

EFEMÉRIDES

150 AÑOS DE LA PUBLICACIÓN DE LA
TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LA LUZ
DE MAXWELL

INTRODUCCIÓN

Los físicos estamos familiarizados con Maxwell, pero la mayoría de los no científicos cuando utilizan sus teléfonos móviles, escuchan la radio, ven la televisión, usan el mando a distancia, se conectan a una red Wifi o simplemente calientan sus alimentos en el microondas, es probable que no sepan que Maxwell es responsable de que esta tecnología sea posible [1]. Es evidente que lo que hizo Maxwell afecta a cada día de nuestras vidas. Hace 150 años, en 1865, Maxwell publicó el artículo titulado “Una teoría dinámica del campo electromagnético” (*A dynamical theory of the electromagnetic field*) [2] que contenía las ecuaciones de Maxwell, la predicción teórica de la existencia de las ondas electromagnéticas y la teoría electromagnética de la luz, y en el que concluía [3]:

“... 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”.

Así pues, en 2015 se cumple el 150 aniversario de la teoría electromagnética de la luz y éste es uno de los acontecimientos que se conmemoran en el “Año internacional de la luz y de las tecnologías basadas en la luz”, junto con otros hitos importantes en la ciencia de la luz como son la publicación del Libro de la Óptica de Alhacén en 1015, la teoría ondulatoria de la luz publicada por Fresnel en 1815, la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico de 1905, el centenario de la incorporación de la luz en la cosmología mediante la relatividad general en 1915, también por Einstein, el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo de microondas del cosmos por Penzias y Wilson, ese eco del origen del Universo y

una prueba del Big Bang, y los logros de Kao en la transmisión de luz por fibras ópticas para comunicaciones, ambos de 1965.

TRES FENÓMENOS INDEPENDIENTES

A comienzos del siglo XIX, luz, electricidad y magnetismo eran considerados tres fenómenos independientes [4-6]. Mientras que el interés por la óptica estaba justificado por su aplicación en los instrumentos ópticos, los fenómenos eléctricos y magnéticos interesaban a los científicos, pero no al público en general al no haber dado lugar a aplicaciones prácticas. Sin embargo, como se mostrará en este trabajo, todo cambió a partir de 1800 cuando se pusieron “los pilares de la de la teoría electromagnética de la luz”. Se analizará el papel fundamental de Young y Fresnel en la aceptación y desarrollo posterior de la teoría ondulatoria de la luz; así como la “unificación electromagnética” iniciada por Oersted, Ampère y Faraday; para concluir con la “síntesis de Maxwell” de la luz, la electricidad y el magnetismo, que dio lugar a la “teoría electromagnética de la luz”. Esta “síntesis” es uno de los mayores logros de la Física, pues no sólo permitió unificar los fenómenos luminosos, eléctricos y magnéticos, sino que también permitió desarrollar la teoría de las ondas electromagnéticas, entre las cuales se incluye la luz [3, 7].

HACIA LA TEORÍA ONDULATORIA DE LA LUZ

A finales del siglo XVII existían dos teorías enfrentadas sobre la naturaleza de la luz, la teoría ondulatoria defendida por Christian Huygens (1629-1695) y Robert Hooke (1635-1703) y que suponía que la luz es un fenómeno ondulatorio al igual que el sonido; y la teoría corpuscular a cuya cabeza se situó Isaac Newton (1643-1727), y en la que la luz se suponía constituida por partículas luminosas. Si se tiene en cuenta que Newton y Hooke eran enemigos irreconciliables, no es difícil imaginar lo que sucedió. Durante todo el siglo XVIII la teoría corpuscular de la luz gozó del favor de la mayoría de los científicos, fundamentalmente por el peso de la autoridad científica de Newton, que cayó como una losa sobre la teoría ondulatoria aplastando a sus partidarios [8].

Sin embargo, las cosas cambiaron a partir de 1801 gracias a la demostración experimental del carácter ondulatorio de la luz realizada por el inglés Thomas Young (1773-1829) mediante su famoso “experimento de la doble rendija” (Figura 1), considerado como uno de los experimentos más bellos de la Física [9], y que demostraba el carácter ondulatorio de la luz al sufrir ésta el fenómenos de las interferencias, propio de las ondas. En 1801 Young presentó ante la *Royal Society* el trabajo titulado “Sobre la teoría de la luz y los colores” y en 1803 “Experimentos y cálculos relativos a la óptica física” en el que demostraba experimentalmente la “ley general de la interferencia de la luz” y afirmaba que la luz es una onda. Como todas las ondas conocidas por aquel entonces requerían de un medio material para su propagación, como sucede con el sonido, las ondas en un estanque o las olas del mar, Young consideró que la luz se propagaba en un medio, el éter luminífero, que “impregna todo el Universo y que es raro y elástico en alto grado” y afirmó de forma contundente que “la luz radiante consiste en ondulaciones del éter luminífero”.

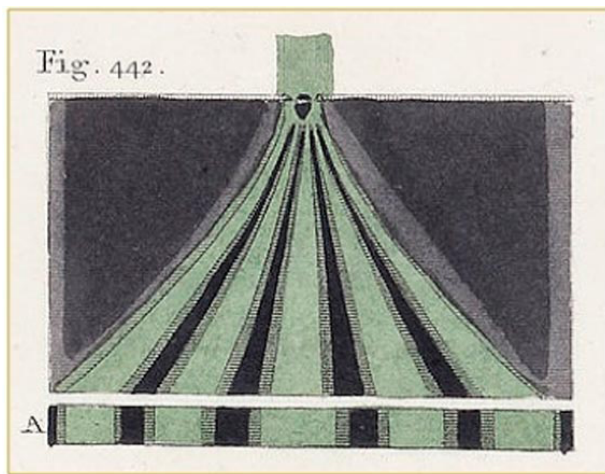


Figura 1. Diagrama interferencial observado por Young (Plate XXX, Fig. 442, *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. Thomas Young, 1807). Fuente: Wikipedia.

