



LA UNIFICACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

150 ANIVERSARIO DE LAS ECUACIONES DE MAXWELL

Augusto Beléndez Vázquez

Cuando utilizamos los teléfonos móviles, escuchamos la radio, usamos el mando a distancia, vemos la televisión o calentamos los alimentos en el microondas es probable que no sepamos que James Clerk Maxwell es el responsable de que esta tecnología sea posible. En 1865 Maxwell publicó un artículo titulado «Una teoría dinámica del campo electromagnético» en el que afirmaba: «parece que tenemos razones de peso para concluir que la propia luz (incluyendo el calor radiante y otras radiaciones si las hay) es una perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan según las leyes del electromagnetismo» (Maxwell, 1865). Este año 2015 se celebra el 150 aniversario de las ecuaciones de Maxwell y de la teoría electromagnética de la luz, acontecimientos que se conmemoran en el «Año internacional de la luz y de las tecnologías basadas en la luz», declarado como tal por la ONU.

A comienzos del siglo XIX, electricidad, magnetismo y óptica eran tres disciplinas independientes. Sin embargo, la situación cambió gracias a una invención y a dos descubrimientos. La invención fue la pila eléctrica, una fuente de corriente eléctrica continua, fabricada por Alessandro Volta hacia 1800. Los dos descubrimientos fueron, por una parte, la demostración de los efectos magnéticos producidos por corrientes eléctricas realizada por Hans Christian Oersted y André-Marie Ampère en 1820; y por otra, el descubrimiento de Michael Faraday en 1831 de la generación de corriente eléctrica a partir de campos magnéticos: la inducción electromagnética. Estas contribuciones pusieron los pilares del electromagnetismo moderno, que culminó en el último tercio del siglo XIX con la síntesis de Maxwell de la electricidad, el magnetismo y la óptica. Dicha síntesis representa probablemente la más profunda transformación de los fundamentos de la física desde los tiempos de Newton y es uno de los mayores logros de la ciencia, al unificar los fenómenos eléctricos y magnéticos y al permitir también desarrollar

la teoría de las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz (Udías, 2004).

■ ORÍGENES DEL ELECTROMAGNETISMO MODERNO

Hans Christian Oersted (1777-1851) estudió filosofía natural en la Universidad de Copenhague, de la que fue catedrático de Física y Química (Pérez y Varela, 2003). La invención de la pila eléctrica había sido una auténtica revolución entre los científicos al permitirles trabajar con fuentes permanentes de «fluido eléctrico». Oersted empezó a realizar experimentos con una pila voltaica y en abril de 1820 comprobó que una corriente eléctrica desviaba una aguja imantada situada en sus proximidades. Había descubierto que una corriente eléctrica producía efectos magnéticos y que la electricidad y el magnetismo no eran fenómenos independientes. Oersted publicó sus resultados en un breve artículo en latín, *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, fechado el 21 de julio de 1820, y acuñó el término *electromagnetismo* para designar a la parte de la física que englobaría desde entonces a ambos fenómenos.

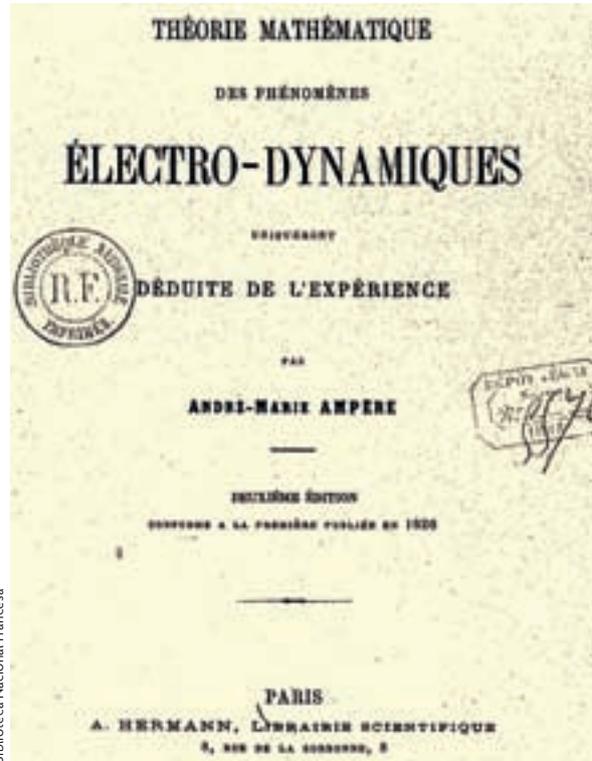
Contemporáneo de Oersted fue el francés André-Marie Ampère (1775-1836). Sus primeros años estuvieron marcados por la Revolución Francesa y por la ejecución de su padre en la guillotina (Pérez y Varela, 2003). Tras ser durante varios años profesor de física y química en colegios de enseñanza secundaria, en 1804 obtuvo una plaza de profesor en la Escuela Politécnica de París y en 1814 fue admitido en la Academia de Ciencias francesa. Aunque Ampère mostró grandes cualidades para las matemáticas, la óptica y la química, sus contribuciones más importantes las hizo en el campo del electromagnetismo. En 1820 tuvo noticias del descubrimiento de Oersted, ese *conflictus electrici* capaz de hacer que se desviara una aguja imantada, y ese mismo verano realizó diversos experimentos. Si una

