

LAS ANALOGÍAS EN LA FORMULACIÓN DE LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LA LUZ DE MAXWELL

VLADIMIR CACHÓN GUILLÉN*

Resumen

Este trabajo se centra en los dos primeros artículos de James Clerk Maxwell sobre las líneas de fuerza magnética. ¿Qué llevó a Maxwell a escribir sobre este tema, y cómo influyeron en él las circunstancias tecnológicas de su tiempo? Y, sobre todo, ¿cómo logró, a partir del empleo de analogías mecánicas, entender la naturaleza de los campos electromagnéticos y concebir una teoría unificada del magnetismo, la electricidad y la luz? Se explora el proceso creativo de Maxwell y se intenta derivar de él algunas conclusiones útiles sobre la manera en que se hace ciencia.

Palabras clave: líneas de fuerza, campo electromagnético, telegrafía submarina, Maxwell, Thompson, Faraday.

Abstract

This article focuses on the two first James Clerk Maxwell papers on magnetic lines of force. What took Maxwell to write about this issue, and how did the technological circumstances of his time influence him? And, over all, how did he

* Docente del Laboratorio de Estudios Sociales de la Ciencia, Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, UNAM, México, <vladimircg@yahoo.com>.

manage to understand, through the use of mechanical analogies, the nature of electromagnetic fields and manage to build a unified theory of magnetism, electricity and light? It is explored the creative process of Maxwell's mind, and then, it is attempted to infer some useful conclusions about the way science is done.

Key words: Lines of force, electromagnetic field, submarine telegraphy, Maxwell, Thompson, Faraday.

Contemplado desde muy lejos en la historia de la humanidad –digamos que desde diez mil años a partir de ahora– debe haber poca duda de que se considerará que el hecho más significativo del siglo XIX es el descubrimiento realizado por Maxwell de las leyes de la electrodinámica.

Richard Feynman¹

Introducción

¿Cómo se elaboran las grandes teorías científicas? El problema ha ocupado a numerosos filósofos de la ciencia al menos desde William Whewell,² a principios del siglo XIX. Desde entonces, numerosos filósofos e historiadores de la ciencia, como Kuhn,³ Popper⁴ o Lakatos⁵ han aportado valiosas —y a veces contradictorias— teorías para desentrañar la dinámica de la investigación científica.

En este artículo —y a diferencia de las personalidades citadas— no buscamos hallar una respuesta general a esta pregunta. Queremos, en cambio, encontrar una respuesta a un caso único, pero que tuvo repercusiones gigantescas: ¿cuál fue la dinámica del descubrimiento, por parte de Maxwell, de la teoría electromagnética de la luz? Para ello, nos enfocaremos en los dos primeros artículos que Maxwell escribió sobre el tema de las *líneas de fuerza* —un concepto que después derivaría en el de *campo* electromagnético— y que ilustran

¹ R. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. I. Massachusetts, Addison-Wesley, 1964, p. 11.

² W. Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 1837, de la que existe una edición facsimilar publicada por Cambridge University Press, 2010.

³ Sobre todo en el ya clásico T. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*. México, FCE, 1962.

⁴ Por ejemplo, K. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*. Nueva York, Hutchinson & Co., 1959.

⁵ En muchas de sus obras, pero sobre todo en I. Lakatos, *Escritos filosóficos: la metodología de los programas de investigación científica*. Madrid, Alianza, 2002.

cómo las circunstancias académicas, políticas y tecnológicas, así como la muy personal forma que cada científico tiene para construir teorías, se imbrican en una compleja trama en donde es difícil ponderar el peso que tiene cada uno de estos factores.

Este caso, también, nos sirve para cuestionar uno de los mitos que se emplean con frecuencia en el ambiente académico: el de que la ciencia avanza primero como *ciencia pura*, mediante observaciones y experimentos que culminan en teorías abstractas —normalmente apoyadas en formulaciones matemáticas—, y que estas teorías, con el tiempo, derivan o maduran en *ciencia aplicada* y en nuevas tecnologías, como si la parte teórico-abstracta debiera ir siempre primero y, después, sus aplicaciones tecnológicas. A continuación veremos que la dinámica de descubrimientos es mucho más compleja que esto, y que esta secuencia ideal no se ajusta a la realidad histórica, al menos no en el caso del que nos ocuparemos.

Surge el interés de Maxwell por el electromagnetismo

El trabajo teórico-matemático de James Clerk Maxwell permitió una de las síntesis más importantes de la física. Antes de él, la electricidad, el magnetismo y la óptica se consideraban tres campos de estudio totalmente distintos y separados. Sin embargo, gracias a su teoría electromagnética, hoy se les considera diferentes manifestaciones de un mismo fenómeno.

Pero ¿cómo se llegó a esto? Quizá la primera pregunta que debemos plantearnos es ¿qué hacía Maxwell, de entrada, trabajando en el electromagnetismo mientras estudiaba física en la Universidad de Cambridge, en donde no figuraba en los planes de estudio? El primer elemento de la respuesta es que, en ese momento, Michael Faraday había logrado, con sus investigaciones, situar la electricidad como uno de los problemas centrales de la física. Había demostrado que se trataba de una propiedad característica de todo tipo de materia, y que estaba íntimamente relacionada con el comportamiento físico y químico de los cuerpos materiales.⁶ No obstante, este nuevo problema aún no había permeado los planes de estudio de las universidades del país. Contra lo que podría creerse, el electromagnetismo no era un campo de estudio típico en las principales universidades, como Cambridge, en la que la carrera de Física en los

⁶ Una exposición relativamente breve, pero razonablemente completa, sobre este tema aparece en: F. Cánovas, “James Clerk Maxwell”, en *Historia de la física*. Murcia, Universidad de Murcia, 2005. Y para una exposición más amplia puede verse W. Berkson, *Las teorías de los campos de fuerza desde Faraday hasta Einstein*. Madrid, Alianza, 1985.

años cincuentas del siglo XIX se enfocaba, sobre todo, al estudio de la mecánica celeste, la óptica y la hidrodinámica.⁷ A pesar de esto, hay evidencia de que mientras Maxwell estudiaba en Cambridge estaba al corriente de algunos de los trabajos pioneros en electromagnetismo realizados por Faraday, por un lado, y de los llevados a cabo por William Thompson, a quien conoció en 1850 (y que mucho más tarde, en 1892, sería nombrado barón Kelvin de Lags y conocido desde entonces como lord Kelvin).

