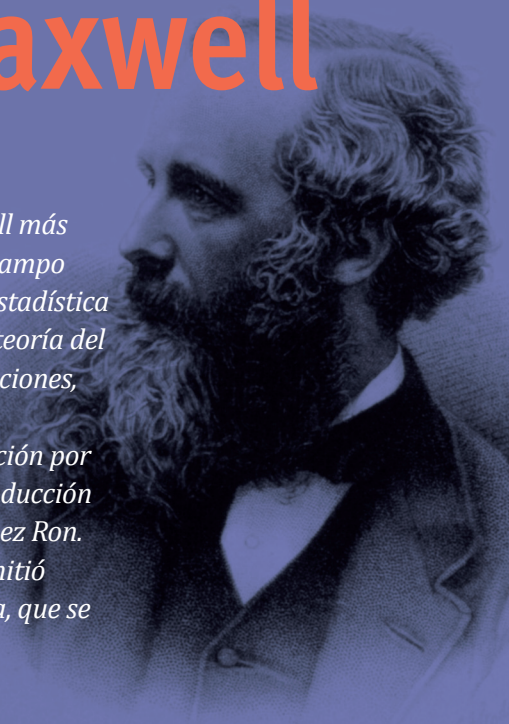


Mi clásico favorito

James Clerk Maxwell

por Augusto Beléndez*

*Tengo que reconocer que hasta el año 2007 no conocía de Maxwell más que algunas de sus contribuciones científicas: las ecuaciones del campo electromagnético, la distribución de velocidades moleculares, la estadística de Maxwell-Boltzmann o los triángulos de Maxwell utilizados en teoría del color. De su vida no sabía prácticamente nada y de otras contribuciones, como las relacionadas con la estructura de los anillos de Saturno, tampoco. Sin embargo, mi percepción sobre Maxwell y mi fascinación por su vida y su obra cambió tras la lectura ese año de la edición y traducción de su libro *Materia y Movimiento* realizada por José María Sánchez Ron. Su magnífica introducción (“Maxwell, su vida y su obra”) me permitió descubrir realmente a uno de los grandes de la historia de la física, que se convirtió desde entonces en “mi clásico favorito”.*



Sus primeros años

Cuando tenía doce o trece años empecé a ver una película en televisión que me impresionó por sus aventuras, historias, secuencias, espectacularidad y colorido. Admito que la película me sigue gustando hasta tal punto que en los últimos cuarenta años he vuelto a verla en numerosas ocasiones, tanto esa versión como otras dos que posteriormente se han rodado de la misma en 1977 y 2002. Se trata de *Las cuatro plumas* (*The Four Feathers*), película británica de aventuras basada en la novela homónima del escritor A. E. W. Mason, dirigida por Zoltan Korda y estrenada en el año 1939. La película narra las peripecias del joven Harry Faversham, hijo único de un antiguo oficial británico, miembro de una familia de grandes héroes militares, la mayoría heridos o muertos en combate, y educado en la mentalidad británica del siglo XIX, del honor, el imperio y la reina. Sin embargo, más allá de eso la película también trata de los límites del miedo, de la heroicidad y de la cobardía e incluso hasta pueden vislumbrarse algunas referencias a lo absolutamente injustificada que es la

guerra, algo bastante impensable en aquella época de preguerra mundial. Históricamente los acontecimientos tienen lugar años después de la muerte de Maxwell, pero el ambiente victoriano que se aprecia en cada fotograma de la película no sería muy diferente del que Maxwell vivió.

Mientras leía la introducción dedicada a la vida y la obra de James Clerk Maxwell en la edición y traducción de Sánchez Ron del libro *Matter and Motion* publicado por Maxwell en 1876, me venían a la memoria muchas de las imágenes de *Las cuatro plumas* y de aquel ambiente de la era victoriana: la biblioteca y sus cuadros, los grandes salones, los trajes, los carruajes de caballos, el baile, el honor, los diálogos, las frases perfectas, las conversaciones entre los jóvenes oficiales, etc. Ciertamente la vida de Maxwell transcurrió durante la consolidación de la revolución industrial en Gran Bretaña, en pleno auge del Imperio Británico y en la tradición victoriana del honor, el deber, la responsabilidad y los principios. Es evidente que todo aquello influyó en su vida y su obra.

James Clerk Maxwell nació el 13 de junio de 1831 en Edimburgo, Escocia, en el seno de una familia acomodada, una de las más ricas y distinguidas de