«A COMIENZOS DEL SIGLO XIX, ELECTRICIDAD, MAGNETISMO Y ÓPTICA ERAN TRES DISCIPLINAS INDEPENDIENTES»

A la izquierda, imagen de James Clerk Maxwell (1831-1879), quien, junto con Newton y Einstein, está considerado uno de los grandes de la historia de la física. Su teoría del campo electromagnético resultó fundamental tanto para la comprensión de los fenómenos naturales como para el desarrollo del mundo de la técnica y, en particular, de las telecomunicaciones.



Mérodé



Biblioteca Nacional Francesa

La demostración de los efectos magnéticos producidos por corrientes eléctricas realizada por Hans Christian Oersted y André-Marie Ampère en 1820 contribuyó a sentar las bases del electromagnetismo moderno. A la izquierda, imagen de Oersted. A la derecha, portada de la *Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos* de Ampère.

corriente eléctrica producía efectos magnéticos sobre un imán, ¿por qué no podría producir efectos magnéticos sobre otra corriente?

En septiembre de 1820 presentó sus resultados en la Academia de Ciencias: la acción mutua entre corrientes sin intervención de ningún imán. Esto es, dos corrientes eléctricas paralelas se atraen o se repelen en función de si sus sentidos son iguales u opuestos, respectivamente. En 1826 publicó su libro *Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos deducida únicamente de la experiencia*, en el que afirmaba que «el magnetismo es electricidad en movimiento» y que los fenómenos magnéticos dependen sólo de la existencia y del movimiento de cargas eléctricas.

El caso de Michael Faraday (1791-1867) no es frecuente en la historia de la física. De familia humilde, abandonó la escuela a los trece años para trabajar en un taller de encuadernación. Allí se despertó su pasión por la ciencia tras la lectura de la voz *electricidad* de la *Enciclopedia Británica* cuando la estaba encuadernando, tras lo cual comenzó a hacer experimentos en un laboratorio improvisado. En 1813 fue contratado como ayudante de laboratorio de Humphrey Davy en la Royal Institution de Londres, de la que sería elegido miembro en 1824 y donde trabajó hasta su muerte en 1867. Faraday causó tal impresión a Davy que éste,

al ser preguntado por cuál había sido su mayor descubrimiento científico, respondió: «Mi gran descubrimiento ha sido Michael Faraday» (Díaz, 2001).

En 1821 Faraday repitió el experimento de Oersted situando un pequeño imán alrededor de un hilo con corriente y comprobó que la fuerza ejercida por la corriente sobre el imán era de naturaleza circular. Como expresó años después, el hilo estaba rodeado por una serie infinita de «líneas de fuerza» circulares y concéntricas: el campo magnético de la corriente, término acuñado por Faraday. En 1831 consiguió producir una corriente eléctrica a partir de una acción magnética, fenómeno conocido como inducción electromagnética. Comprobó que al hacer pasar una corriente eléctrica por una bobina, se generaba otra corriente de muy corta duración en otra bobina próxima. Este descubrimiento marcó un hito decisivo en el progreso, no sólo de la ciencia sino de la sociedad y es el utilizado hoy en día para producir energía eléctrica a gran escala en las centrales eléctricas.