Tras haber terminado sus estudios matemáticos en Cambridge, a principios de 1854, e influido por los experimentos sobre corrientes eléctricas y líneas magnéticas de Faraday, Maxwell envió una carta a Thompson —que había estado trabajando en estos temas— solicitándole que pudiera guiarle en el estudio de estos fenómenos:

Ahora que acabo de ingresar en el ingrato estamento de los licenciados, he comenzado a pensar en leer. Actividad placentera, durante cierto tiempo, entre libros de mérito reconocido que uno no ha leído, pero que debería haber leído. Con todo tenemos una fuerte tendencia a volver a los temas de la física, y varios de los aquí presentes querríamos abordar la electricidad. Imaginemos una persona que tiene un conocimiento rudimentario de los experimentos eléctricos y una ligera aversión a la Electricidad de Murphy, ¿cómo debería proceder en la lectura y el trabajo para conseguir cierta comprensión de la materia que pueda serle útil en posteriores lecturas? Si esta persona quisiera leer a Ampère, Faraday, etcétera, ¿en qué secuencia disponerlos y en qué momento y en qué orden debería abordar la lectura de los artículos que usted ha publicado en el *Cambridge Journal*? Si usted tiene en la cabeza alguna respuesta a estas cuestiones, tres de nosotros estaríamos gustosos de recibir por escrito sus consejos.⁸

Ya fuera por la respuesta de Thompson o por iniciativa propia, Maxwell comenzó sus investigaciones leyendo los *Experimental Researches in Electricity*, de Faraday. Los experimentos de Faraday planteaban una gran cantidad de problemas a resolver, además de los relativos a la relaciones entre la electricidad y la materia. Apenas un año después, en otra carta a Thompson fechada en Glenair el 13 de septiembre de 1855, Maxwell —que año y medio atrás prácticamente no sabía mayor cosa de la electricidad y el magnetismo— reconocía lo siguiente:

Querido Thompson [...] he obtenido mucho de ti en temas eléctricos, directamente al igual que a través de la imprenta y el editor, y también he utilizado

⁷ S. Schaffer, "The Laird of physics", en *Nature*, núm. 471, 2011, pp. 289-291.

⁸ Reproducida en F. Cánovas, *op. cit.*, p. 13.

otras ayudas, y leído los tres volúmenes de investigación de Faraday. Mi intención al hacer esto era, naturalmente, saber lo que se ha hecho en la ciencia eléctrica, matemática y experimental, e intentar comprender esto de una manera racional, ayudándome de cualquier noción que pudiese atornillar en mi cabeza.⁹

A estos problemas teóricos planteados por los experimentos de Faraday, Schaffer¹⁰ añade una circunstancia tecnológica que parece haber jugado un papel importante, y es que justo en los años en que Maxwell se interesaba por los experimentos eléctricos y magnéticos de Faraday, la Corona británica estaba muy interesada, por motivos políticos, en lograr la unificación de las comunicaciones de todo su Imperio, para lo cual estaba planeado el tendido de cables telegráficos interoceánicos. Este proyecto implicaba buscar maneras de resolver nuevos problemas, como la propagación de las señales electromagnéticas a través de grandes distancias, la confiabilidad de los instrumentos de medición y el análisis de las fuerzas, resistencias y corrientes en cables tendidos en el fondo del océano.

En 1853, Faraday había sido testigo de los catastróficos problemas causados por el retraso en las señales en las líneas de cable tendidas entre Londres y Manchester por una compañía de telégrafos. En una conferencia que impartió unos meses después en la Royal Institution,¹¹ empleó su propia teoría de la inducción magnética para mostrar cómo el agua salada actuaría del mismo modo que la cubierta exterior de un condensador sobre los cables submarinos, incrementando su capacitancia, disminuyendo la inducción y, por consiguiente, retrasando las señales todavía más.

Maxwell y Thompson prestaron mucha atención a esta conferencia de Faraday y a sus implicaciones para la telegrafía submarina. Apenas unos meses después, Thompson ya había desarrollado una fórmula que relacionaba el retraso en las señales con la longitud de los cables, la cual resultaba de gran valor económico para los inversionistas del nuevo y ambicioso proyecto de unir Gran Bretaña con Norteamérica mediante el tendido de una línea de 5 000 km. No es casual que, para 1856 Thompson ya se había convertido en directivo de una de las principales compañías de tendido de cables transatlánticos y en una autoridad reconocida en sistemas electromagnéticos (y en los años siguientes se haría millonario con lo que ganaría en patentes y en consultorías telegráficas).

⁹ P. M. Harman, ed., *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, vol. I (1846-1862). Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 319.

¹⁰ S. Schaffer, *op. cit.*, pp. 289-291.

¹¹ *Ibid.*, p. 290.

Mientras esto ocurría, en 1856, poco después de la muerte de su padre, Maxwell se había convertido en profesor de filosofía natural (el nombre que se le daba a la ciencia hasta finales del siglo XIX)¹² en el Marischal College de Aberdeen, y estaba trabajando en el modelo de Faraday de la inducción electromagnética. Dos años más tarde se casó con Katherine Mary Dewar, hija del director del Marischal College.

Maxwell pensaba que era necesaria una teoría matemática que unificara la acción de la electricidad estática, la atracción amperiana, las corrientes permanentes y la inducción electromagnética. Con este objetivo en mente, comenzó a pensar en el electromagnetismo como algo dependiente de un medio de transmisión fluido, como el éter,¹³ o un campo, cuyo estrés y tensión fuera capaz de almacenar energía y de transmitir su acción a una velocidad finita. Su primer artículo al respecto, publicado en 1855, fue “On Faraday’s Lines of Force”. A partir de este primer artículo sobre el tema le tomó a Maxwell cinco años de arduo trabajo lograr que su modelo del electromagnetismo y sus ecuaciones fueran consistentes con lo que hasta ese momento se sabía de este fenómeno, primero en la recién instituida Universidad de Aberdeen, y después en el King’s College de Londres, en donde obtuvo el puesto de profesor de filosofía natural en 1860. El resultado de este esfuerzo fue *On Physical Lines of Force*, publicado en 1861.

Schaffer ha hecho notar que, a diferencia de sus contemporáneos en Francia y Alemania, los filósofos naturales británicos eran educados para pensar en términos mecánicos sobre la física, con poleas, bombas y ligas, y después extrapolar esta manera de pensar al Universo. Éste fue el enfoque que aprendió Maxwell mientras estuvo en Cambridge y fue, por ello, el que empleó en sus artículos de 1855 y 1861.

Sin embargo, y a pesar de saber que Maxwell fue educado en Cambridge para pensar en la física bajo el enfoque de la mecánica clásica de Newton, a primera vista puede parecer extraño que pensara que obtendría algún resultado novedoso utilizando un modelo mecánico para un fenómeno no mecánico como el electromagnetismo. No obstante, ésa era precisamente su intención: a lo largo

¹² El término “filosofía natural” no fue sustituido por la palabra “ciencia” hasta que lo propuso William Whewell (*op. cit.*, 1837) pero aún así el nuevo término tardó en desplazar al anterior, que había sido empleado desde los tiempos de Isaac Newton y la Revolución científica.

¹³ El pensar que existía un medio –el llamado “éter”– que permitía la transmisión tanto de la luz (el *éter luminífero*) como del electromagnetismo (posiblemente mediante un segundo tipo de éter), fue algo comúnmente aceptado por la mayoría de los científicos hasta 1905, cuando Einstein demostró con su artículo sobre el efecto fotoeléctrico que, si suponemos que la luz está formada por cuantos, entonces resulta totalmente innecesario invocar la existencia del éter o de cualquier otro medio de transmisión.

de estos dos trabajos Maxwell emplea el “método de analogías”, inspirado en parte por la analogía que Thompson había establecido entre el calor y la electricidad.¹⁴ Maxwell comprendía que las analogías entre fenómenos le permitían una gran flexibilidad, incluso si producían teorías poco verosímiles pero que le brindaban sistemas matemáticos muy clarificadores al aplicarlos a los fenómenos que trataba de estudiar, al mismo tiempo que no lo ataban a las explicaciones de una teoría ya existente.¹⁵ Por lo tanto, no es que Maxwell “pensara” que el electromagnetismo fuera un fenómeno mecánico, sino que *al hacerlo parecer, mediante analogías, como un fenómeno mecánico* podían descubrirse principios matemáticos que permitieran comprenderlo mejor.