Del mismo modo que Young es responsable del resurgimiento de la teoría ondulatoria de la luz en Inglaterra, Augustin Fresnel (1788-1827) en Francia llevó a cabo el desarrollo matemático de la teoría ondulatoria de la luz y la aplicó a todos los fenómenos conocidos entonces. Fresnel redescubrió el fenómeno de las interferencia [7] con variantes del experimento de la doble rendija de Young usando el “biprisma de Fresnel” y los “espejos de Fresnel”. El 15 de octubre de 1815 Fresnel presenta su “Memoria sobre la difracción de la luz” en la que sinte-

tizó los conceptos de la teoría ondulatoria de Huygens y el principio de interferencia de Young y analizó el fenómeno de la difracción, propio de las ondas, y que se presenta cuando una onda es distorsionada por un obstáculo. Fresnel dio rigor matemático a la teoría ondulatoria de la luz, cuyo segundo centenario también se conmemora en este Año Internacional de la Luz. Su teoría tuvo un gran éxito y dio lugar a una avalancha de nuevos descubrimientos. Fresnel también estudió la polarización de la luz, concluyó que las ondas luminosas eran transversales y desarrolló la teoría de la óptica de cristales. Al igual que Young adoptó el concepto de éter luminífero como medio en el que se propagan las ondas luminosas. Como la luz es una onda transversal sólo se podía propagar en los sólidos y concluyó que el éter tenía las propiedades de un sólido elástico de elevada rigidez, idea que se contraponía con la de su enorme sutileza que permitía a todos los cuerpos moverse a través del éter sin dificultad. De este modo el éter empezaba a presentar propiedades físicas contradictorias [3, 7, 10].

LA UNIFICACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Puede afirmarse afirmar, sin riesgo a equivocarse, que el electromagnetismo moderno es el resultado de una invención y dos descubrimientos, todos ellos acaecidos en el primer tercio del siglo XIX [5]. La invención es la pila eléctrica, realizada por Volta hacia el año 1800 y que permitió disponer de una fuente de corriente eléctrica continua. Los dos descubrimientos son la demostración de los efectos magnéticos producidos por corrientes eléctricas realizada por Oersted y Ampère en 1820, y la generación de corriente eléctrica a partir de campos magnéticos, conocida como inducción electromagnética, descubierta por Faraday en 1831 [4].

La contribución más importante del danés Hans Christian Oersted (1777-1851) al electromagnetismo fue su demostración de 1820 que probaba que una corriente eléctrica era capaz de desviar una aguja imantada situada en sus proximidades (Figura 2). Había descubierto que una corriente eléctrica produce efectos magnéticos. Su famoso experimento es muy sencillo. Situó una aguja imantada libremente orientada en la dirección nortesur; a continuación colocó un cable eléctrico sobre la aguja en la misma dirección y lo conectó a una pila. Al cerrar el circuito comprobó que la aguja imantada se desviaba de su dirección original situándose perpendicular al cable, en la dirección este-oeste. Si la corriente

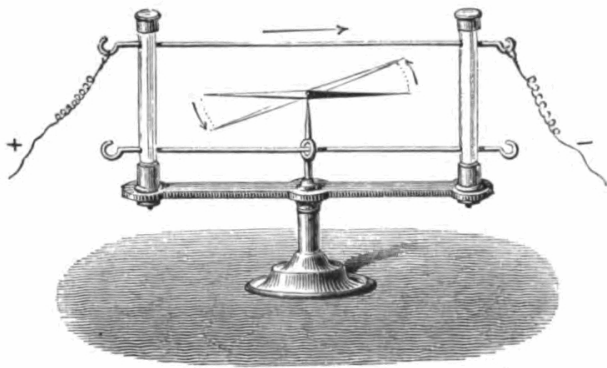


Figura 2. Experimento de Oersted. Fuente: Wikipedia.

eléctrica era capaz de hacer girar la aguja imantada, Oersted concluyó que una corriente produce efectos magnéticos y que la electricidad y el magnetismo no son fenómenos independientes. Publicó sus resultados en un breve artículo escrito en latín y titulado “Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam”, que envió a las principales revistas científicas europeas hacia julio de 1820 [4].

Contemporáneo de Oersted fue el francés André-Marie Ampère (1775-1836), que demostró que una corriente eléctrica produce efectos magnéticos sobre otra corriente. Ampère mostró grandes cualidades para las matemáticas y se paseó por la óptica y por la química, sin embargo, su contribución más importante la realizó en el campo del electromagnetismo [4, 6]. En 1820 Ampère tuvo noticias del increíble descubrimiento de Oersted, ese *conflictus electrici* que era capaz de hacer que se desviara una aguja imantada. Ampère estuvo obsesionado durante una semana con este *conflictus* hasta que ideó una experiencia más compleja. Durante el verano de 1820, y tras repetir en numerosas ocasiones el experimento de Oersted, llegó a la conclusión de que si una corriente eléctrica produce efectos magnéticos sobre un imán, ¿por qué no podría producir efectos magnéticos sobre otra corriente? El 25 de septiembre de 1820 expuso sus resultados ante la Academia de Ciencias francesa y anunció un hecho nuevo: La acción mutua entre corrientes sin intervención de ningún imán [4]. Dos corrientes eléctricas paralelas se atraen o se repelen en función de si sus sentidos son iguales u opuestos, respectivamente. En 1826 publica su libro “La teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos deducida únicamente de la experiencia”, en el que afirma que “el magnetismo es electricidad en movimiento” y que “los fenómenos magnéticos dependen sólo de la existencia y del movimiento de cargas eléctricas” [4]. Ampère y Fres-

nel fueron íntimos amigos y hasta Fresnel llegó a vivir en casa de Ampère en París. Ambos mantuvieron fructíferas conversaciones científicas y filosóficas y Ampère pensó que el éter luminífero de Fresnel en el que se propagaban las ondas luminosas podría ser también el medio de transmisión de la electricidad y el magnetismo. Nos encontramos con el primer atisbo de relación entre la luz y el electromagnetismo, una auténtica avanzadilla de lo que vendría después [4].

El otro hecho fundamental en la unificación de la electricidad y el magnetismo fue el descubrimiento de la inducción electromagnética realizado por Michael Faraday (1791-1867) en Inglaterra en 1831, y se trata de la generación de corriente eléctrica a partir de una campo magnético. El caso de Michael Faraday es ciertamente atípico en la historia de la física, pues a pesar de que su formación era muy elemental, el conocimiento que se tiene de las leyes sobre la electricidad y el magnetismo se debe mucho más a los descubrimientos experimentales de Faraday que a los de cualquier otro científico [5, 11]. En 1813 Faraday fue contratado como ayudante de laboratorio del prestigioso químico Sir Humphrey Davy en la *Royal Institution* de Londres, de la que fue elegido miembro en 1824 y donde trabajó hasta su muerte en 1867. Faraday realizó su primer descubrimiento sobre electromagnetismo en 1821. Al repetir el experimento de Oersted con una aguja imantada en diversos puntos alrededor de un hilo con corriente dedujo que el hilo estaba rodeado por una serie infinita de “líneas de fuerza” circulares y concéntricas. El conjunto de estas líneas de fuerza es el campo magnético de la corriente [5]. El 13 de septiembre de 1845 comprobó que si un haz de luz polarizado linealmente atraviesa un cierto material al que se aplica un campo magnético en la dirección de propagación de la luz, se observa un giro en el plano de polarización de la luz. Se trata del efecto magneto-óptico o efecto Faraday (Figura 3) y en la entrada #7504 de su diario de laboratorio Faraday escribió:

“Hoy he trabajado con líneas de fuerza magnética, aplicadas a diferentes cuerpos (transparentes en distintas direcciones) y al mismo tiempo haciendo pasar un rayo de luz polarizada a través de ellas (...) se produjo un efecto sobre el rayo de luz polarizado, y por tanto la fuerza magnética y la luz se demuestra que están relacionadas entre sí”.