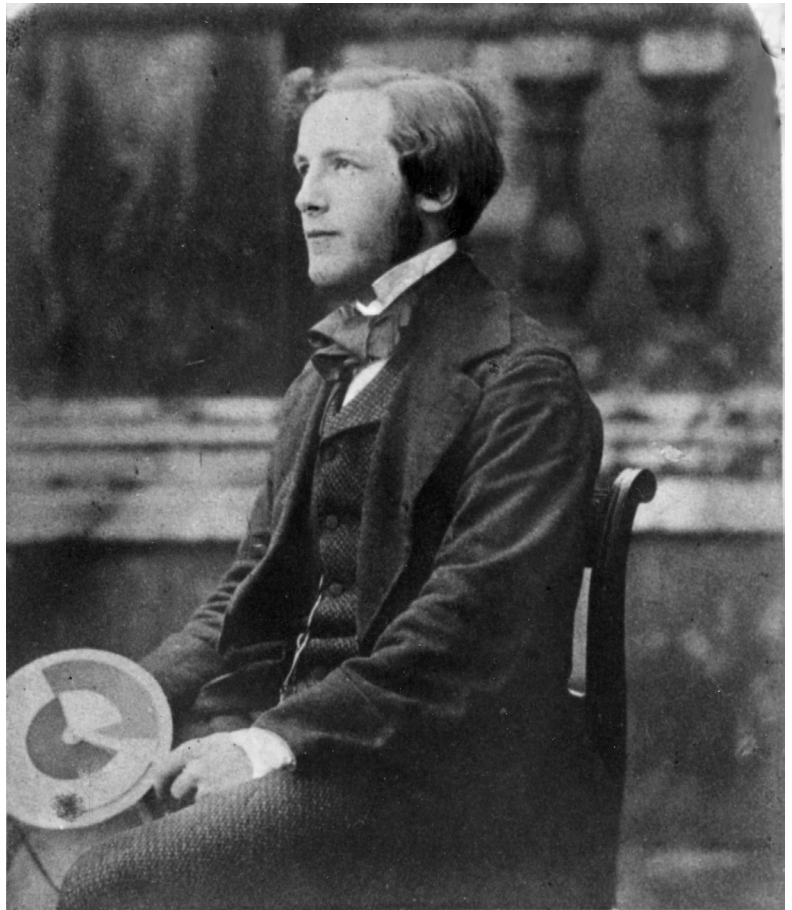
Edimburgo. Como acertadamente señala Sánchez Ron en la nota preliminar de su edición del libro antes mencionado, “Maxwell es uno de los científicos más importantes de toda la historia de la ciencia. No se puede comprender el siglo XIX [...] sin recordar a Maxwell, que nos dejó la teoría del campo electromagnético, 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 telecomunicaciones”. En esta misma línea Richard Feynman (1918-1988), en sus famosas *The Feynman Lectures on Physics*, afirma: “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. La Guerra de Secesión americana quedará reducida a algo insignificante comparada con este importante hecho científico que tuvo lugar en la misma década”. Además coincido con Sánchez Ron en que Maxwell es uno de los grandes de la

* Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante (a.belendez@ua.es)

historia de la física, junto con Newton y Einstein, quizás los dos únicos que “le preceden claramente en una hipotética escala de excelencia científica”.

Antes de presentar algunas pinceladas de la vida de Maxwell y su obra, quisiera hacer un breve inciso. Al leer “James Clerk Maxwell” pensamos que su nombre es compuesto, “James Clerk”, y su apellido es “Maxwell”. Sin embargo, realmente su primer apellido no era “Maxwell”, sino “Clerk” y además el apellido de su madre era Cay. Lo que sucede es que su bisabuelo George Clerk se casó con su prima Dorothea, cuya madre se llamaba Agnes Maxwell, y al heredar las fincas de la familia Maxwell en Middlebie, y por temas legales, añadió “Maxwell” a su primer apellido “Clerk”, quedando su apellido desde entonces como “Clerk Maxwell”. Como los Clerks ya tenían su propia baronía, la de Penicuik, entonces acordaron que Penicuik la heredaría el primogénito y Middlebie el segundo hijo. De este modo, el padre de Maxwell era John Clerk Maxwell de Middlebie mientras que su tío era Sir George Clerk of Penicuik. En conclusión, resulta que las ecuaciones del electromagnetismo llevan el nombre del primer apellido de una tatarabuela de Maxwell.

Dos años después del nacimiento de Maxwell en Edimburgo, la familia se trasladó a su finca de Middlebie, al suroeste de Escocia, una zona tranquila y hermosa, pero en aquella época también una región aislada y sin ninguna escuela próxima, y en la que comenzaron a construir una casa a la que llamaron Glenlair, nombre con el que al final se conocía a toda la finca. Allí Maxwell no sólo pasó su infancia y parte de su adolescencia, sino que también en su madurez fue su auténtico refugio en el que escribió su gran obra sobre electromagnetismo. Su padre, John Clerk (1787-1856), era una persona sensible, cautelosa y poco convencional, y aunque abogado de formación, era un auténtico apasionado por la ciencia y la tecnología. De hecho, llegó a ser *fellow* de la Royal Society de Edimburgo. Sin embargo, sin escuelas cercanas y con un solo hijo que cuidar tras la muerte de su otra hija Elizabeth, fue su madre, Frances Cay (1792-1839), la que hizo de maestra de escuela. Frances era una mujer fuerte, prudente y decidida, y a ella debe Maxwell su formación primaria hasta sus ocho años de edad, momento en el que su madre con tan solo cuarenta y siete años fallece a causa de cáncer de estómago en diciembre de 1839, tras someterse a una dura operación sin anestesia. Frances también pertenecía a una familia escocesa de clase alta, los Cay de Northumberland, muchos de los cuales destacaron en los campos de las leyes y las matemáticas y hasta dos de ellos fueron *fellows* de la Royal Society de Edimburgo. No es sorprendente, por tanto, que habiendo heredado el genio especial, la originalidad y la capacidad creativa de los Clerk, así como las habilidades de los Cay, James Clerk Maxwell fuera una persona con una inteligencia fuera de lo común y con una extraordinaria capacidad para la física y las matemáticas.