Sobre las líneas de fuerza de Faraday

Maxwell se había convencido de que la noción de líneas de fuerza magnética de Faraday¹⁶ explicaba mejor el magnetismo que la concepción de centros de fuerza, aunque en esta preferencia sólo coincidían Faraday, Thompson y él mismo. La gran mayoría de los físicos de la época, influidos por la enseñanza de la mecánica clásica en las universidades y, concretamente, por el modo en que Newton había analizado la gravedad, prefería pensar en la atracción magnética como una fuerza que se concentraba en un punto, en el centro del material magnético, y que actuaba a distancia sobre otros materiales. Para estos físicos, por tanto, el fenómeno primario a estudiar era la naturaleza de estos centros de fuerza. Faraday, por el contrario, proponía que el magnetismo actuaba mediante líneas de fuerza que cubrían la distancia entre ambos materiales, y que la distribución de estas fuerzas en el espacio era el fenómeno primario, y no la naturaleza de los centros alrededor de los cuales estas líneas de fuerza se agrupaban.¹⁷

¹⁴ Según admite él mismo, véase J. C. Maxwell, “On Faraday’s Lines of Force”, en *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, núm. 10, 1856, p. 157.

¹⁵ Véase la explicación que hace de su método el propio Maxwell (*ibid.*, pp. 155-156).

¹⁶ El concepto de *líneas de fuerza magnética*, o simplemente *líneas de fuerza*, fue propuesto por Faraday en 1839: “Por curvas magnéticas quiero decir las líneas de fuerza magnética que, aunque estén modificadas por la yuxtaposición de polos, se manifiestan mediante limaduras de hierro; o aquellas con las que una aguja magnética, muy pequeña, formaría una tangente”.

¹⁷ Véase el “Resumen” hecho por el propio Maxwell sobre su “On Faraday’s Lines of Force”, y que, aunque no llegó a publicarse, aparece reproducido en Harman, *op. cit.*, p. 353 y en J. M. Sánchez Ron, “Maxwell, su vida y su obra”, en J. C. Maxwell, *Materia y movimiento*. Barcelona, Crítica, 2006, p. 45.

Para estudiar de manera teórica este fenómeno, Maxwell escribió “On Faraday’s Lines of Force”, que se publicó en 1856¹⁸ en los *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. El objetivo de Maxwell en este artículo era desarrollar las ideas de Faraday dentro de una teoría matemática del electromagnetismo. Para ello, empleó un enfoque completamente distinto a los que se conocían en su época. Utilizó —como hacía Thompson— una interpretación de los fenómenos electromagnéticos en función de la existencia de un medio como el éter, lo cual le permitía utilizar modelos matemáticos en los que podía aplicar las leyes de Newton. En este aspecto, su interpretación era distinta a la de Faraday —que no apelaba al éter—, pero pensaba que era preferible.

Para analizar los fenómenos electromagnéticos, Maxwell empleó una serie de analogías ilustrativas. Es decir, estableció parecidos y trabajó sobre ellos para visualizar de mejor manera los fenómenos que describía, aunque no pretendía derivar una teoría nueva a partir de estas analogías, ya que tampoco pretendía que éstas fueran físicamente verdaderas. Concretamente, al emplear la analogía que ya había hecho Thompson entre electricidad y flujo calorífico, Maxwell estaba consciente de que “no debemos concluir de la similitud parcial de algunas de las relaciones de los fenómenos del calor y la electricidad que existe una similitud real entre las causas de ambos fenómenos. La similitud es entre relaciones, no entre las cosas relacionadas”.¹⁹

Pero, aunque las analogías eran sólo ilustrativas, jugaron un papel fundamental en este artículo. Para comprender la heurística del método analógico de Maxwell revisemos algunas de las principales.

Veamos, en primer lugar, su analogía mecánica para las líneas de fuerza. Maxwell nos explica que, si llenamos de líneas de fuerza el espacio que rodea un imán, como hizo Faraday, “obtendríamos un modelo geométrico de los fenómenos físicos que nos indicarían la dirección de la fuerza, pero no su intensidad en cualquier punto, para lo cual necesitaríamos de otro método”. La solución que se le ocurrió a Maxwell fue “considerar estas curvas no como simples líneas, sino como finos tubos de sección variable que transportan un fluido incompresible”. En cualquier punto del campo magnético, la magnitud y la dirección de la fuerza estaría entonces representada por la dirección y magnitud del fluido imaginario, contenido dentro de tubos de distinto diámetro.

¹⁸ La primera parte de este artículo fue leída por Maxwell ante la Sociedad Filosófica de Cambridge el 10 de diciembre de 1855, y la segunda el 11 de febrero de 1856.

¹⁹ Este comentario lo hizo mucho después, en J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Londres, Clarendon Press, 1873, pero refiriéndose a la misma analogía de Thompson que, en efecto, tuvo en mente al escribir “On Faraday’s Lines of Force”.

Revisemos ahora su analogía mecánica de la electricidad. La carga positiva se considera como una fuente de fluido, cuya cantidad depende de su intensidad. La carga negativa sería un *sumidero* que absorbe todo el fluido de las proximidades de manera proporcional a su intensidad. Según Faraday, había la misma cantidad de carga positiva que negativa y, por tanto, los sumideros nunca cesarían de absorber fluido. Se trataba, en cualquier caso, de un fluido extraño, que nunca dejaría de estar creándose en un lugar y absorbiéndose o destruyéndose en otro. Sin embargo, para Maxwell no era un problema lo singular de estas propiedades y el extraño carácter del fluido: él, lo que necesitaba en este punto, era un modelo que le permitiera pasar a ecuaciones lo que estaba “sucediendo mecánicamente” en su supuesto, sin importar en este momento si esas propiedades eran un tanto extrañas.

En una tercera analogía, Maxwell analizó la acción de los dieléctricos²⁰ suponiendo que el fluido (que no posee inercia) fluía a través de un medio resistente que ejercía sobre éste una fuerza proporcional a su velocidad. De este modo, variando la resistencia del medio por el que discurría el fluido, obtuvo una analogía mecánica de la acción de los materiales dieléctricos y diamagnéticos:²¹ enfrentando en su camino a una región de mayor resistencia, el fluido tendería a rodearla, desviando las líneas de flujo, como en el caso experimental en que las líneas de fuerza parecían desviarse por acción de un material diamagnético. Siguiendo esta analogía, Maxwell introdujo una variable adicional: un medio cuya resistencia al flujo varía con la dirección, y entonces mostró cómo esta analogía explicaría los efectos magnéticos que tienen lugar en los cristales. Como el fluido es incompresible, el volumen de cualquier parte del fluido habría de permanecer constante en el tiempo y, por consiguiente, la velocidad del fluido tendría que disminuir según se fuera alejando de la fuente. De hecho, nos dice Maxwell, la velocidad del fluido tendrá que obedecer la ley del inverso del cuadrado. Maxwell demostró también que así como la velocidad es análoga a la fuerza en el campo eléctrico, la presión en un punto del fluido es análoga al potencial.