Sin lugar a dudas, fue la primera indicación evidente de que la fuerza magnética y la luz estaban relacionadas entre sí y también demostró que la luz estaba relaciona-

da con la electricidad y el magnetismo. En relación con este fenómeno Faraday también escribió en la misma entrada #7504 [5]:

“Este hecho probablemente será sumamente fecundo y de gran valor en la investigación de ambas clases de fuerzas naturales”.

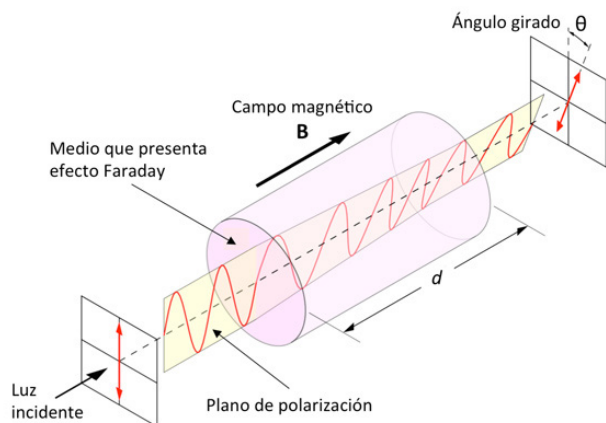


Figura 3. Rotación de la polarización de la luz debida al Efecto Faraday. Fuente: Adaptada de Wikipedia.

En 1846 publica “Consideraciones sobre las vibraciones de los rayos” donde Faraday especuló que la luz podría ser un tipo de perturbación que se propaga a lo largo de las líneas de campo y en el que señala [12]:

“Por consiguiente, la idea que tengo la osadía de presentar considera que la radiación es una forma elevada de vibración de las líneas de fuerza”.

Faraday abandonó la teoría de los fluidos eléctrico y magnético e introdujo los conceptos de “campo” y “líneas de campo” para explicar la electricidad y el magnetismo, apartándose de la descripción mecanicista de los fenómenos naturales al más puro estilo newtoniano de “acciones a distancia” [5]. Esta incorporación del concepto de campo fue calificada por Einstein como el “gran cambio en la Física”, al suministrar a la electricidad, el magnetismo y la óptica un marco común de teorías físicas [3, 5]. Sin embargo, hubo que esperar varios años hasta que se aceptaran definitivamente las líneas de campo de Faraday, justo hasta que Maxwell entró en escena.

JAMES CLERK MAXWELL

El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), Figura 4, es uno de los científicos más importantes de la historia de la ciencia, tal y como señala, y justifica, José Manuel Sánchez Ron en la nota preliminar de su edición

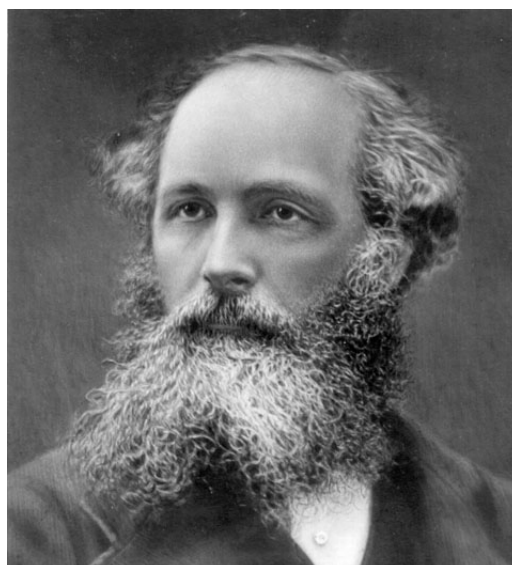


Figura 4. James Clerk Maxwell. Fuente: Wikipedia.

y traducción del libro de Maxwell “Materia y Movimiento” [3]:

“No se puede comprender el siglo XIX –una centuria esencial para nosotros– sin tener en cuenta a figuras como Darwin, Lyell, Pasteur, Faraday o Helmholtz, pero mucho menos aún sin recordar a Maxwell, que nos dejó aportaciones como la teoría del campo electromagnético, una de las creaciones científicas más originales e importantes que se han hecho jamás, tanto desde el punto de vista de la comprensión de los fenómenos naturales como en lo que se refiere a su aplicación al mundo de la técnica, y en particular al, hoy omnipresente, universo de las comunicaciones”.

Maxwell es considerado además como uno de los tres grandes de la historia de la física, junto con Newton y Einstein [3], quizás los dos únicos que ocuparían los escalones más altos si se hiciera un podio de excelencia científica en el campo de la física. Maxwell nació el 13 de junio de 1831 en Edimburgo, en el seno de una familia acomodada. Su vida transcurrió durante la consolidación de la revolución industrial en Gran Bretaña, en la era victoriana, en pleno auge del Imperio Británico. Su padre, John Clerk (1787-1856), era abogado de formación pero estaba muy interesado en la ciencia y tecnología, intereses que transmitió a su hijo James [3, 13]. Su madre, Frances Cay (1792-1839), fue la responsable de la educación de Maxwell hasta que éste tuvo ocho años, momento en el que ella fallece a causa del cáncer. Tras la muerte de su madre, Maxwell continuó recibiendo educación privada durante tres años más en la finca fa-

miliar de Glenlair, hasta que al cumplir once años fue enviado a la Academia de Edimburgo, en la que estuvo unos cinco años y donde aprendió francés, alemán, lógica, filosofía, química y matemáticas.

Con quince años presenta su primer trabajo científico en 1846 en la *Royal Society* de Edimburgo, “Sobre la descripción de los óvalos y las curvas con multiplicidad de focos”, pero que fue leído por su profesor y tutor James D. Forbes (1809-1868) “porque no se consideraba propio que un muchacho en blusa subiera a la tribuna” [14]. Maxwell entró en 1847 en la Universidad de Edimburgo en la que fue autorizado a utilizar algunos aparatos de laboratorio en sus horas libres [3].