Faraday abandonó la teoría de los fluidos para explicar la electricidad y el magnetismo e introdujo los conceptos de *campo* y *líneas de campo*, apartándose de la descripción mecanicista de los fenómenos naturales al más puro estilo newtoniano de *acciones a distancia*.

Lucía Sapiña



Michael Faraday introdujo el concepto de *líneas de fuerza* para representar los campos eléctrico y magnético y en 1831 consiguió producir una corriente eléctrica a partir de una acción magnética. En la imagen, estatua de Faraday que preside la entrada a la Royal Institution de Londres.

«FARADAY ACUÑÓ EL CONCEPTO DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO Y EN 1831 CONSIGUIÓ PRODUCIR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA A PARTIR DE UNA ACCIÓN MAGNÉTICA»

■ JAMES CLERK MAXWELL

James Clerk Maxwell (1831-1879) fue uno de los científicos más importantes de todos los tiempos. Nos dejó la teoría del campo electromagnético, fundamental no sólo desde el punto de vista de la comprensión de los fenómenos naturales sino por su aplicación al mundo de la técnica, en particular al hoy omnipresente universo de las telecomunicaciones. Maxwell es uno de los grandes de la historia de la física, junto con Newton y Einstein (Sánchez Ron, 2006).

Maxwell nació en Edimburgo en el seno de una familia acomodada. Tras recibir educación privada en la finca familiar de Glenlair, fue enviado a la Academia de Edimburgo, en la que estuvo cinco años y donde aprendió francés, alemán, lógica, filosofía, química y matemáticas. En 1847 accedió a la Universidad de Edimburgo y después de tres cursos ingresó en la Universidad de Cambridge, el centro más influyente de la física en aquella época, siendo admitido en el Trinity College. Al finalizar sus estudios Maxwell ganó la cátedra de filosofía natural del Marischal College de Aberdeen, donde estuvo cuatro años. Allí realizó investigaciones sobre la teoría del color y contrajo matrimonio con Katherine Mary Dewar, hija del *Principal* del College. En 1860 abandonó Aberdeen para ocupar otra cátedra en el King's College de Londres y un año después fue nombrado miembro de la Royal Society. En febrero de 1865, a mitad de curso, renunció a su cátedra londinense por voluntad propia, para volver a su finca escocesa de Glenlair (Reid, 2014). Allí escribió su gran obra, publicada en 1873, el *Tratado de electricidad y magnetismo*, dos volúmenes de más de 500 páginas cada uno, texto cumbre de la física del siglo XIX y comparable a los *Principia* de Newton publicados casi dos siglos antes. En esta obra, Maxwell consigue unificar todos los fenómenos conocidos hasta el momento sobre electricidad y magnetismo.

En 1871 Maxwell fue designado para ocupar la recién creada cátedra de Física Experimental de la Universidad de Cambridge y en 1874 se le dotó de un nuevo centro de investigación, el Laboratorio Cavendish, del que fue el primer director. A principios de 1879 la salud de Maxwell empezó a resentirse y el 5 de noviembre de ese mismo año falleció de cáncer abdominal. Tenía 48 años.

■ LAS ECUACIONES DE MAXWELL

Maxwell nos dejó contribuciones en la teoría del color, el conocimiento de la estructura de los anillos de Saturno y la física estadística, pero sobre todo en electromagnetismo. En 1856 publicó *Sobre las líneas de fuerza de Faraday* y en 1861 *Sobre las líneas físicas*

de fuerza. En estos dos artículos proporcionó una explicación matemática de las ideas de Faraday sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos en función de la distribución de líneas de fuerza en el espacio, abandonando definitivamente la doctrina clásica de las fuerzas eléctricas y magnéticas como acciones a distancia. Su teoría matemática incluía el éter, ese «espíritu sutilísimo» como lo describiera Newton. Las interacciones electromagnéticas las estudiaba con toda naturalidad en el marco de un éter omnipresente. Maxwell se mantuvo firme en que el éter no era una entidad hipotética sino real y, de hecho, para los físicos del siglo XIX el éter era tan real como las piedras que formaban el Laboratorio Cavendish.

