la luz de su teoría, lo cual implica en concebir la naturaleza de la luz como una onda electromagnética:

Esta velocidad (v) es tan cercana a la de la luz, que parece que tenemos mucha razón para concluir que la luz en sí misma (incluyendo calor radiante, y otras radiaciones si las hubiera) es una perturbación electromagnética en la forma de ondas propagadas a través del campo electromagnético, de acuerdo a las leyes del electromagnetismo (Maxwell, 1864/1996: 42).

El acuerdo con la teoría óptica, que en aquel momento planteaba la naturaleza de la luz como una onda transversal que se desplazaba por el éter, eran tan cercano, que Maxwell declaraba que “ambas conducían exactamente a las mismas conclusiones” (1864/1996: 86). Lo cual constituía un argumento más en favor de su teoría.

Fue, sin embargo, su *Treatise of electricity and magnetism* su trabajo más conocido y el que le valió el reconocimiento fuera de Gran Bretaña. Aunque sus teorías tardarían años en ser aceptadas, por la radicalidad de sus conceptos, sobre todo en lo referente a las *entidades teóricas* que postulaba (campo electromagnético, corriente de desplazamiento, ondas electromagnéticas), éstas ganaron algunos adeptos rápidamente, como Hertz, Helmholtz y Heaviside. De hecho, se le debe a Heaviside (1894) la reducción de las ecuaciones de Maxwell a sólo ocho, que corresponden a las formulaciones en cálculo diferencial e integral de las leyes de Gauss para el campo eléctrico y el magnético, la ley de Ampère y la ley de Faraday. La

formulación más conocida de las ecuaciones de Maxwell es en su notación diferencial:

$$\text{Ley de Gauss para la electricidad} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{Ley de Gauss para el magnetismo} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\text{Ley de Faraday} \quad \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\text{Ley de Ampère} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

La teoría electromagnética de James Clerk Maxwell predecía la existencia de ondas electromagnéticas, de las cuales la luz era sólo un tipo. Dichas ondas fueron detectadas experimentalmente en 1888 por Heinrich Hertz, lo cual constituía una sorprendente confirmación de la teoría. Además, Hertz calculó la frecuencia y la amplitud de la onda, con las cuales podía determinar la velocidad de la misma: la velocidad era la predicha por Maxwell, la velocidad de la luz. El mismo Hertz describió de manera sucinta la obra del eminente físico escocés: «La teoría de Maxwell es el sistema de ecuaciones de Maxwell».

Conclusión

Años después de la muerte de Maxwell, se consideraba que su teoría electromagnética era una de las más fundamentales y tenían el mismo estatus que las leyes del movimiento de Newton (Harman, 1998). Su modo de concebir la física, sobre todo como modelos de representación del mundo natural, abrieron el debate acerca del nivel de correspondencia entre el formalismo matemático y la naturaleza, y no existió, a partir de este periodo, una posición unánime. Poincaré indicaba que “La primera vez que un lector francés abre el libro de Maxwell, un sentimiento de malestar, y a menudo incluso de desconfianza, se mezcla con la admiración...” (Duhem, 2003:109). Duhem, siguiendo en su insatisfacción a Poincaré, expresa sus dudas

acerca de la forma inconexa en que Maxwell concibe la física al decir lo siguiente:

El *Tratado de electricidad y magnetismo* de Maxwell se esforzó, en vano, por revestirse de una forma matemática; al igual que las *Lectures on molecular dynamics* de W. Thompson, tampoco es un sistema lógico. Se compone, como las *Lectures*, de una serie de modelos que representan cada uno un grupo de leyes, sin preocuparse de los otros modelos que ha utilizado para representar otras leyes, que a veces han representado estas mismas leyes o algunas de ellas. Ahora bien, estos modelos, en vez de estar constituidos con giróstatos, muelles en espiral y glicerina, están organizados con signos algebraicos. Estas distintas teorías parciales, que se desarrollan aisladamente sin preocuparse de su antecesora, y que a veces cubren una parte del campo que la anterior ya ha cubierto, se dirigen mucho más a la imaginación que a nuestra razón (Duhem, 2003:110-111).