Maxwell fue gran amigo de los también físicos William Thomson (1824-1907), posteriormente Lord Kelvin, y Peter Tait (1831-1901). Maxwell y Tait, ambos escoceses y de la misma edad, se hicieron amigos en su época de estudiantes de la Academia de Edimburgo, cuando eran unos adolescentes. A lo largo de su vida, los tres mantuvieron una fructífera y periódica correspondencia sobre sus investigaciones. Thomson y Tait firmaban a veces sus cartas como T y T' y Maxwell como dp/dt [3, 13], pues en uno de los libros de Tait una expresión de la segunda ley de la termodinámica era $dp/dt = JCM$, precisamente las iniciales de James Clerk Maxwell. Utilizaban otros muchos códigos para referirse a otras personas, como H para William Hamilton, profesor de Maxwell y Tait en Edimburgo, o H^2 para el físico alemán Hermann Helmholtz. Otro símbolo que utilizaban a menudo en sus cartas era T'' para referirse al físico irlandés John Tyndall. Tait, que despreciaba a Tyndall, explicó que T'' realmente designaba una “cantidad de segundo orden” [3, 13], alguien insignificante.

En 1850, y tras estudiar los tres primeros cursos de una carrera de cuatro, Maxwell dejó la Universidad de Edimburgo para marchar a la Universidad de Cambridge, el centro más influyente de la física en aquella época [3]. Para los estudiantes con inclinaciones científicas y gran habilidad con las matemáticas, la Universidad de Cambridge poseía el atractivo de un sistema de exámenes muy duro introducido en 1730 y conocido desde 1824 como Tripos Matemático (*Mathematical Tripos*) [3, 15, 16]. El nombre de *Tripes* se debía al taburete de tres patas (*trípode*) en el que originariamente se sentaban los estudiantes para examinarse. Los exámenes del *Tripes* tenían lugar en enero, tras tres años y un trimestre de formación, en un majestuoso edificio barroco con grandes ventanales y sin calefacción conocido como *Senate*

House. Puede uno imaginarse el frío y el ambiente húmedo que sufrían los examinandos. En la preparación de los exámenes jugaban un papel particular los profesores particulares pagados por los propios alumnos y auténticos preparadores del *Tripes*. Maxwell tuvo a uno de los mejores y más famosos de su época, William Hopkins (1793-1866), entre cuyos discípulos también se encuentran Stokes, Thomson y Tait.

En el *Tripes* predominaban las preguntas de matemática aplicada y física teórica y en 1854, año en el que Maxwell se examinó, el *Tripes* consistió de 16 exámenes distribuidos en 8 días, con una duración de 44 horas y media y un total de 211 preguntas [16]. Los problemas que planteaban los examinadores no eran en absoluto triviales, incluso a veces los profesores proponían problemas que no siempre sabían resolver a la espera de que algún alumno brillante lo hiciera [3, 15]. El estudiante que obtenía la mayor calificación en el *Tripes* era el *senior wrangler*, seguido por el *second wrangler* y así sucesivamente. Ser *senior wrangler* era un auténtico honor nacional, que podía compararse hoy en día con ganar un oro olímpico. Fueron *senior wranglers* matemáticos, físicos o astrónomos como Herschel, Airy, Stokes, Tait, Routh, Lord Rayleigh, Larmor o Eddington y otros *wranglers* famosos son Lord Kelvin, J.J. Thomson, Poynting, Jeans o William Bragg. Sin embargo, y a pesar de sus grandes dotes para la física y las matemáticas, Maxwell no quedó primero del *Tripes* cuando se examinó en 1854, sino que fue *second wrangler*, detrás de Edward Routh [3].

Tan importante como llegar a *senior wrangler* del *Tripes*, en la Universidad de Cambridge también era codiciado conseguir Premio Adams [3]. Este Premio, que todavía hoy existe, se creó en 1848 y debe su nombre al astrónomo John Couch Adams (1819-1892) que predijo la existencia del planeta Neptuno basándose sólo en cálculos matemáticos y que también fue *senior wrangler* del *Tripes*. El premio se concede cada dos años al mejor trabajo sobre un tema propuesto por un comité y el del año 1857 tenía por título: “El movimiento de los anillos de Saturno”. Maxwell se presentó a dicho premio y tras dos años de trabajo lo ganó en 1859 recibiendo 130 libras. El premio del bienio 2015-2016 está dotado con 15.000 libras (un tercio para el ganador, otro tercio para la institución en la que trabaja y el último tercio también para el ganador cuando haya publicado los resultados de su trabajo en una revista de prestigio). El trabajo de Maxwell se titulaba “Sobre la estabilidad del movimien-

to de los anillos de Saturno” y demostró matemáticamente que la única estructura que puede explicar dicha estabilidad era que estuviesen constituidos por un enjambre de partículas desconectadas [13]. El trabajo de Maxwell no sólo ganó el Premio Adams sino también el elogio de toda la comunidad científica. George Airy (1801-1892), astrónomo de la Casa Real Británica, lo calificó como “una aplicación notabilísima de las matemáticas”. En 1895 el astrónomo estadounidense James Keeler (1857-1900) confirmó experimentalmente mediante estudios espectroscópicos la estructura sobre los anillos de Saturno propuesta por Maxwell, dieciséis años después de que éste hubiera fallecido.

En 1856 Maxwell ganó la cátedra de filosofía natural del *Marischal College* de Aberdeen en Escocia. Tenía entonces 25 años y pronto se dio cuenta que la vida en Aberdeen era muy diferente de la de Cambridge. En el *Marischal College* el profesor más joven tenía 40 años y la edad media del profesorado del claustro era de 55 años. En una carta remitida a un amigo Maxwell decía lo siguiente [17]: “Aquí no entienden ningún chiste de ningún tipo. Llevo sin hacer una broma más de dos meses, y cuando siento que tengo ganas de contar un chiste, debo mordirme la lengua para no hacerlo”.

Allí contrajo matrimonio en 1858 con Katherine Mary Devar (1824-1886), hija del *principal* del *College* y siete años mayor que él. No tuvieron hijos. La Figura 5 muestra una fotografía tomada en Glenlair en 1869 en



Figura 5. James Clerk Maxwell con su esposa, Katherine Mary Devar, en 1869. Fuente: James Clerk Foundation.

la que aparece el matrimonio Maxwell junto a su perro Toby.