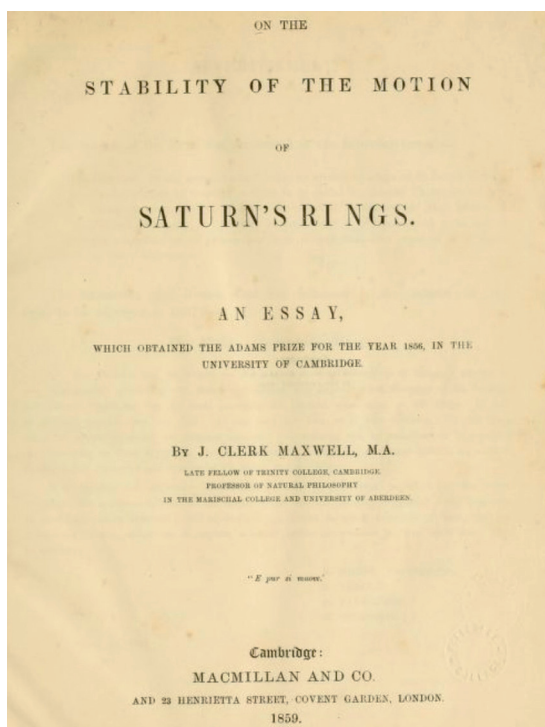


Tras el fallecimiento de su madre, y después de tres años más recibiendo educación privada en la finca familiar de Glenlair con la asistencia de un tutor privado de apenas diecisiete años y que podíamos definir como “pedagógicamente poco inspirado”, su padre decidió por fin enviarlo a la escuela. En noviembre de 1842 Maxwell dejó Glenlair para ir a estudiar a la Academia de Edimburgo, una institución independiente y prestigiosa fundada en 1824 y que además de Maxwell ha tenido otros alumnos famosos como el escritor Robert Louis Stevenson (1850-1894). En Edimburgo Maxwell vivía con una de sus tías y en la Academia no sólo aprendió francés, alemán, lógica, historia, geografía, filosofía, química y matemáticas, sino que hizo grandes amistades que mantendría durante toda su vida, como Lewis Campbell (1830-1908), que luego sería profesor de lenguas clásicas y que escribió en 1882, junto con William Garnett, una biografía sobre Maxwell (*Life of James Clerk Maxwell*), así como el también físico y matemático Peter Guthrie Tait (1831-1901). Cuando en tercer curso empezaron las lecciones de matemáticas, Maxwell pronto asombró a todos por su gran maestría con la geometría. En esa época también empezó a escribir versos de cualquier tema y además con impecable ritmo y métrica. Maxwell siguió escribiendo poemas hasta su muerte e incluso llegó a plantear problemas de física en verso como el poema *A Problem of Dynamics* de 1854.

El joven James Clerk Maxwell con su disco de colores (Trinity College Library, Cambridge University, cortesía: AIP Emilio Segre Visual Archives).

Como la intención de su padre era que Maxwell fuera abogado, con dieciséis años de edad, en noviembre de 1847, fue enviado a la Universidad de Edimburgo para completar su educación general antes de empezar a estudiar leyes. En esta Universidad Maxwell fue autorizado por James David Forbes (1809-1868), su mentor, profesor de filosofía natural y un excelente científico experimental, a realizar en sus horas libres experimentos de laboratorio de filosofía natural y química con material de la propia Universidad. Al final acabó haciendo estos experimentos también en vacaciones, en una pequeña habitación del lavadero de Glenlair. En una carta remitida a su amigo Lewis Campbell, Maxwell describía estos experimentos señalando que usaba como mesa una vieja puerta apoyada sobre dos barriles. En la Universidad de Edimburgo también tuvo como profesor de lógica y metafísica a William Hamilton (1788-1856) —que no debe confundirse con el gran físico matemático irlandés William Rowan Hamilton—, un genio en avivar las mentes de los jóvenes y la de Maxwell no fue ajena a ello. Forbes y Hamilton no sólo eran polos opuestos, sino también enemigos, aunque ambos estaban de acuerdo en una cosa: el joven Maxwell, por su gran talento, merecía especial atención.

En 1846, con tan sólo catorce años y cuando Maxwell era todavía estudiante de la Academia de Edimburgo, presenta su primer trabajo científico, “On the descriptions of oval curves and those having a plurality of foci”, en la Royal Society de Edimburgo, que fue corregido y leído precisamente por James Forbes “porque no se consideraba propio que un muchacho en blusa subiera a la tribuna”. En 1849, con diecisiete años, presenta ante la misma Sociedad el trabajo “On the theory of rolling curves” y en 1850 otro titulado “On the equilibrium of elastic solids”.