Vemos, pues, que esta serie de analogías mecánicas le permitieron a Maxwell no sólo ilustrar sino comprender mejor las propiedades del electromagnetismo,

²⁰ Un dieléctrico es un material que es un mal conductor de la electricidad pero que, a diferencia de los materiales aislantes, posee la propiedad de que al ser sometido a un campo eléctrico externo puede establecerse en él un campo eléctrico interno. El término fue concebido por William Whewell en respuesta a una petición de Faraday.

²¹ El diamagnetismo es una propiedad de algunos materiales que consiste en ser repelidos por un imán (es, por lo tanto, la propiedad opuesta a ser atraído por un imán). La descubrió Faraday en 1845, al observar que un trozo de bismuto era repelido por ambos polos de un imán (lo que sugería que el campo magnético del imán estaba generando un campo magnético en el bismuto, pero de sentido opuesto).

y empleando una mecánica newtoniana para representar lo que ocurría (sin importar si físicamente sucedía *realmente* de ese modo), pudo no sólo derivar nuevos aspectos del electromagnetismo, sino trasladar más adelante su comportamiento a un lenguaje matemático. Esto último lo realizó en la segunda parte del artículo, en la sección titulada “On Faraday’s electrotonic state”. En esta sección Maxwell desarrolló la primera versión del sistema de ecuaciones que describen las líneas de fuerza eléctricas y magnéticas y que, años después y con muchas transformaciones, derivaría en sus famosas ecuaciones sobre el electromagnetismo. En esta versión, sin embargo, Maxwell todavía no había desarrollado el concepto de “desplazamiento eléctrico”, cuya derivada con respecto al tiempo constituye la “corriente de desplazamiento”, un concepto al que llegaría en los siguientes años.

Sobre las líneas físicas de fuerza

Maxwell tenía sólo 29 años cuando apareció publicada la primera parte de *On Physical Lines of Force*, en marzo de 1861, por *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*.²² Este artículo representó, con toda probabilidad, el paso más importante en la unificación teórica que lograría durante los siguientes años. Sin embargo, en él no aparece todavía su concepto de onda electromagnética, sino que —como podemos observar en la figura 1— Maxwell sigue pensando en las líneas de fuerza de Faraday más bien en función de una serie de engranajes que giraban y de ruedas y esferas que transmitían la acción de la fuerza electromagnética.

²² La primera parte se publicó en el número de marzo de 1861, la segunda en el de abril del mismo año, la tercera hasta enero de 1862, y una cuarta y última parte al mes siguiente. La diferencia en tiempos entre la primera y la tercera partes resultará relevante en su contenido y en esta historia, como explicaremos más adelante en el texto.

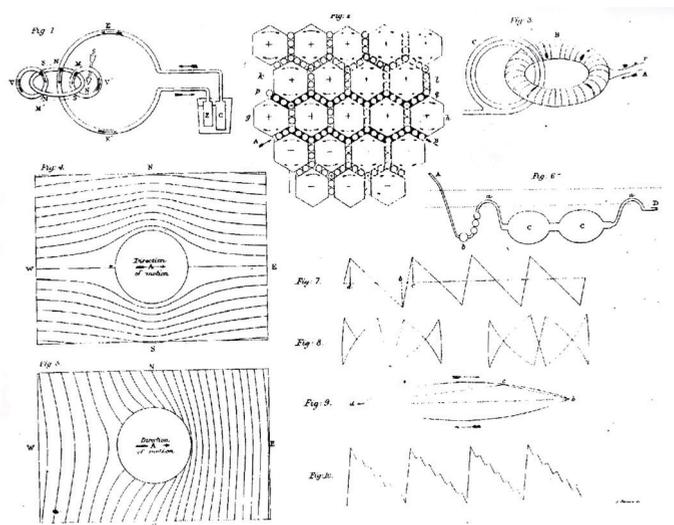


Figura 1. Ilustración original de Maxwell en *On Physical Lines of Force*, parte II.

Una de las principales limitaciones que habían afectado a “On Faraday’s Lines of Force” era su incapacidad de tratar las conexiones entre los campos eléctricos, campos magnéticos y corrientes eléctricas. Para superar este problema, en esta ocasión Maxwell decidió dejar de lado las analogías ilustrativas, y desarrollar un modelo mecánico de estos fenómenos que fuera teóricamente viable y que le permitiera establecer las conexiones pendientes. En este sentido, hay una diferencia fundamental entre las analogías empleadas en “On Faraday’s Lines of Force” y las nuevas analogías mecánicas que Maxwell va a utilizar en *On Physical Lines of Force*. En el primer caso, se había tratado únicamente de analogías ilustrativas. Ahora, con sus increíbles modelos mecánicos, Maxwell ha decidido construir, mediante analogías, modelos que debían considerarse como candidatos a una “teoría verdadera”. Y estaba consciente de que también podían resultar falsos... pero habían sido diseñados para que tuvieran la posibilidad de resultar verdaderos, al menos en el sentido de describir la auténtica realidad física. Por consiguiente, y como ha señalado adecuadamente Sánchez Ron,²³ el estatus ontológico de ambos artículos es muy diferente.

Maxwell explica su objetivo y la razón del empleo de su método analógico del modo siguiente:

²³ J. M. Sánchez Ron, “Maxwell, su vida su obra”, en *op. cit.*, p. 49.

Mi objetivo en este artículo es clarificar el camino [...] investigando los resultados mecánicos de ciertos estados de tensión y movimiento en un medio, y comparándolos con los fenómenos observados del magnetismo y la electricidad. Al señalar las consecuencias mecánicas de estas hipótesis, espero ser de alguna utilidad a aquellos que consideran estos fenómenos como debidos a la acción de un medio, pero que dudan de la relación de esta hipótesis con las leyes experimentales ya establecidas, las cuales han sido generalmente expresadas empleando otro tipo de hipótesis.²⁴

Al igual que Thompson, Maxwell creía que el campo electromagnético estaba *realmente* constituido por un éter subordinado a las leyes de la mecánica newtoniana.²⁵ Por lo tanto, debía tener un mecanismo y éste era susceptible de ser descubierto. Para el momento de la publicación de este nuevo artículo, Maxwell veía las analogías mecánicas que había empleado en su artículo anterior como insuficientes, y le parecía que si bien le habían servido para ilustrar y entender mejor las líneas de fuerza de Faraday, no proporcionaban una teoría general de los fenómenos electromagnéticos. Por consiguiente, su nueva meta era reexaminar estos fenómenos bajo un punto de vista mecánico, pero ahora enfocándose en qué fuerzas o movimientos en el éter (que servía de medio de transmisión) podían dar cuenta de los fenómenos observados, en particular de los campos magnéticos. Y, de ser posible, buscaría la manera de que este modelo mecánico le ayudara a conectar el fenómeno de la atracción magnética con los fenómenos del electromagnetismo, de las corrientes inducidas y con el de la luz, en una sola teoría unificadora.²⁶

Al comenzar a desarrollar su modelo mecánico para explicar el campo de carga, Maxwell —al parecer— no tenía idea de qué ecuaciones iba a encontrar, ni si sería capaz de desarrollar una teoría unificadora. Pero estaba completamente seguro, al menos, de dos cosas: de las tres leyes de la mecánica de Newton y de que la explicación tenía que pasar por una teoría de campos. Su fe en ambas cosas le brindó un programa parecido al de Thompson: explicar todo en términos de un éter supeditado a las leyes de Newton.