Tras examinarse del *Tripes* e influenciado por su antiguo profesor James D. Forbes, sus investigaciones fueron precisamente sobre temas relacionados con la luz, en particular con la teoría de los colores. Para llevarlas a cabo utilizó un disco giratorio con sectores de distintos colores, que él mismo iba modificando. En la Figura 6 puede verse una estatua erigida en Edimburgo en 2008 que muestra a Maxwell sujetando uno de estos discos y en compañía de su perro Toby. Maxwell eligió como colores primarios rojo, verde y azul, que sustituían al rojo, amarillo y azul de los pintores, e introdujo los triángulos de Maxwell para caracterizar el color situando los tres colores primarios en los vértices del triángulo.

En 1860 dejó su cátedra de Aberdeen para ocupar otra en el *King's College* de Londres, donde estuvo cinco años. Ese mismo año ganó la Medalla Rumford de la *Royal Society* por sus trabajos sobre la teoría de los colores, por lo que fue invitado a impartir una conferencia en esta sociedad para explicar estos trabajos. En esta conferencia pronunciada el 17 de mayo de 1861 fue el primero en proyectar una fotografía en color, otra de las contribuciones de Maxwell a la ciencia de la luz. Para ello, proyectó las imágenes formadas con luces de los



Figura 6. Estatua de James Clerk Maxwell en Edimburgo en la que puede verse sujetando uno de sus discos de color y acompañado de su perro Toby. Fuente: A. Beléndez Pascual.

tres colores primarios: rojo, verde y azul. Tres semanas después es elegido *fellow* de la *Royal Society*. Estaba a punto de cumplir treinta años.

En 1865 renunció a su cátedra londinense por voluntad propia para volver a su finca escocesa de Glenlair y estando ya allí, en una carta que escribió en febrero de 1866, señaló “ahora por fin tengo mi tiempo completamente ocupado con experimentos y especulaciones de tipo físico, algo que no podía emprender mientras tenía deberes públicos” [3, 18]. En Glenlair pasó seis años y escribió su gran obra, “Tratado de Electricidad y Magnetismo” (*A Treatise on Electricity and Magnetism*), publicado en 1873, considerado texto cumbre de la física del siglo XIX y comparable a los “Principia” de Newton [3]. En su “Tratado” Maxwell consigue unificar todos los fenómenos conocidos hasta entonces sobre electricidad y magnetismo. El “Tratado” de Maxwell es un claro producto del modo de hacer ciencia de un alumno del *Triplos Matemático* [3] como prueba su uso de los métodos del análisis matemático y su confianza en el poder de los modelos mecánicos para explicar todos los fenómenos naturales. No en vano, su amigo Lord Kelvin acostumbraba a decir que para saber si se había comprendido un fenómeno había que preguntarse: “¿Podemos hacer un modelo mecánico del mismo?” [13].

En 1871 Maxwell fue designado para ocupar la recién creada cátedra de Física Experimental de la Universidad de Cambridge [3, 13] donde su deber principal era “enseñar las leyes del calor, la electricidad y el magnetismo y dedicarse al avance del conocimiento de tales temas” [19], deber que cumplió con creces. En 1874 se le dotó de un nuevo laboratorio, el Laboratorio Cavendish, construido gracias a la aportación económica realizada por William Cavendish (1808-1891), canciller de la Universidad, séptimo duque de Devonshire y descendiente de Henry Cavendish (1731-1810), químico y físico del siglo XVIII, uno de los científicos más extravagantes de todos los tiempos [9] y conocido por su experimento de la balanza de torsión con el que midió la densidad de la tierra e implícitamente la constante de la gravitación universal, G . Maxwell fue el responsable de la construcción y puesta en marcha de este prestigioso Laboratorio así como su primer director y otros directores que le sucedieron fueron Lord Rayleigh, J.J. Thomson o Rutherford. Desde entonces 29 Premios Nobel han trabajado en el Laboratorio Cavendish.

Como contrapartida al dinero aportado por William Cavendish para la financiación del Laboratorio, uno de

los trabajos a los que Maxwell tuvo que dedicarse era la puesta en orden y la edición de los documentos que sobre electricidad había escrito Henry Cavendish, que sólo había publicado un par de artículos sobre este tema, pero que dejó veinte paquetes de manuscritos inéditos tanto teóricos como experimentales sobre electricidad y que había escrito entre 1771 y 1781. Maxwell dedicó gran parte de su tiempo a la edición de estos trabajos que se publicaron finalmente en 1879 bajo el título “Las investigaciones sobre electricidad del honorable Henry Cavendish”.

La salud de Maxwell empezó a deteriorarse en 1877, aunque no visitó al médico hasta que a principios de 1879 cuando realmente ya se encontraba bastante mal, tras lo cual decidió pasar las vacaciones de verano en su finca de Glenlair. Pero en vez de mejorar, cada vez se encontraba peor y aun así, decidió regresar a Cambridge en octubre a pesar de que apenas podía mantenerse en pie y desde luego no podía impartir clase [3]. Maxwell falleció de cáncer de estómago el 5 de noviembre de 1879, a los cuarenta y ocho años de edad. Antes de morir, una de las cosas que más le preocupaba era el futuro de su esposa Katherine, a la que tanto amaba.

LAS ECUACIONES DE MAXWELL

Maxwell nos dejó contribuciones en teoría del color, óptica, la estructura de los anillos de Saturno, estática, dinámica, sólidos, instrumentación y física estadística [20]. Sin embargo, y sin lugar a dudas, sus contribuciones más importantes fueron en electromagnetismo. Maxwell realizó la formulación matemática de las ideas intuitivas de Faraday sobre los campos eléctricos y magnéticos, y abandonó definitivamente la doctrina clásica de las fuerzas eléctricas y magnéticas como acciones a distancia. En 1856 publica “Sobre las líneas de fuerza de Faraday” y en 1861 “Sobre las líneas físicas de fuerza”. En estos dos artículos Maxwell proporcionó una explicación matemática sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos en función de la distribución de líneas de fuerza en el espacio. Para ello Maxwell creó un complejo modelo mecánico de vórtices moleculares y ruedas intermedias aplicada a los fenómenos eléctricos y magnéticos [3, 12]. Su teoría incluía el éter y estudiaba las interacciones electromagnéticas con toda naturalidad en el marco de un éter omnipresente. Maxwell se mantuvo firme en que la energía electromagnética y el éter no eran entidades hipotéticas, sino reales. De hecho, para los físicos británicos del siglo XIX el éter era tan real

como las piedras que formaban el Laboratorio Cavendish y algunos de ellos entendieron que el objetivo principal de la física era desentrañar las propiedades físicas y matemáticas del éter, hasta tal punto que llegaron a pensar que o existía el éter o la física se vendría abajo [21].