Con 33 años publicó «Una teoría dinámica del campo electromagnético». En este artículo Maxwell incluye veinte ecuaciones que denominó «ecuaciones generales del campo electromagnético» y que relaciona con veinte variables que rigen el comportamiento de la interacción electromagnética. El artículo consta de 53 páginas y contiene siete partes distintas. Sus veinte ecuaciones generales del campo electromagnético, que expresan y resumen las leyes experimentales del electromagnetismo, proporcionan una base teórica completa para el tratamiento de los fenómenos electromagnéticos clásicos. Con ellas, Maxwell mostró cómo la electricidad y magnetismo no son sino manifestaciones diferentes de un mismo substrato físico, electromagnético (Sánchez Ron, 2006).

En 1884 Oliver Heaviside y, posteriormente y de forma independiente, Heinrich Hertz, utilizando la notación vectorial, sintetizaron las veinte ecuaciones del campo electromagnético en las cuatro ecuaciones de Maxwell que conocemos hoy en día: la ley de Gauss del campo eléctrico, la ley de Gauss del campo magnético, la ley de Faraday-Henry de la inducción electromagnética y la ley de Ampère-Maxwell. Desde entonces las ecuaciones del electromagnetismo se conocieron como ecuaciones de Hertz-Heaviside o de Maxwell-Hertz, hasta que en 1940 Einstein popularizó el término «ecuaciones de Maxwell» (Turnbull, 2013). El físico de origen austríaco Ludwig Boltzmann consideró que estas ecuaciones eran tan bellas por su simplicidad y elegancia que, con una cita del *Fausto* de Goethe, se preguntó: «¿Fue acaso un dios el que escribió estos signos?» (Darrigolp, 2002).

En la sexta parte de su artículo de 1865, titulada «Teoría electromagnética de la luz», Maxwell concluye: «difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz no es otra cosa que ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos». Maxwell demostró que las ecuaciones del campo electromagnético podían combinarse para dar lugar a una ecuación de onda y propuso la existen-



James Clerk Foundation

En 1871 Maxwell fue designado para ocupar la recién creada cátedra de Física Experimental de la Universidad de Cambridge y en 1874 se le dotó de un nuevo centro de investigación, el laboratorio Cavendish (en la imagen), del que fue el primer director.

cia de las ondas electromagnéticas. Al calcular la velocidad de propagación de estas ondas obtuvo el valor de la velocidad de la luz, y concluyó que la luz era una onda electromagnética.

Einstein se refirió a ese momento crucial de Maxwell señalando: «¡Los sentimientos que debió experimentar al comprobar que las ecuaciones diferenciales que él había formulado indicaban que los campos electromagnéticos se expandían en forma de ondas a la velocidad de la luz! A muy pocos hombres en el mundo les ha sido concedida una experiencia de esa índole» (Einstein, 1940). Antes de Maxwell, la velocidad de la luz era sólo una velocidad entre muchas. Después de él, la velocidad de la luz se convirtió en una privilegiada, señalando el camino a Einstein y la relatividad.

Las ondas electromagnéticas fueron producidas por Heinrich Hertz en un laboratorio en 1888, lo que confirmó la teoría de Maxwell. En 1901 el ingeniero italiano Guillermo Marconi realizó una transmisión mediante ondas electromagnéticas a través del océano Atlántico, entre Cornualles (Inglaterra) y San Juan de Terranova (Canadá). Marconi recibió el premio Nobel de Física en 1909 por sus contribuciones al desarrollo de la telegrafía sin hilos.



James Clerk Foundation

En 1865, Maxwell renunció a su cátedra en el King's College de Londres para volver a su finca escocesa de Glenlair. Allí escribió su gran obra, el *Tratado de electricidad y magnetismo*, texto cumbre de la física del siglo XIX y comparable a los *Principia* de Newton publicados casi dos siglos antes. En la imagen, James Clerk Maxwell con su mujer, Katherine Mary Dewar, en 1869.

Rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja, microondas y ondas de radio y televisión, todas estas radiaciones constituyen el espectro de las ondas electromagnéticas, ondas cuya existencia predijo Maxwell hace 150 años. La síntesis de Maxwell marcó un hito en la historia de la unificación de las fuerzas de tal envergadura que a finales del siglo XIX muchos físicos pensaban que las leyes físicas ya estaban suficientemente comprendidas. Esto condujo al físico norteamericano Albert Michelson a escribir: «las leyes fundamentales de la física ya han sido descubiertas y están establecidas tan firmemente que la posibilidad de que se realicen más descubrimientos fundamentales es extremadamente remota; a lo sumo se perfeccionarán las determinaciones de las constantes físicas alcanzando seis o siete cifras decimales» (Michelson, 1903). Nada más lejos de la realidad. En los primeros años del siglo XX se produjeron dos cambios trascendentales en la física con la teoría de los cuantos de Planck (1900) y la teoría de la relatividad especial de Einstein (1905), ambas consecuencia de la teoría electromagnética de Maxwell, que sentó las bases para es-

tas dos ideas revolucionarias. Es evidente que Maxwell abrió las puertas a la física del siglo XX (Gabàs, 2012).

■ EL LEGADO DE MAXWELL

Aunque el trabajo de Maxwell sobre electromagnetismo fue crucial, tenía sus limitaciones y una de ellas era la conciliación de la mecánica newtoniana y el electromagnetismo de Maxwell, problema que fue resuelto por Einstein en 1905 con su teoría de la relatividad especial. Tras los trabajos de Einstein, el éter luminífero—el centro de atención de la física del siglo XIX— estaba muerto y enterrado. El propio Einstein reconoció que su teoría especial de la relatividad debía sus orígenes a las ecuaciones de Maxwell. En un artículo publicado en 1931, con ocasión del centenario del nacimiento de Maxwell, afirmó que «una época científica acabó y otra empezó con Maxwell» y que «el trabajo de James Clerk Maxwell cambió el mundo para siempre» (Einstein, 1931).

Richard Feynman, premio Nobel de Física en 1965, señaló: «con una perspectiva muy amplia de la historia de la humanidad contemplada, pongamos por caso dentro de diez mil años, no cabe la menor duda de que se considerará que el hecho más significativo del siglo XIX es el descubrimiento realizado por Maxwell de las leyes del electromagnetismo» (Feynman *et al.*, 1987). ☺

REFERENCIAS

- DARRIGOLP, O., 2002. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press. Oxford.
- DÍAZ, J. A., 2001. *El gran cambio de la física*. Faraday. Nívola Libros y Ediciones. Madrid.
- EINSTEIN, A., 1931. «Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality». En THOMSON, J. J. *et al.* *James Clerk Maxwell: A Commemoration Volume 1831-1931*. University Press. Cambridge.
- EINSTEIN, A., 1940. «Considerations Concerning the Fundamentals of Theoretical Physics». *Science*, 91: 487-492. DOI: <10.1126/science.91.2369.487>.
- FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R. B. y M. SANDS, 1987. *Física. Volumen II: Electromagnetismo y materia*. Addison-Wesley Iberoamericana. México.
- GABÀS, J., 2012. *La naturaleza de la luz: Maxwell*. Nívola Libros y Ediciones. Madrid.
- MAXWELL, J. C., 1865. «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155: 459-512. Disponible en: <<http://www.jstor.org/stable/108892>>.
- MICHELSON, A., 1903. *Light and Their Uses*. The University of Chicago Press. Chicago.
- PÉREZ, M. C. y P. VARELA, 2003. *Orígenes del electromagnetismo. Oersted y Ampère*. Nívola Libros y Ediciones. Madrid.
- REID, S., 2014. «Maxwell at King's College, London». En FLOOD, R. *et al.* (eds.), 2014. *James Clerk Maxwell. Perspectives on His Life and Work*. Oxford University Press. Oxford.
- SÁNCHEZ RON, J. M. (ed.), 2006. *J. C. Maxwell: Materia y movimiento*. Crítica. Barcelona.
- TURNBULL, G., 2013. «Maxwell's Equations». *Proceedings of the IEEE*, 101 (7): 1801-1805. DOI: <10.1109/JPROC.2013.2263616>.
- UDÍAS, A., 2004. *Historia de la física. De Arquímedes a Einstein*. Síntesis. Madrid.

Augusto Beléndez Vázquez. Catedrático de Física Aplicada y director del Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías. Universidad de Alicante.