Maxwell sabía, naturalmente, que toda teoría correcta tiene que ser consistente con los hechos experimentales, y también sospechaba que la teoría correcta debía parecer extraña, puesto que ningún intento racional previo había dado con la teoría adecuada. De modo que se permitió a sí mismo probar

²⁴ J. C. Maxwell, "On Physical Lines of Force", en *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, núm. 21, 1861, pp. 161-175, 281-291, 338-345; y núm. 23, pp. 12-24, 85-95. (Esta cita pertenece a la parte I, p. 162.)

²⁵ F. Cánovas, *op. cit.*, cap. 2.

²⁶ J. C. Maxwell, "On Physical Lines of Force", en *op. cit.*, parte I, p. 162.

cualquier hipótesis que fuera consistente con sus dos premisas (la mecánica de Newton y la existencia de campos). Maxwell pensaba que, aunque no diera con sus analogías con el mecanismo correcto, podía encontrar uno que fuera lo suficientemente parecido al verdadero como para poseer algunas propiedades en común. Por esta razón, y uniendo su imaginación a su facilidad matemática, se tomó la libertad de imaginar mecanismos imposibles y descabellados que, sin embargo, pudieran poseer algunas propiedades correctas, análogas a las del mecanismo verdadero, cualquiera que éste fuera.

Al parecer, Maxwell tampoco estaba satisfecho con sus ecuaciones de 1856. Pensaba que sus resultados de esa ocasión debían ser modificados con la introducción de la velocidad finita de la inducción magnética. Y es que Maxwell, al igual que Faraday y Thompson, tenía razones metafísicas para creer que la inducción electromagnética no podía ser instantánea y que requería de tiempo para propagarse por el campo. Según el concepto del éter que manejaba, cada parte del éter no podía actuar sobre las demás a distancia, sino sólo sobre las partes adyacentes. Y, si se suponía que el éter es una sustancia elástica y con masa, entonces la velocidad de propagación debía de ser finita. Había, además, una razón poderosa para creer que el éter poseía estas propiedades: la velocidad finita de la luz. Y si bien ésta se transmitía por medio de un *éter luminífero*, que no necesariamente estaba relacionado con el campo electromagnético, a Maxwell le costaba trabajo creer en la existencia de dos éteres superpuestos, uno para la luz y otro para el electromagnetismo. Finalmente, estaba el descubrimiento de Faraday de la rotación magnética de la luz polarizada, que demostraba la existencia de una relación entre la luz y el magnetismo. Por lo tanto, lo natural era asignar a un mismo éter los efectos electromagnéticos y los luminosos. Y si este éter producía una velocidad finita para la luz, debía por tanto ocasionar una velocidad también finita para la inducción electromagnética.

El problema de Maxwell era dar con un modelo del éter del campo electromagnético que incorporara la masa y elasticidad necesaria para la velocidad finita y llegar, de ser posible, a formular una teoría que pudiera unificar la electricidad, el magnetismo y la luz.

Y fue el propio Faraday quien aportó la idea sobre la que Maxwell comenzó a trabajar en su modelo mecánico. Faraday había dicho que la distribución de las líneas magnéticas de fuerza podía determinarse suponiendo que existe tensión a lo largo de las líneas y una presión entre ellas. Maxwell, entonces, se preguntó qué explicación mecánica podía producir esta desigualdad de presiones en un fluido o, por analogía, en un medio móvil. La clave la encontró en los trabajos de Thompson, donde se establecía la necesidad de suponer un

movimiento turbulento en torno a las líneas magnéticas de fuerza en un medio diamagnético, pues pensaba que ésta era la única forma de explicar la rotación de la luz observada por Faraday. Maxwell hizo suya la idea de los remolinos magnéticos y decidió aplicarla a todas las líneas de fuerza, tanto en el espacio como en un medio material. Esta generalización permitía una explicación mecánica al problema de la desigualdad de presiones, tanto a lo largo de las líneas como entre ellas.

En sus deducciones, Maxwell introdujo una hipótesis que resultó ser de gran valor heurístico: que las masas de los remolinos magnéticos dependían de la permeabilidad magnética del medio y, por lo tanto, la energía del campo magnético —es decir, la energía cinética de estos remolinos— era una función de la constante de permeabilidad.

El segundo paso en la construcción del modelo que estaba buscando, era encontrar una analogía mecánica de la corriente eléctrica que estableciera una relación entre ésta y el magnetismo. La solución ingeniosa de Maxwell consistió en suponer que la electricidad está constituida por bolitas, o partículas (ver la figura 2), que separan a unos remolinos magnéticos de otros, considerando a éstos como barras flexibles con una superficie rugosa. El razonamiento de Maxwell es tan sorprendente que conviene reproducirlo:

Suponiendo que sea correcta la explicación de las líneas de fuerza mediante remolinos moleculares, ¿por qué una determinada distribución de remolinos supone una corriente eléctrica? Una respuesta satisfactoria nos facilitaría mucho el camino hacia la solución del verdadero problema, que no es sino contestar a la pregunta: ¿qué es la corriente eléctrica?

Me ha costado mucho aceptar la existencia de remolinos a través de todo un medio, girando codo con codo en la misma dirección en torno a ejes paralelos. Las porciones contiguas de dos remolinos consecutivos deben moverse en direcciones opuestas; y es difícil comprender cómo el movimiento de una parte del medio pueda coexistir con un movimiento contrario de la porción contigua, e incluso producirlo.

La única idea que me ha ayudado a concebir este tipo de movimientos es que los remolinos están separados por una capa de partículas girando cada una alrededor de su propio eje, en dirección opuesta a la de los remolinos, de forma que las superficies de contacto entre partículas y remolinos tienen el mismo sentido de movimiento.

En mecánica, cuando se quiere que dos ruedas giren en la misma dirección, se coloca entre ellas otra rueda que engrane con ambas, y que se llama “piñón loco”. La hipótesis que sugiero sobre los remolinos es que entre cada dos remolinos contiguos se interpone una capa de partículas que actúa como

piñón loco; de esta forma cada remolino tiende a hacer que sus vecinos se muevan en la misma dirección.

[...] Por lo tanto, y de acuerdo a esta hipótesis, parece ser que la corriente eléctrica queda representada por la transferencia de las partículas móviles interpuestas entre los vórtices vecinos. Podemos concebir que estas partículas son muy pequeñas comparadas con el tamaño de los vórtices, y que una gran cantidad de vórtices con todo y sus partículas circundantes, quedan contenidos en una única molécula completa del medio.²⁷

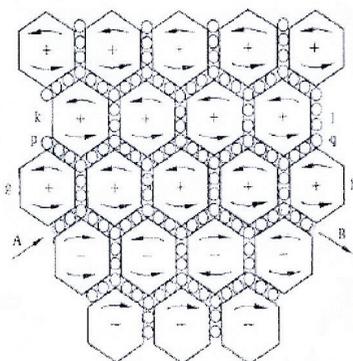


Figura 2. Los remolinos magnéticos de Maxwell en *On Physical Lines of Force*.