Como se ha señalado con anterioridad, en 1865 Maxwell publica su monumental artículo titulado “Una teoría dinámica del campo electromagnético” [2]. Mientras redactaba el artículo y con la modestia que siempre le caracterizó, escribió la víspera del día de Reyes de 1865 una carta a su primo Charles Cay diciéndole [3]:

“... tengo un artículo a flote, con una teoría electromagnética de la luz que, salvo que me convenza de lo contrario, considero de gran valor”.

Es evidente que no estaba equivocado. En este artículo, que constituye un hito en la historia de la ciencia [12], Maxwell sintetizó todos los conocimientos sobre electricidad y magnetismo en un conjunto de veinte ecuaciones que denominó “ecuaciones generales del campo electromagnético” y que relacionan veinte variables que rigen el comportamiento de la interacción electromagnética. El artículo consta de 53 páginas y contiene siete partes distintas: introducción, sobre la inducción electromagnética, ecuaciones generales del campo electromagnético, acciones mecánicas en el campo, teoría de los condensadores, teoría electromagnética de la luz y cálculo de los coeficientes de inducción electromagnética. Distribuyó sus veinte “ecuaciones generales del campo electromagnético” en ocho grupos que nombró con las letras mayúsculas de la (A) a la (H). Estas ecuaciones incluyen (Figura 7):

- Corrientes y desplazamientos eléctricos (A).
- Ecuaciones para el campo magnético (B).
- Ecuaciones de las corrientes (C).
- Ecuaciones de la fuerza electromotriz (D).
- Elasticidad eléctrica (E).
- Ecuaciones de la resistencia eléctrica (F).
- Ecuación de la electricidad libre (G).
- Ecuación de continuidad (H).

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.

En su *Treatise* de 1873 Maxwell escribió sus ecuaciones en coordenadas cartesianas y con ayuda de los cua-

<p><i>Electrical Currents</i> (p, q, r).</p> <p><i>Electrical Displacements</i> (f, g, h).</p> $\left. \begin{aligned} p' &= p + \frac{df}{dt}, \\ q' &= q + \frac{dg}{dt}, \\ r' &= r + \frac{dh}{dt}. \end{aligned} \right\} \text{(A)}$ <p><i>Equations of Currents.</i></p> $\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dt} - \frac{\partial \beta}{\partial z} &= 4\pi p', \\ \frac{dz}{dt} - \frac{\partial \gamma}{\partial x} &= 4\pi q', \\ \frac{dx}{dt} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} &= 4\pi r'. \end{aligned} \right\} \text{(C)}$ <p><i>Equations of Electric Elasticity,</i></p> $\left. \begin{aligned} P &= kf, \\ Q &= hg, \\ R &= h'g. \end{aligned} \right\} \text{(E)}$ <p><i>Equation of Free Electricity,</i></p> $e + \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0. \text{ (G)}$	<p><i>Equations of Magnetic Force.</i></p> $\left. \begin{aligned} \mu a &= \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}, \\ \mu \beta &= \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx}, \\ \mu \gamma &= \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}. \end{aligned} \right\} \text{(B)}$ <p><i>Equations of Electromotive Force.</i></p> $\left. \begin{aligned} V &= \mu \left(\gamma \frac{dy}{dt} - \beta \frac{dz}{dt} \right) - \frac{dF}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \\ Q &= \mu \left(\alpha \frac{dz}{dt} - \gamma \frac{dx}{dt} \right) - \frac{dG}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \\ R &= \mu \left(\beta \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{dH}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \text{(D)}$ <p><i>Equations of Electric Resistance,</i></p> $\left. \begin{aligned} P &= -gp, \\ Q &= -gq, \\ R &= -gr. \end{aligned} \right\} \text{(F)}$ <p><i>Equation of Continuity,</i></p> $\frac{de}{dt} + \frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0. \text{ (H)}$
--	---

Figura 7. Ecuaciones del campo electromagnético tal y como aparecen en el artículo de Maxwell de 1865 [2].

terniones ideados por William Rowan Hamilton (1805-1865) en 1843 y de los que Peter Tait, el amigo de Maxwell, fue uso de sus principales adalides [22]. El análisis vectorial no estaba del todo desarrollado en tiempos de Maxwell, por eso no fue hasta 1884 cuando Oliver Heaviside (1850-1925) [19], utilizando el análisis vectorial sintetizó las veinte ecuaciones del campo electromagnético en las cuatro ecuaciones en forma vectorial que conocemos hoy en día (Figura 8):

- Ley de Gauss del campo eléctrico.
- Ley de Gauss del campo magnético.
- Ley de Faraday-Henry de la inducción electromagnética.
- Ley de Ampère-Maxwell, en la que Maxwell introdujo la “corriente de desplazamiento”.

Desde entonces se conocieron como ecuaciones de Hertz-Heaviside o de Maxwell-Hertz [23], hasta que en

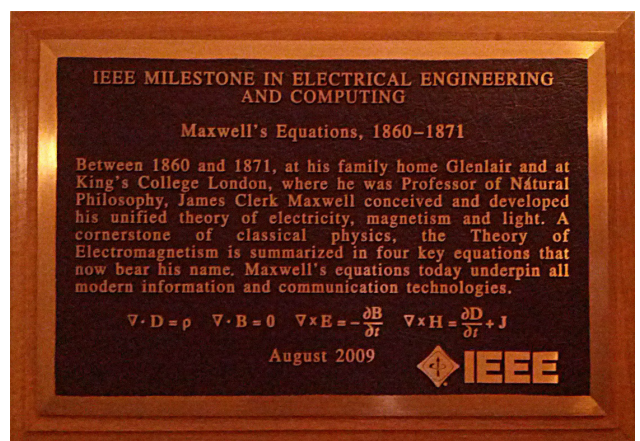


Figura 8. Placa conmemorativa de las ecuaciones de Maxwell situada en el King's College de Londres. Fuente: Wikimedia Commons.

1940 Albert Einstein (1879-1955) popularizó el término “ecuaciones de Maxwell” [24] que se usa desde entonces. El físico alemán Ludwig Boltzmann (1844-1906) consideró que estas ecuaciones eran tan bellas por su simplicidad y elegancia que, como el Fausto de Goethe se preguntó: “¿Fue acaso un Dios quien escribió estos signos?” (*War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?*) [25].

LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LA LUZ

La sexta parte de su artículo (páginas 497-505), Maxwell la titula “teoría electromagnética de la luz” y en ella concluye:

“... la luz y el magnetismo son alteraciones de la misma sustancia, y la luz es una perturbación electromagnética que se propaga a través del campo según las leyes del electromagnetismo.”