Portada del trabajo *On the stability of the motion of Saturn's rings* publicado en 1859 y con el que Maxwell ganó el Premio Adams.

Maxwell fue gran amigo de los también físicos William Thomson (1824-1907), Lord Kelvin a partir de 1892, y el ya mencionado Peter Tait. Como ya se ha dicho, Maxwell y Tait se hicieron amigos en la Academia de Edimburgo cuando eran unos adolescentes. Los tres mantuvieron frecuentes intercambios epistolares sobre sus investigaciones. Thomson y Tait firmaban a veces sus cartas como T y T' y Maxwell lo hacía dp/dt , pues en el libro *Sketch of Thermodynamics* publicado por Tait y en otros trabajos previos de éste, una expresión de la segunda ley de la termodinámica era $dp/dt = JCM$, las iniciales de James Clerk Maxwell (p es la presión, t , la temperatura, J , el equivalente mecánico del calor, C , la función de Carnot, y M es un coeficiente de proporcionalidad). Tenían 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 (1821-1894). Otro símbolo que utilizaban a menudo en sus cartas era T'' para referirse al físico irlandés John Tyndall (1820-1893). Tait, que despreciaba a Tyndall, explicó que T'' realmente designaba una “cantidad de segundo orden”, un infinitésimo de segundo orden.

Maxwell en la Universidad de Cambridge

Sus amigos Lewis Campbell y Peter Tait abandonaron la Universidad de Edimburgo antes de que lo hiciera Maxwell, el primero marchó a la Universidad de Oxford y el segundo a la de Cambridge. James Forbes convenció al padre de Maxwell para que lo enviara también a la Universidad de Cambridge, pues era evidente que para un estudiante con el talento que tenía Maxwell para las matemáticas, la Universidad de Edimburgo no era suficiente. Finalmente su padre accedió a hacerlo y Maxwell, tras estudiar tres cursos de una carrera de cuatro, abandonó Edimburgo para marchar en otoño de 1850 a la Universidad de Cambridge, el centro más influyente de la física de aquella época y el mejor lugar en el que podía estudiar un aspirante a científico. En Cambridge Maxwell se instaló en octubre de 1850 en el St. Peter's College, conocido como *Peterhouse*. Tenía entonces diecinueve años. Sin embargo, después del primer trimestre, Maxwell abandonó *Peterhouse* y se trasladó al Trinity College, el antiguo *college* de Newton y uno de los más prestigiosos. Para los estudiantes con intereses científicos y gran habilidad con las matemáticas, la Universidad de Cambridge ofrecía la posibilidad de presentarse a un sistema de exámenes muy duro y ciertamente agotador —una auténtica carrera de obstáculos— introducido en 1730 y denominado *Mathematical Tripos* desde 1824.

La denominación de *Tripes* se debía al taburete de tres patas en el que originariamente se sentaban los estudiantes para hacer los exámenes orales. El *Tripes* culminaba con un examen final que tenía lugar en enero, tras tres años y un trimestre de formación, en un majestuoso edificio barroco

con grandes ventanales y sin calefacción conocido como la casa del senado. Podemos imaginar el frío y la humedad que pasarían los examinandos. De hecho, el padre de Maxwell le recomendó que se llevara una manta para taparse mientras hiciera los exámenes. Para el *Tripes*, Maxwell tuvo como “preparador” privado a uno de los mejores y más ilustres de entonces, William Hopkins, que había conseguido que muchos de sus alumnos se alzaran con la victoria en el *Tripes*. Hopkins describía a Maxwell como “incuestionablemente el hombre más extraordinario que jamás he conocido en mi amplia experiencia” y opinaba que “era imposible para Maxwell pensar de forma incorrecta sobre cuestiones de física”.

En el *Tripes* predominaban las preguntas de matemática aplicada y física matemática, que por cierto no siempre eran triviales, pues en ocasiones los examinadores proponían problemas que no siempre sabían resolver a la espera de que algún alumno brillante lo consiguiera. Los exámenes del *Tripes* estaban divididos en dos periodos. El primero duraba cuatro días consecutivos con pruebas, de nueve a once y media y de una y media a cuatro de la tarde. Los que superaban esta primera fase pasaban a la segunda, más difícil y distribuida en otros cuatro días. El año en que se examinó Maxwell, el *Tripes* consistió en dieciséis exámenes distribuidos en ocho días, con una duración de cuarenta y cuatro horas y media y un total de doscientas once preguntas. El estudiante que obtenía la mayor calificación en el *Tripes* era el *senior wrangler*, el segundo *second wrangler* y así sucesivamente. Llegar a *senior wrangler* era un honor nacional, usando un símil deportivo, como ganar una medalla de oro olímpica. El sistema del *Tripes* produjo los mejores matemáticos y científicos británicos del siglo XIX. De hecho, y a excepción de Michael Faraday, William Rowan Hamilton o James Prescott Joule, la mayoría de los más importantes físicos y físico-matemáticos británicos que trabajaron en los dos últimos tercios del siglo XIX estudiaron en la Universidad de Cambridge y todos ellos fueron *wranglers* del *Tripes*. Además, en ese período cerca de la mitad de las cátedras de física de las universidades no sólo del Reino Unido sino de todo el Imperio Británico fueron ocupadas por *wranglers* del *Tripes*.