El tercer paso en la construcción de su modelo mecánico fue suponer que estos remolinos magnéticos estaban dotados de elasticidad. Esta hipótesis exigía una velocidad finita de variación de los estados del mecanismo: una velocidad de inducción finita. Y de paso proporcionaba una posible explicación para la electricidad estática: en un dieléctrico, los ejes de los remolinos magnéticos no pueden moverse. Si una causa exterior al mecanismo ejercía fuerza sobre las partículas eléctricas, éstas deformaban elásticamente los remolinos magnéticos. Y esta deformación ponía en juego a las fuerzas elásticas del remolino, que entonces presionaban sobre las partículas eléctricas circundantes. Y, en este modelo, se supone que la fuerza de un remolino sobre una partícula eléctrica representa la fuerza eléctrica debida a la carga.

Así pues, Maxwell —al igual que Faraday— ideó una teoría de campo de carga. Y, como veremos a continuación, la adopción de esta idea de campos de carga le aportaría a su teoría algunos de los resultados más originales.

²⁷ *Ibid.*, parte II, pp. 283-285.

La teoría electromagnética de la luz

En el verano de aquel 1861 Maxwell viajó a sus posesiones en Escocia, aparentemente satisfecho de su analogía mecánica del electromagnetismo y de la hipótesis que había formulado para los campos de carga. Pero en los siguientes meses fue cambiando su comprensión sobre las implicaciones de su propio trabajo.

Mientras atendía sus tierras y pensaba en sus modelos electromagnéticos, en el verano de ese mismo año los problemas técnicos de la telegrafía ocupaban la atención de los físicos británicos. Después de los desastrosos primeros intentos de tender un cable transatlántico,²⁸ la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia estableció un comité que se encargaría de fijar los estándares de resistencia eléctrica que permitieran que la red de cables funcionara apropiadamente. Maxwell se unió a este comité, al igual que otros físicos, y pronto los nuevos laboratorios universitarios de enseñanza de física en la Gran Bretaña estaban dedicados a hacer mediciones electromagnéticas, incluyendo el laboratorio dirigido por Thompson, en Glasgow, y el laboratorio Cavendish, en Cambridge, dirigido por Maxwell.

Estando en Escocia, ese verano de 1861, siguió trabajando en su modelo mecánico para explicar el funcionamiento del electromagnetismo con base en engranajes, bolitas y remolinos magnéticos, y fue entonces —en uno de sus muchos destellos creativos— cuando se dio cuenta de que este medio fluido ¡debía transmitir su acción a través de ondas transversales!

El mecanismo que ya había ideado para explicar la relación entre el campo magnético y la corriente eléctrica era el siguiente: la corriente eléctrica era el movimiento de las partículas eléctricas (las bolitas que rodean los hexágonos de la figura 2); cuando una partícula se movía, rozaba las paredes del remolino magnético contiguo (las células hexagonales de la figura) y lo ponía en movimiento. La rotación de este remolino provocaba la rotación de todas las partículas eléctricas que estaban en contacto con él. Estas partículas, a su vez, al girar rozaban contra los remolinos en contacto con ellas, provocando su giro, y así sucesivamente, hasta que todo el espacio se llenaba de remolinos

²⁸ En el primer intento, en 1857, el cable se reventó el primer día. Fue reparado y volvió a romperse. En el segundo intento, el verano siguiente, se rompió en tres ocasiones, a diferentes distancias. En un tercer intento, se logró por fin un empalme exitoso, y el primer mensaje fue enviado por la Reina Victoria al presidente James Buchanan el 16 de agosto de 1858, pero la comunicación entre Gran Bretaña y Norteamérica sólo duró unas semanas, y el 20 de octubre el cable dejó de funcionar, después de haberse vuelto cada vez más lenta la transmisión (hacia el final, el envío de un mensaje de media página de texto requería más de un día).

magnéticos en movimiento. Por lo tanto, una partícula eléctrica con libertad de movimiento en un conductor, produciría un campo magnético alrededor del cable.

Pero, al preguntarse qué ocurriría si la corriente eléctrica del cable disminuía, se dio cuenta de que esto implicaría —en su modelo mecánico— que las partículas eléctricas comenzarían a moverse más despacio, haciendo que los remolinos magnéticos adyacentes perdieran también velocidad. Esto significaba que se presentaría una diferencia de velocidad entre los remolinos contiguos al cable y los siguientes, con el resultado de que las partículas que quedaban entre ambos tenderían a ponerse en movimiento... Esta diferencia de velocidad, pensó Maxwell, quedaría absorbida inicialmente por una distorsión elástica de los remolinos, deformando su contorno. Entonces, estos remolinos deformados ejercerían una fuerza sobre las partículas que se movían más de prisa, disminuyendo su velocidad. Y de este modo pasaría por todo el campo una onda de desplazamiento de las partículas eléctricas y un campo magnético variable.

De este modo, Maxwell dedujo que habría ondas de desplazamiento transversal para el electromagnetismo, y que cualquier cambio en las corrientes eléctricas o en los campos se movería en el éter transmisor precisamente así, en ondas que lo harían vibrar. En este momento (verano de 1861) todavía no había concebido que el electromagnetismo es, en sí mismo, una onda... pero ya estaba cerca de comprenderlo. Y, aunque tampoco había podido probar aún que los fenómenos electromagnéticos tienen la misma naturaleza que la luz, la conexión le resultaba cada vez más evidente. Pero ¿cómo probarlo?

Como hemos mencionado, uno de los principales problemas teóricos que llevó a Maxwell a construir su nuevo modelo había sido el de desarrollar una teoría en la cual la inducción (que hasta ese momento se había considerado como un efecto instantáneo) tuviera una velocidad finita. Para asegurar la velocidad no instantánea, Maxwell había dotado a su mecanismo de masa y de elasticidad. Además —y como hemos visto— había logrado identificar muchas de las propiedades conocidas del electromagnetismo con un modelo mecánico que le permitía derivar fórmulas matemáticas. Así que pensó que si lograba deducir la velocidad de las ondas en el mecanismo a partir de estas propiedades, entonces tendría una predicción que sería contrastable con los datos experimentales, independientemente del mecanismo inventado para deducirla.

Maxwell trabajó en ello y, con ayuda de la mecánica newtoniana, de su gran habilidad matemática y de una serie de asunciones²⁹ logró calcular la velocidad

²⁹ Así, por ejemplo, supuso que la masa de las bolitas eléctricas y su elasticidad eran despreciables, y que toda la masa y toda la elasticidad estaban en los remolinos. Para una exposición más detallada de la manera en que llegó a sus ecuaciones. (F. Cánovas, *op. cit.*, pp. 26-30.)

de las ondas en medios de transmisión de diferentes densidades, a partir de mediciones de laboratorio de las fuerzas electrostáticas y electromagnéticas. De regreso, en Londres, comparó sus resultados con las observaciones electromagnéticas realizadas hacía unos años en Alemania y probó esos datos en sus ecuaciones. Para su sorpresa, ¡los resultados de esas observaciones diferían en no más de un 1% del valor para la velocidad de la luz que se había determinado en París hacía doce años! Sus cálculos le daban que la velocidad de transmisión del electromagnetismo sería de 310 740 km/seg. y Armand Hippolyte Fizeau³⁰ había calculado la velocidad de la luz en 314 858 km/seg.