La teoría electromagnética de Maxwell es ahora aceptada unánimemente por la comunidad científica, así como la existencia del campo electromagnético, esto debido a su altísimo nivel de confirmación. Sin embargo, puesto que la controversia del realismo científico contra el instrumentalismo y otras formas de antirrealismo se seguirá presentando, vale la pena seguir el rastro de la evolución de las teorías científicas y de las ideas filosóficas implicadas en el proceso.

Referencias

- Aboites, V. (2014). "La naturaleza de la luz en los *Elements de la philophie de Newton de Voltaire*", en *El mundo del libro: tesoros bibliográficos en la biblioteca Armando Olivares*. Guanajuato: Universidad de Guanajuato, pp. 205-233.
- Braun, E. (2014). *Electromagnetismo*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Carmona, G. (2016). *Michael Faraday, un genio de la física experimental*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Clerk Maxwell, J. (1855/1965). "On Faraday's lines of force", En W. Niven, *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover publications, pp. 155-229.
- (1861-2/1965). "On physical lines of force", En W. Niven, *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover publications, pp. 451-513.
- (1864/1996). *A dynamical theory of the electromagnetic field*. Eugene: Wipf and Stock publishers.
- (1873). *A treatise on electricity and magnetism*, vol. I. Oxford: Clarendon press.
- (1965). "Illustrations of the dynamical theory of gases", En W. Niven, *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, vol. I. New York: Dover, pp. 377-409
- Crew, H. (1981). *The wave theory of light and spectra*. New York: Arno Press.
- Descartes, R. (1995). *Los principios de la filosofía*. Madrid: Alianza Universidad.
- Duhem, P. (1914/2003). *La teoría física, su objeto y su estructura*. Barcelona: Herder.
- (1998). "Physical theory and experiment", en M. Curd, & J. A. Cover, *Philosophy of science: the central issues*. New York: Norton, pp. 257-278.
- Faraday, M. (1839-55/1922). *Experimental researches in electricity*, New York: M. Dent & Sons Ltd.
- Hacking, I. (1996). *Representar e intervenir*, México D.F.: Paidós.
- (2001). *Representar e intervenir*. Buenos Aires: Paidós.
- (2010). *Representing and intervening*, New York: Cambridge University Press.
- Harman, P. (1982). *Energy, force and matter: the conceptual development of nineteenth-century physics*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- (1998). *The natural philosophy of James Clerk Maxwell*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Heaviside, O. (1894). *Electromagnetic theory*, vol. I. London: "The Electrician" Printing and Publishing Company.
- Mach, E. (1893). *The science of mechanics*, La Salle: Open Court.
- Poincaré, H. (1963). *La ciencia y la hipótesis*, Madrid: Espasa Calpe.

- Psillos, S. (1999). *Scientific realism: how science tracks truth*, New York: Routledge.
- Romo, J. (1991). *El concepto de estado electro-tónico en Faraday*, Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Sears, F. W. & Zemansky, M. W. (1991). *University physics*, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Serway, R., & Faughn, J. (2005). *Fundamentos de Física*, vol. 2. México: Thompson.
- Siegel, D. M. (1991). *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: molecular vortices, displacement current and light*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Stevenson, R. & Moore, R. B. (1967). *Theory of physics: an introductory course*, London: Saunders.
- Van Fraassen, B. (1980). *The scientific image*, Oxford: Clarendon Press.
- (1996). *La imagen científica*, México: Paidós / UNAM.
- (1998). "Arguments concerning scientific realism", en Curd, M. & Cover J. A., *Philosophy of science: the central issues*. New York: Norton, pp. 1064-1087.
- Von Waltershausen, W. S. (1856). *Gauss: a memorial*, Leipzig: S. Hirzel.
- Westfall, R. (1980). *La construcción de la ciencia moderna*, Barcelona: Editorial Labor.
- Young, T. (1802/1981). "On the theory of light and colors", en H. Crew, *The wave theory of light and spectra*. New York: Arno Press, pp. 45-61.