Fueron *senior wranglers* (SW) científicos como George B. Airy (en el año 1823), George G. Stokes (1841), Arthur Cayley (1842), John Couch Adams (1843), Peter G. Tait (1853), Edward Routh (1854), Lord Rayleigh (1865), Joseph Larmor (1880) o Arthur S. Eddington (1904) y otros *wranglers* famosos fueron Lord Kelvin (2W, 1845), George Darwin (2W, 1868), John H. Poynting (3W, 1876), J. J. Thomson (2W, 1880) o James Jeans (2W, 1898). Sin embargo, y a pesar de su gran capacidad para la física y las matemáticas, Maxwell no consiguió el primer puesto del *Tripes* cuando se examinó en 1854, sino que fue *second wrangler* (2W), siendo

Edward John Routh el *senior wrangler* de ese año. Los mejores estudiantes del *Tripes* de cada año competían también por el Premio Smith, instituido en 1779 y cuyos exámenes duraban tres días, consistían de sesenta y tres preguntas y se realizaban en el mes de febrero después de conocerse los resultados del *Tripes* de ese año. En la convocatoria de 1854, Routh y Maxwell se presentaron a este Premio y fueron declarados ganadores *ex aequo*. Algunas de las preguntas del examen las propuso George Stokes, entonces *Lucasian Professor of Mathematics*, y en particular el problema número 8 pedía la demostración de un teorema que aparece en una carta remitida por Lord Kelvin a Stokes en 1850 y que hoy conocemos como “Teorema de Stokes”. Es probable que Maxwell consiguiera demostrarlo, pero no hay constancia de ello.

En su época de estudiante en Cambridge, Maxwell demostró unas increíbles dotes como conversador y una gran cultura. Uno de sus antiguos compañeros llegó a comentar: “Nunca he conocido un hombre como él. Creo que no hay ni un solo tema sobre el que no pueda hablar, y además hablar bien, mostrando siempre el punto de vista más curioso e interesante”.

Tras graduarse en Cambridge e influenciado por su antiguo profesor James Forbes, sus investigaciones fueron sobre temas relacionados con la óptica, en particular con la teoría del color. Para llevarlas a cabo utilizó un disco giratorio con sectores de distintos colores, que él mismo iba modificando. Forbes había escogido los colores



James Clerk Maxwell con unos treinta años de edad (cortesía: AIP Emilio Segre Visual Archives).

James Clerk Maxwell con unos treinta años de edad (James Clerk Maxwell Foundation).



primarios de los pintores: rojo, amarillo y azul. Pero estaba equivocado. Maxwell, sin embargo, eligió como colores primarios: rojo, verde y azul, y el resultado fue espectacular. No sólo consiguió blanco usando cantidades iguales de estos tres colores, sino que fue capaz de producir gran variedad de colores simplemente variando las proporciones de estos tres primarios. También introdujo lo que hoy conocemos como “triángulos de Maxwell” para caracterizar el color situando estos tres colores primarios en los vértices del triángulo.

Además del *Tripes*, en la Universidad de Cambridge también tenía mucho prestigio ganar el Premio Adams, al que sólo podían presentarse los graduados por esta Universidad. Este Premio, que todavía hoy existe, se creó en 1848 y debe su nombre al astrónomo John Couch Adams, que predijo la existencia del planeta Neptuno basándose sólo en cálculos matemáticos. Se trata de un premio bianual que se concede al mejor trabajo sobre un tema propuesto por un comité y el tema del año 1856 era el del “movimiento de los anillos de Saturno” y se preguntaba “bajo qué condiciones (si había alguna) los anillos serían estables, si eran (1) sólidos, (2) fluidos o (3) compuestos por muchas piezas separadas de materia”. Maxwell se presentó al premio y en 1857 fue informado de que lo había ganado, por lo que recibió 130 libras esterlinas. El Premio Adams 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 “On the stability of the motion of Saturn’s rings” y fue publicado en 1859. Maxwell demostró matemáticamente que la única estructura que puede explicar dicha estabilidad era que

estuviesen constituidos por un enjambre de partículas desconectadas. El trabajo de Maxwell no sólo ganó el Premio Adams sino también el elogio de toda la comunidad científica. Sir George Airy (1801-1892), astrónomo de la Casa Real Británica, calificó el trabajo de Maxwell como “una de las aplicaciones más notables de las matemáticas a la física que jamás he visto”. En el año 1895 el astrónomo estadounidense James Keeler (1857-1900) utilizando un espectrógrafo acoplado a un telescopio refractor confirmó experimentalmente la estructura sobre los anillos de Saturno propuesta por Maxwell, dieciséis años después de que éste falleciera.