“La coincidencia no es meramente numérica”, escribió a Faraday en el otoño de aquel 1861. Aparentemente la luz era una vibración del mismo medio (¿y del mismo tipo?) que era responsable de la transmisión del electromagnetismo. ¡De ninguna manera podía ser una simple coincidencia! Pero, si la luz era una onda –como había demostrado Christiaan Huygens desde el siglo XVII– ¿quería decir esto que el electromagnetismo también se transmitía por ondas, sobre el mismo éter que hacía vibrar la luz a la misma velocidad? Maxwell, que estaba preparando la tercera parte de *On Physical Lines of Force*, asentó:

La velocidad de las ondulaciones transversales en nuestro medio hipotético, calculada a partir de los experimentos electromagnéticos de los Sres. Kolhrausch y Weber, coincide tan exactamente con la velocidad de la luz calculada a partir de los experimentos ópticos del Sr. Fizeau, que difícilmente podemos evitar la inferencia de que *la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos magnéticos y eléctricos*.³¹

Pero, ¿podía ser que ambos fenómenos estuvieran mucho más estrechamente relacionados que lo que ya indicaba el hecho de ser transmitidos por el mismo medio y a la misma velocidad? Nuevamente, Maxwell sospechaba que la coincidencia en velocidades indicaba mucho más que un medio de transmisión compartido. De este modo, y trabajando en sus ecuaciones ahora tanto para

³⁰ Fizeau realizó su experimento de medición en 1849. Un rayo de luz se dirigía a un espejo a cientos de metros de distancia. En su trayecto de la fuente hacia el espejo, el rayo pasaba a través de un engranaje rotatorio. A cierto nivel de rotación, el rayo pasaría a través de un orificio en su camino de salida y, por otro, en su camino de regreso. Pero a niveles ligeramente menores, el rayo se proyectaría en uno de los dientes y no pasaría a través de la rueda. Conociendo la distancia hacia el espejo, el número de dientes del engranaje, y el índice de rotación, se podía calcular la velocidad de la luz. Fizeau la calculó en 314 858 000 m/s. Su velocidad real en el vacío, como hoy se le conoce, es de 29 792,458 m/s.

³¹ J. C. Maxwell, *op. cit.*, parte III, p. 22.

el electromagnetismo como para la luz, Maxwell comenzó la mayor unificación teórica de la historia de la física desde Isaac Newton.

Durante los siguientes dos años Maxwell se esforzó por transformar su modelo de engranajes, remolinos y bolitas móviles en una teoría dinámica general del electromagnetismo. Por fin, la teoría quedó completamente desarrollada en 1864 y la publicó al año siguiente bajo el título de *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. En este artículo Maxwell hizo al propio medio electromagnético sujeto de análisis utilizando los principios generales de la dinámica (de ahí el título “Una teoría dinámica del campo electromagnético”). Y es aquí cuando ya utiliza el concepto de ondas electromagnéticas, en lugar de simplemente líneas o campos de fuerza, y en donde reemplaza totalmente su anterior enfoque mecánico por un razonamiento más abstracto y matemático para describir el comportamiento de los campos electromagnéticos en el espacio.

Cerca del final del capítulo VI de *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, después de una brillante demostración matemática en que logra unir las ecuaciones del electromagnetismo con las de la transmisión de la luz, Maxwell escribió, triunfalmente “La concordancia de los resultados parece demostrar que la luz, la electricidad y el magnetismo son manifestaciones de la misma sustancia, y que la luz es una perturbación electromagnética que se propaga por el campo siguiendo leyes electromagnéticas”.³²

Corolario

A pesar de la hazaña intelectual y de las enormes implicaciones de la teoría electromagnética de la luz de Maxwell, gracias a la cual se logró la unificación teórica más importante de la física desde la Revolución Científica, al colocar bajo la misma explicación teórica lo que hasta entonces habían sido considerados tres diferentes tipos de fenómenos, la teoría de Maxwell fue aceptada y comprendida sólo de manera muy gradual por sus contemporáneos.³³

³² J. C. Maxwell, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, cap. VI.

³³ Sin embargo, la telegrafía jugó una vez más a favor de Maxwell, y para la década de los setentas del siglo XIX sus ecuaciones empezaron a ser enseñadas por los profesores de matemáticas de la Universidad de Cambridge, que las habían introducido en sus nuevos cursos de electromagnetismo por su utilidad para el tema de la telegrafía submarina. El propio Maxwell decidió entonces escribir *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford, Clarendon Press, 1873, expresamente para servir como libro de texto (el primero sobre el tema) para sus alumnos en Cambridge.

Thompson, que hasta entonces había sido amigo de Maxwell y su colega en el mismo campo de investigación, se convirtió en uno de sus críticos más severos. Para empezar, no le perdonaba haber abandonado su explicación mecánica del electromagnetismo en favor de una teoría electrodinámica basada en abstractas ecuaciones algebraicas. Para Thompson, la teoría electromagnética de la luz de Maxwell representaba “un retroceso, más que un paso adelante”, si no es que un tipo de “nihilismo”. En 1884, cuando Maxwell ya llevaba cinco años de haber muerto a causa de un cáncer, Thompson seguía diciendo del trabajo de su rival:

Nunca me encuentro satisfecho hasta que puedo hacer un modelo mecánico de algo. Si puedo hacer un modelo mecánico, puedo entenderlo. En tanto que no puedo hacer un modelo mecánico completo, no puedo comprender; y es por esto por lo que no puedo entender una teoría electromagnética [como la de Maxwell]. Creo firmemente en una teoría electromagnética de la luz, y que cuando comprendamos la electricidad, el magnetismo y la luz, los veremos todos juntos como parte de un todo. Pero quiero comprender la luz todo lo bien que pueda sin introducir cosas que entiendo todavía menos.³⁴

Y, al mismo tiempo que hacía declaraciones como ésta, sostenía públicamente, y de manera contradictoria, que en realidad él ya sabía todo sobre la teoría electromagnética de la luz desde antes que Maxwell la publicara, gracias a sus propios estudios sobre la propagación de las señales telegráficas en los cables submarinos.³⁵

En cuanto a “las ecuaciones de Maxwell”, que sintetizan su teoría de manera tan elegante y que hoy en día aparecen en casi todos los libros de texto de física, debe recordarse que no fueron hechas por él en su formulación vectorial actual. Las ecuaciones aparecieron en 1865 en el capítulo III de *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. En este capítulo, Maxwell formuló ocho ecuaciones (que nombró de la letra A a la H), y de esas ocho ecuaciones únicamente una, la de la Ley de Gauss (que en el conjunto de ecuaciones correspondía a

³⁴ Thompson dio este discurso en una conferencia que impartió durante las *Baltimore Lectures*. La cita completa puede consultarse en P. Kargon y P. Achinstein, eds., *Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics*, Massachusetts, The MIT Press, 1987, p. 206.

³⁵ S. Schaffer, *op. cit.*, sostiene que, en realidad, ambos físicos habían empezado a alejarse desde tiempo atrás, y que Thompson había comenzado a enemistarse con Maxwell desde que ambos tuvieron una concepción diferente de la señalización telegráfica. Maxwell sostenía que la investigación inicial de Faraday sobre la distorsión de las señales requería de un tratamiento unificado de la inducción, de la conducción y del medio circundante. El modelo de telegrafía de Thompson, en cambio, se basaba en análisis separados de la conducción a lo largo de los cables y de la inducción por el aislante alrededor de los mismos.

la letra G) ha sobrevivido en su forma original en los libros de texto actuales. El mérito de haber reducido esas ocho ecuaciones algebraicas originales a las elegantes cuatro ecuaciones vectoriales actuales, correspondió a un brillante telegrafista de Londres, Oliver Heaviside, que las publicó en 1885 (21 años después de la publicación de *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*) en *The Electrician*, que no era una revista científica sino una publicación para ingenieros y hombres de negocios. De manera simultánea e independiente, en Alemania, el físico Heinrich Hertz llegó a la misma expresión vectorial simplificada de las ecuaciones de Maxwell. Por esta razón, estas cuatro ecuaciones no fueron conocidas inicialmente como “las ecuaciones de Maxwell”, sino como “las ecuaciones Hertz-Heaviside”.