Esta afirmación de Maxwell supuso un profundo cambio en la imagen que de la luz se tenía y a partir de entonces la luz y el electromagnetismo quedaron unidos para siempre. El carácter electromagnético de la luz sobre el que había especulado Faraday en 1846 con sus “consideraciones sobre las vibraciones de rayos” había sido deducido matemáticamente por Maxwell en 1865. Al escribir “alteraciones de la misma sustancia”, Maxwell conservaba las ideas del pasado, pues la sustancia a la que se refería era el éter. A pesar de que su desarrollo matemático no lo requería, Maxwell no se había desembarazado del éter [12]. Maxwell combinó las ecuaciones del campo electromagnético y obtuvo una ecuación de onda y propuso la existencia de las ondas electromagnéticas. En la Figura 9 se ha representado una onda electromagnética sinusoidal plana linealmente polarizada

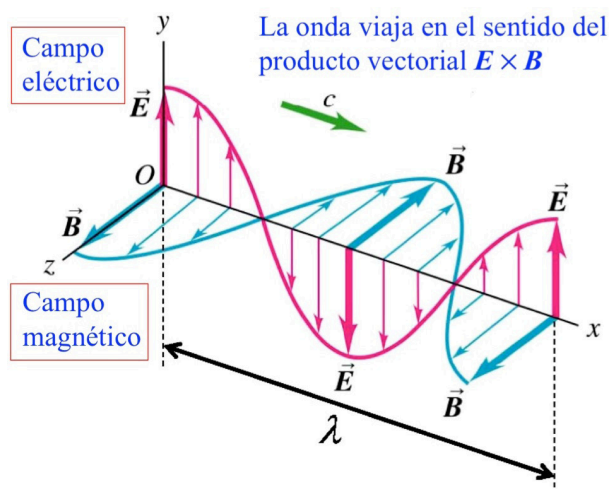


Figura 9. Onda electromagnética sinusoidal plana linealmente polarizada.

con los campos eléctrico E y magnético B perpendiculares entre sí y perpendiculares, a su vez, a la dirección de propagación de la onda.

Al calcular la velocidad de propagación de estas ondas electromagnéticas en función de las constantes eléctrica y magnética, K_e y K_m , obtuvo el valor de la velocidad de la luz, 3×10^8 m/s, concluyendo que la luz era una onda electromagnética. Albert Einstein se refirió en 1940 a ese momento crucial de Maxwell señalando [24]:

“¡Los sentimientos que debió experimentar [Maxwell] 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.”

Puede afirmarse que antes de Maxwell la velocidad de la luz era sólo una velocidad entre muchas. Después de Maxwell, la velocidad de la luz se convirtió en una auténtica privilegiada de la Física, señalando el camino a Einstein y la relatividad [26].

Maxwell también dedujo que las ondas electromagnéticas eran ondas transversales y en una breve sección titulada “relación entre el índice de refracción y el carácter electromagnético de una sustancia” obtuvo la que conocemos como “relación de Maxwell” entre el índice de refracción de un medio y la raíz cuadrada de su permitividad eléctrica relativa. Otro aspecto que también considera dentro de esta sexta parte de su artículo de 1865 es la “propagación de perturbaciones electromagnéticas en un medio cristalizado”, es decir, la óptica electromagnética en medios anisótropos, y finaliza con una sección que titula “valores absolutos de las fuerzas magnética y electromotriz puestos en juego en la propagación de la luz” y en la que considera un concepto de suma importancia como es el de presión de radiación.

En 1888 Heinrich Hertz (1857-1894) produjo ondas electromagnéticas artificialmente en el laboratorio por primera vez, lo que suponía la confirmación de la teoría de Maxwell y una victoria sobre los ingenieros telegráficos como William Preece, Director del Servicio Británico de Correos y Telégrafos, que negaba la aplicabilidad de la Física de Maxwell a cuestiones de ingeniería práctica [27]. Desgraciadamente Maxwell había fallecido nueve años antes y no pudo ver el éxito de su predicción que es la base, entre otras, de la transmisión de información sin cables, como demostrara por primera vez en

diciembre de 1901 el ingeniero italiano y Premio Nobel de Física Guglielmo Marconi (1874-1937) al realizar una transmisión mediante ondas electromagnéticas a través del Océano Atlántico entre Cornualles (Inglaterra) y San Juan de Terranova (Canadá).

Las ondas de radio y televisión, las microondas, el infrarrojo, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, con distintas longitudes de onda y frecuencias, todas ellas, a pesar de sus muchas diferencias en su uso y medios de producción, son ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío a la misma velocidad, 300.000 km/s, y cuya existencia predijo Maxwell hace 150 años. De todo el espectro electromagnético, nosotros sólo podemos detectar directamente una parte muy pequeña con nuestro sentido de la vista y ese intervalo es la luz visible y corresponde a una franja muy estrecha, con longitudes de onda aproximadamente entre 400 y 700 nm. La luz blanca ordinaria incluye todas las longitudes de onda visibles.

EL LEGADO DE MAXWELL

Con su teoría del campo electromagnético Maxwell logró unir en un mismo marco teórico la luz, la electricidad y el magnetismo, lo que se conoce como “síntesis de Maxwell” [3]. Esta “síntesis de Maxwell” supuso tal hito en la historia de la unificación de las fuerzas físicas que a finales del siglo XIX entre los físicos estaba extendida la opinión de que las leyes físicas ya estaban suficientemente comprendidas y que quedaba poco más que hacer. Esta opinión condujo a la famosa afirmación del físico norteamericano y Premio Nobel de Física Albert Michelson (1852-1931) que en su libro “*Waves light and their uses*” [28] señaló:

“Las leyes y los hechos fundamentales más importantes de la ciencia física han sido ya todos descubiertos, y ahora están tan firmemente establecidos que la posibilidad de que puedan ser sustituidos alguna vez como consecuencia de nuevos descubrimientos es extremadamente remota. [...] Nuestros futuros descubrimientos deben buscarse en la sexta cifra decimal”.

Nada más lejos de la realidad, pues en los primeros años del siglo XX se produjeron dos cambios trascendentales en el paradigma de la física con la introducción de la física cuántica y de la teoría especial de la relatividad y de este cambio de paradigma es responsable tanto la luz como la teoría de las ondas electromagnéticas de

Maxwell. No cabe duda de que Maxwell sentó las bases para dos de las ideas más revolucionarias surgidas en los albores del siglo XX [3, 13] relacionadas con el estudio de la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro que llevó a Planck en 1900 a postular su teoría de los cuantos de energía –con ayuda de los cuales Einstein explicó en 1905 el efecto fotoeléctrico, otro de los acontecimientos que conmemoramos en el Año Internacional de la Luz– y, por otro, experimentos como el de Michelson y Morley que permitió a Einstein concluir que la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores inerciales y desarrollar su teoría de la relatividad especial también en 1905. Es evidente que Maxwell abrió las puertas a la Física del siglo XX [13].