Aberdeen, Londres y otra vez Glenlair

En enero de 1856 Maxwell recibió una carta de James Forbes comunicándole que estaba vacante la plaza *profesor* de Filosofía Natural en el Marischal College de Aberdeen, en Escocia, sugiriéndole que se presentara a la misma. Maxwell ganó la cátedra y ese mismo año marchó a Aberdeen, donde inició su carrera como docente. Tenía entonces veinticinco 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 cuarenta años y la media del profesorado del claustro era de cincuenta y cinco años. En una carta remitida a Lewis Campbell le decía lo siguiente: “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 morderme la lengua para no hacerlo”. En Aberdeen, Maxwell contrajo matrimonio en 1858 con Katherine Mary Devar (1824-1886), hija del *principal* del *college*, siete años mayor que él y una mujer de salud delicada y difícil carácter. No tuvieron hijos.

En 1860 el Marischal College y el King’s College de Aberdeen se fusionaron y hubo, como hoy denominaríamos, un “ajuste de plantilla”, siendo Maxwell uno de los profesores afectados por éste, por lo que tuvo que dejar el *college*. Con veintinueve años abandonó Aberdeen y en octubre de 1860 marchó al sur a ocupar la cátedra de Filosofía Natural del King’s College de Londres. A diferencia de la enseñanza más tradicional de Cambridge y Aberdeen, los cursos del King’s College eran más parecidos a los de las actuales universidades. No sólo se impartían clases de las nuevas asignaturas como química, física, botánica y economía, sino que también había cursos de derecho, medicina e ingeniería. Maxwell estuvo cinco años en Londres, probablemente los más creativos de toda su carrera científica. Allí culminó su teoría dinámica del campo electromagnético y la teoría sobre la visión en color, y desarrolló sus primeros trabajos sobre teoría cinética de gases. En 1860 ganó la Medalla Rumford de la Royal Society por sus contribuciones sobre teoría del color, por lo que fue invitado a dar una conferencia en la Royal Institution para

explicar estos trabajos en una de las famosas Friday Evening Discourses que pusiera en marcha Faraday en 1826. El viernes 17 de mayo de 1861, en su charla sobre color en la Royal Institution de Londres, Maxwell fue el primero en proyectar una fotografía en color, otra de las contribuciones de Maxwell a la óptica. Proyectó las imágenes formadas por la luz al atravesar tres filtros de los colores primarios, rojo, verde y azul, de tres fotografías de una cinta de tartán. Tres semanas después, el 6 de junio de 1861, Maxwell fue elegido *fellow* de la Royal Society (FRS) por sus trabajos sobre la teoría del color y la estabilidad de los anillos de Saturno. Doce días después cumpliría treinta años.

Maxwell es junto con Ludwig Boltzmann (1844-1906) y Willard Gibbs (1839-1903), uno de los grandes de la física estadística, disciplina de la que es uno de los creadores. En 1860 publica el artículo “Illustrations of the dynamical theory of gases” en el que le bastó poco más de una página para deducir la ley de distribución de velocidades moleculares que lleva su nombre y que es considerado un auténtico clásico de la física estadística. Maxwell no sólo fue el primero en formular una ley estadística que gobierna un fenómeno físico, sino que esta ley de distribución le permitió determinar muchas de las propiedades de los gases, como la viscosidad. Otra vez, y como sucediera con su hipótesis de los anillos de Saturno, esta ley de distribución de velocidades también fue verificada experimentalmente —en este caso en 1920— por el Premio Nobel de Física estadounidense de origen alemán Otto Stern (1888-1969), quien utilizó para ello el método de los rayos moleculares. Maxwell estableció el principio de equipartición de la energía y realizó otras aportaciones en termodinámica, como su libro *Theory of Heat* publicado en 1871 y que incluye el “demonio de Maxwell” relacionado con el segundo principio.

En el año 1865, Maxwell renunció a su cátedra londinense por deseo propio para volver a su finca escocesa de Glenlair. Estando ya allí, y 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”. Parece que hace ciento cincuenta años los “deberes públicos” de un profesor universitario no era tan diferentes de los que tenemos hoy en día. Además de dedicarse a sus investigaciones y escribir artículos y dos libros, Maxwell pudo ocuparse personalmente de su finca y de ampliar su casa.

En Glenlair escribió su gran obra, publicada en 1873 y titulada *A Treatise on Electricity and Magnetism*, dos volúmenes con más de quinientas páginas cada uno y que puede considerarse como el texto cumbre de la física del siglo XIX, comparable a los *Principia* de Newton publicados casi dos siglos antes. En su *Treatise*, Maxwell consigue unificar todos los fenómenos conocidos hasta el



La casa de la finca de Glenlair (James Clerk Maxwell Foundation).

momento sobre electricidad y magnetismo. En el *Treatise* de Maxwell puede verse todo aquello que caracterizaba a un estudiante del *Mathematical Tripos* como es la utilización del análisis matemático y el uso de 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 si se podía construir un modelo mecánico del mismo.