En su versión original de ocho ecuaciones, Maxwell empleaba un sistema de cuaterniones³⁶ y su planteamiento era esencialmente algebraico. Y en la opinión de algunos autores, aunque las fórmulas que lograron Heaviside y Hertz son un modelo de compacidad y síntesis, el tratamiento en cuaterniones de Maxwell resulta más intuitivo y permite deducir mejor los fenómenos que describen, ya que los cuaterniones se prestan muy bien para representar los campos magnéticos y las orientaciones y rotaciones en el espacio de objetos en tres dimensiones.

Pero lo más importante de las ecuaciones de Maxwell (ya sea en su formulación original en cuaterniones, o en la moderna formulación vectorial) es que trascienden la física clásica e introducen la existencia del campo como algo real. En palabras de Einstein:

La formulación de estas ecuaciones es el acontecimiento más importante de la física desde el tiempo de Newton, no sólo por la riqueza de su contenido, sino porque representan un modelo o patrón para un nuevo tipo de ley [...]

Según la experiencia de Faraday, tiene que haber un conductor que revele la existencia del campo eléctrico, igual que resulta indispensable la presencia de un polo o de una aguja magnética para probar la existencia del campo magnético en la experiencia de Oersted. La nueva concepción teórica de Maxwell va más allá de los resultados de dichos experimentos. [...] el campo electromagnético es, en la teoría de Maxwell, algo real. El campo eléctrico es creado por un campo magnético variable independientemente de la existencia de un conductor, y se crea un campo magnético por un campo eléctrico variable, haya o no un polo magnético.

³⁶ Los cuaterniones son una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos. Así, mientras que en los números complejos se emplea el número i , tal que $i^2 = -1$, los cuaterniones se generan de manera análoga añadiendo las unidades imaginarias: i , j y k a los números reales, con propiedades tales que $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$.

[...] el campo electromagnético una vez creado existe, actúa y varía según las leyes de Maxwell. [...] su validez se extiende a todo el espacio contrariamente a las leyes de tipo mecánico, que valen tan sólo para aquellos lugares donde haya materia o cargas eléctricas o magnéticas. [...] No relacionan, como las leyes de Newton, dos sucesos distantes; no reconocen la “acción a distancia”. El campo “aquí” y “ahora” depende del campo que había en el entorno inmediato en un instante inmediatamente anterior. Las ecuaciones permiten predecir lo que pasará un poco más allá de un cierto lugar del espacio, un instante después, si conocemos lo que pasa “ahora” y “aquí”.³⁷

Discusión

La teoría electromagnética de la luz fue un enorme logro intelectual y constituye, probablemente, la teoría unificadora de la física más importante hasta la creación del modelo estándar a mediados del siglo xx. Maxwell logró esta hazaña creativa a partir de una conjunción de circunstancias y cualidades. Entre las circunstancias que lo influyeron debemos destacar, en primer lugar, los experimentos e hipótesis de Faraday quien, aun sin poseer un entrenamiento matemático formal, como el de Maxwell —por lo que difícilmente podía haber logrado lo que hizo este último—, era un experimentador muy hábil y con una intuición brillante. Faraday no sólo proporcionó una base experimental sobre la cual Maxwell, Thompson y otros pudieron trabajar, sino que proveyó intuiciones creativas que, en la mente matemática de Maxwell, produjeron hipótesis fructíferas.

En segundo lugar, el uso enormemente creativo de Maxwell del método analógico le permitió imaginar analogías mecánicas y modelos inverosímiles que, sin embargo, combinados con su capacidad matemática, rindieron como fruto varias generaciones de fórmulas que, al final, derivaron en sus ecuaciones unificadoras de la electricidad, el magnetismo y la luz. El logro intelectual de estas analogías es todavía más notable cuando tomamos en cuenta que las hizo bajo el supuesto de que existía un medio de transmisión, el éter, que en realidad nunca ha existido, y al que asignó una serie de propiedades físicas que eran las que daban sentido a sus analogías mecánicas.

En tercer lugar, fue influido también por una metafísica cartesiana que compartía con Thompson y que le llevó a comprometerse con supuestos que, a la postre, resultaron experimentalmente confirmados, como la velocidad finita

³⁷ A. Einstein y L. Infeld, “La evolución en la física. Campo y relatividad”, en Stephen Hawking, ed., *La gran ilusión. Las grandes obras de Albert Einstein*. Barcelona, Crítica, 2010, pp. 387-390.

de la inducción electromagnética y la no acción a distancia de las atracciones electromagnéticas.

Finalmente, las condiciones tecnológicas y políticas de la época influyeron en su interés por el electromagnetismo y en la cantidad de datos a los que tuvo acceso para trabajar con ellos. La naciente necesidad de una comprensión teórica de la conducción de señales en los cables telegráficos submarinos constituyó un aliciente y una fuente de datos muy importante, tanto para Maxwell como para los colegas con quienes competía por comprender los fenómenos electromagnéticos, como Thompson. En el prefacio de su *Treatise on Electricity and Magnetism*, de 1873, Maxwell admite su deuda con la telegrafía, y afirma que gracias a ella se asignó “un valor comercial a hacer medidas eléctricas con exactitud” y que también permitió realizar pruebas y experimentos “en una escala que trascendía por mucho la de los laboratorios ordinarios”, privados o públicos. De hecho —y como señala Schaffer— la telegrafía proveyó, también, un apoyo empírico crucial a la teoría de Maxwell a través de las mediciones que se hicieron de la electrostática y el electromagnetismo en las líneas de conducción entre 1868 y 1869.

Con todas estas influencias y su gran capacidad intelectual, Maxwell fue capaz de una hazaña enorme que va incluso más allá de la unificación teórica que representa su teoría electromagnética de la luz. Y es que Maxwell logró, asimismo, trascender la física de la mecánica newtoniana —de fuerzas que actúan sobre objetos con masa—, y a pesar de haber trabajado con analogías mecánicas, fue capaz de ir más allá e imaginar una nueva física en la que los campos electromagnéticos, una vez creados, son algo real, que existen y actúan según las leyes que describió en sus ecuaciones.

Por último, una nota sobre el comentario que hicimos en la introducción de este artículo, sobre si la ciencia avanza primero como ciencia pura, y después como ciencia aplicada. El caso del electromagnetismo, y específicamente su interrelación con la tecnología de los cables telegráficos submarinos, muestra que no existe un orden claro, y que la tecnología y la teoría se refuerzan alternativamente, en una espiral en la que ambas se alimentan sucesivamente de la otra. No hay ciencia pura primero y después ciencia aplicada. El caso del electromagnetismo muestra que las dos se van creando en pasos sucesivos, impulsándose mutuamente.

Fecha de recepción: 20/07/2012

Fecha de aceptación: 05/02/2013