Sin embargo, y a pesar de que la obra de Maxwell fue majestuosa y extensa tuvo ciertas limitaciones, como la conciliación de la Mecánica de Newton y el Electromagnetismo de Maxwell [3], problema que fue resuelto finalmente por Einstein en 1905 con su teoría de la relatividad especial. Tras los trabajos de Einstein, el éter luminífero –ese “espíritu sutilísimo” que ya habían considerado Young y Fresnel, entre otros, y que se había convertido en el centro de atención de la Física del siglo XIX– estaba muerto y enterrado. Las ondas electromagnéticas no necesitan de ningún medio material para su propagación. De hecho, el propio Einstein reconoció que su teoría de la relatividad especial debía sus orígenes a las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético. “Si he logrado ver más lejos es porque he subido a hombros de gigantes” escribió Isaac Newton a su rival Robert Hooke en 1676. Doscientos cincuenta años después, durante una de las visitas que Albert Einstein realizó a Cambridge, alguien le señaló que él había llegado tan lejos porque se había subido a hombros de Newton a lo que Einstein replicó tajante “eso no es cierto, estoy subido a hombros de Maxwell”. En su artículo “La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de la realidad física” [29] publicado en 1931 con ocasión del centenario del nacimiento de Maxwell, Einstein señaló: “una época científica acabó y otra empezó con Maxwell”, “este cambio en la concepción de la realidad es el más profundo y fructífero que se ha producido en la física desde los tiempos de Newton”, y afirmó con rotundidad:

“El trabajo de James Clerk Maxwell cambió el mundo para siempre”.

Richard Feynman (1918-1988), premio Nobel de Física en 1965 “por su trabajo fundamental en electrodinámica cuántica”, esto es, por la teoría cuántica del

campo electromagnético, reflexionaba sobre la importancia del trabajo de Maxwell sobre electromagnetismo con las siguientes palabras [30]:

“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”.

REFERENCIAS

- [1] Beléndez, A.: “La unificación electromagnética: 150 aniversario de las ecuaciones de Maxwell”, *Métode*, Nº 84, 16-21 (2015).
- [2] Maxwell, J.C.: “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459-512 (1865). Disponible en <http://www.jstor.org/stable/108892>.
- [3] Sánchez Ron, J.M. (ed.): *J.C. Maxwell: Materia y movimiento*. Crítica, Barcelona, 2006.
- [4] Pérez, M.C. & Varela, P.: *Orígenes del electromagnetismo. Oersted y Ampère*. Nívola Libros y Ediciones, Madrid, 2003.
- [5] Díaz, J.A.: *El gran cambio de la física. Faraday*. Nívola Libros y Ediciones, Madrid, 2001.
- [6] Beléndez, A.: “La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la ‘síntesis electromagnética’ de Maxwell”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30, art. 2601, 20 páginas (2008).
- [7] Udías, A.: *Historia de la física. De Arquímedes a Einstein*. Síntesis, Madrid, 2004.
- [8] Hecht, E. & Zajac, A.: *Óptica*, Fondo Educativo Interamericano, México, 1977.
- [9] Crease, R.P.: *El Prisma y el Péndulo: Los Diez Experimentos más Bellos de la Ciencia*, Crítica, Barcelona, 2006.
- [10] Ordóñez, J., Navarro, V. & Sánchez Ron, J.M.: *Historia de la Ciencia*, Espasa-Calpe, Madrid, 2007.
- [11] Forbes, N. & Mahon, B.: *Faraday, Maxwell, and the Electromagnetic Field: How two men revolutionized Physics*, Prometheus Books, NuevaYork, 2014.
- [12] A. Zajonc, *Capturar la luz*. Ediciones Atalanta, Girona, 2015.
- [13] Gabàs, J.: *La naturaleza de la luz: Maxwell*. Nívola Libros y Ediciones, Madrid, 2012.
- [14] Gamow, G.: *The Great Physicists from Galileo to Einstein*, Dover Publications, Mineola, 1988.
- [15] Navarro, J.: *El padre del electrón: J.J. Thomson*, Nívola libros y ediciones, Madrid, 2006.
- [16] Forfar, D.O.: “What became of the Senior Wranglers?”, *Mathematical Spectrum* 29, 1-4 (1996).
- [17] Campbell, L. & Garnett, W. *The life of James Clerk Maxwell*, MacMillan and co., Londres, 1882.
- [18] Reid, S.: “Maxwell at King’s College, London”. En Flood, R. et al. (eds.). *James Clerk Maxwell. Perspectives on His Life and Work*. Oxford University Press, Oxford, 2014.
- [19] Mahon, B.: *The man who changed everything: The life of James Clerk Maxwell*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2014.
- [20] Trabajos científicos publicados por James Clerk Maxwell (consultado el 04/02/2016) http://www.clerkmaxwellfoundation.org/PUBLISHED_SCIENTIFIC_PAPERS.pdf.
- [21] Taylor, J.G.: *La nueva física*, Alianza Editorial, Madrid, 1979.
- [22] Tait, P.G.: *An elementary treatise on quaternions*, Clarendon Press, Oxford, 1867.
- [23] Turnbull, G.: “Maxwell’s Equations». *Proceedings of the IEEE*, 101, 1801-1805 (2013).
- [24] Einstein, A.: “Considerations Concerning the Fundamentals of Theoretical Physics”. *Science*, 91, 487-492 (1940).
- [25] Darrigolp, O.: *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press, Oxford, 2002.
- [26] Everitt, F.: “James Clerk Maxwell: a force for physics”, *Physics World*, December, 32-37 (2006).
- [27] Bowler, P.J. & Morus, I.R.: *Panorama general de la ciencia moderna*, Crítica, Barcelona 2007.
- [28] Michelson, A.: *Light and Their Uses*. The University of Chicago Press, Chicago, 1903.
- [29] Einstein, A.: “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, 1931.
- [30] Feynman, R., Leighton, R.B. & Sands, M.: *Física. Volumen II: Electromagnetismo y materia*. Addison-Wesley Iberoamericana, México, 1987.

Augusto Beléndez Vázquez

Dpto. de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

Universidad de Alicante