Cavendish Professor of Experimental Physics en Cambridge

En aquella época la física en la Universidad de Cambridge era sólo la física teórica, considerada incluso como una “provincia” de las matemáticas. Sin embargo, en 1871 Maxwell fue designado para ocupar la recién creada cátedra de física experimental de la Universidad de Cambridge (Cavendish Professorship of Experimental Physics). No había sido la primera opción, pues antes que a él se la habían ofrecido a Lord Kelvin y a Hermann Helmholtz, pero ambos habían rechazado la oferta. Realmente en 1871 Maxwell no era considerado una figura eminente en los ambientes científicos de la época: su gran obra, el *Treatise*, no había sido todavía publicado y además llevaba seis años retirado y aislado en su finca de Glenlair, con sólo contactos puntuales con el mundo científico. Según resolución del Senado de la Universidad, el deber principal de quien ocupara la cátedra era “enseñar las leyes del calor, la electricidad y el magnetismo y dedicarse al avance del conocimiento de tales temas”, lo que por supuesto Maxwell cumplió con creces. Desde entonces hasta nuestros días ha habido nueve Cavendish Professors of Experimental Physics (denominados Cavendish Professors of Physics desde 1971) durante los periodos que se indican: James Clerk Maxwell (1871-1879), Lord Rayleigh (1879-1884), J. J. Thomson (1884-1919),

James Clerk Maxwell, su esposa Katherin Mary Devar y su perro Toby en su retiro de Glenlair en 1869 (James Clerk Maxwell Foundation).



Ernest Rutherford (1919-1937), William Lawrence Bragg (1938-1953), Nevil Francis Mott (1954-1971), Brian Pippard (1971-1984), Sam Edwards (1984-1995) y Richard Friend (1995-).

Como Cavendish Professor, Maxwell sería también el director de un nuevo laboratorio, el Laboratorio Cavendish, iniciado en 1871 y construido gracias a la generosidad de William Cavendish, ciller de la Universidad, séptimo duque de Devonshire y descendiente de Henry Cavendish. William Cavendish (1808-1891) –*second wrangler* del *Tripes* en 1829 y Premio Smith ese mismo año–. William Cavendish aportó 6.300 libras para la construcción de este nuevo laboratorio con la condición de que los *colleges* proporcionaran el dinero para pagar el salario del Cavendish Professor. Al final el Laboratorio costó 8.450 libras, pero el Duque las pagó sin rechistar e incluso fue más allá al financiar parte del equipamiento científico del laboratorio. The Lecture Room (ahora denominada The Maxwell Lecture Room) y el laboratorio para las prácticas de estudiantes empezaron a utilizarse en 1873, pero la ceremonia oficial de apertura del Laboratorio Cavendish no tuvo lugar hasta el 16 de junio de 1874. Desde entonces veintinueve Premios Nobel han trabajado en el Laboratorio Cavendish. Entre 1871 y 1874 Maxwell estuvo ocupado con la planificación y la supervisión de la construcción del Laboratorio, además de impartir clases sobre calor, electricidad y magnetismo. Maxwell intentó que el laboratorio contara con los instrumentos científicos más modernos y visitó otros laboratorios de física como los de Oxford o el de Lord Kelvin en la Universidad de Edimburgo para intentar que al de Cambridge no le faltara de nada. Es evidente que Maxwell no vio la confirmación experimental de prácticamente ninguna de sus teorías, pero podemos decir que su legado experimental fue el

diseño y el equipamiento del nuevo Laboratorio Cavendish. Puesto que William Cavendish era quien subvencionaba la construcción del Laboratorio Cavendish, como contrapartida encargó también a Maxwell otra misión en Cambridge, la cual era poner en orden y editar los documentos sobre electricidad de su antepasado Henry Cavendish (1731-1810), uno de los más grandes físicos y químicos del siglo XVIII, y desde luego uno de los más extravagantes: rehuía la compañía de otras personas siempre que le era posible y hasta el único retrato que le hicieron tuvo que ser pintado de incógnito. Henry Cavendish publicó apenas un par de artículos pero dejó una veintena de paquetes que contenía un gran número de manuscritos inéditos sobre electricidad que había escrito entre 1771 y 1781. Maxwell dedicó gran parte de su tiempo a la edición de estos trabajos e incluso a la repetición de muchos de los experimentos que en ellos aparecían. Estos manuscritos fueron publicados finalmente en 1879 bajo el título *The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish*, un libro de más de quinientas páginas.

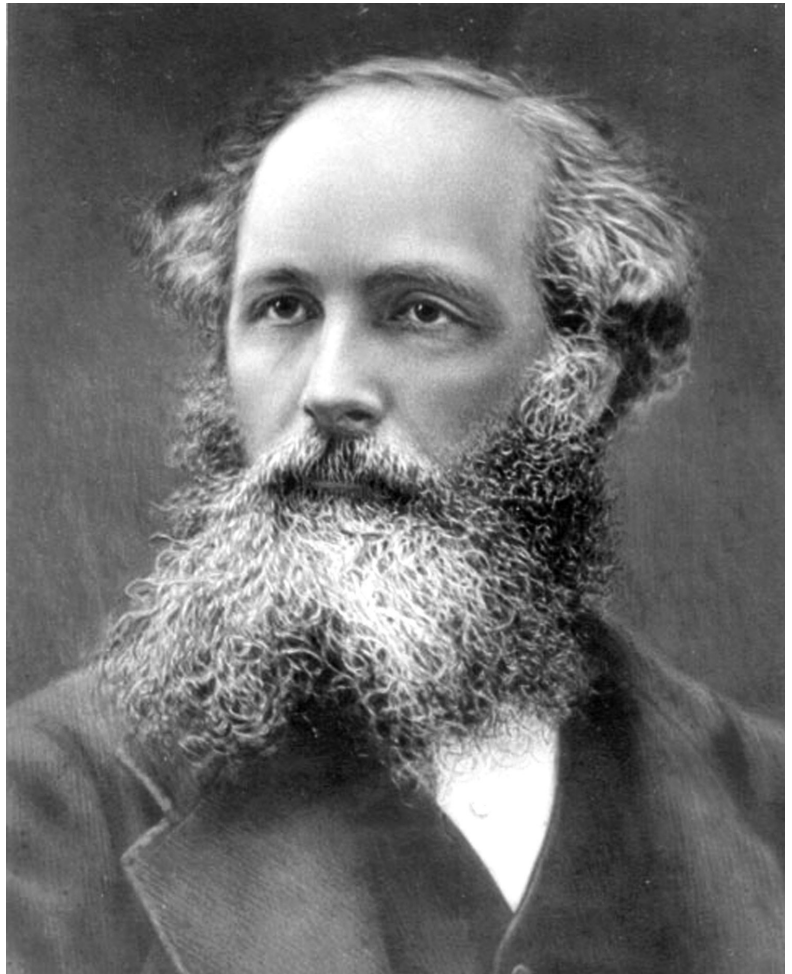
En 1877 comenzaron los problemas de salud de Maxwell, aunque no visitó a ningún médico hasta dos años después. De hecho, pueden verse que las fotos de aquella época muestran a un Maxwell deteriorado con su cara apagada y ojerosa. A principios de 1879 su salud empezó a resentirse todavía más y aún así se encargó del examen para el Premio Smith de 1879 (como lo fuera Stokes 25 años antes cuando Maxwell se presentó al premio). Luego tomó la decisión de pasar las vacaciones de verano en su finca escocesa de Glenlair con la esperanza de que su salud mejoraría. Sin embargo, cada vez se encontraba peor. A pesar de su pésimo estado, en octubre decidió regresar a Cambridge aunque apenas podía mantenerse en pie y desde luego no podía impartir clase. Después de que el médico le comunicara que apenas le quedaba un mes de vida, manifestó a uno de sus amigos que toda su vida había sido tratado amablemente y que “lo único que puedo desear es, como David, servir a mi generación por el deseo de Dios, y tras lo cual caer dormido”. Esa imagen de tranquilidad es la que se refleja en los textos que sobre él se han escrito. Maxwell falleció de cáncer de estómago el 5 de noviembre de 1879 a los cuarenta y ocho años de edad. Pocos meses antes, el 14 de marzo de 1879, nació en Ulm, una ciudad alemana del estado de Baden-Wurtemberg, Albert Einstein (1879-1955) al que desde luego pasó Maxwell el testigo de la física teórica de camino hacia el siglo XX. Antes de morir, una de las cosas que más preocupaba a Maxwell era el futuro de su esposa Katherine, por la que sentía gran devoción. Su amigo Peter Tait publicó un obituario como tributo a Maxwell en el que escribió: “el espíritu de Clerk Maxwell aún se encuentra entre nosotros a través de sus escritos imperecederos, y hablará a la siguiente generación por los labios de aquellos que han tomado la inspiración de sus enseñanzas y su ejemplo”.

La teoría electromagnética

Maxwell nos dejó numerosas contribuciones en áreas muy diversas: electromagnetismo, teoría del color, estructura de los anillos de Saturno, física estadística, teoría de los sólidos, geometría, óptica e incluso en regulación automática. Por lo que se refiere al campo del electromagnetismo, Maxwell llevó a cabo la formulación matemática de las ideas intuitivas de Michael Faraday (1791-1867) sobre los campos eléctricos y magnéticos. Faraday, que había abandonado años atrás la teoría de los fluidos eléctrico y magnético, introdujo los conceptos de “campo” y “líneas de campo” para explicar la electricidad y el magnetismo, apartándose de ese modo de la descripción mecanicista de los fenómenos naturales al más puro estilo newtoniano de “acciones a distancia”. Esta incorporación del concepto de campo fue calificada por Einstein como el “gran cambio en la física”, pues suministró a la electricidad, el magnetismo y la óptica un marco común de teorías físicas. Sin embargo, hubo que esperar hasta que Maxwell formalizara matemáticamente las líneas de campo de Faraday para que éstas fueran completamente aceptadas.

En 1856, tras graduarse en Cambridge, Maxwell publica “On Faraday’s lines of force” y en 1861, siendo ya catedrático en Londres, “On physical lines of force”. En estos artículos 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. Su teoría matemática describía el éter, un “espíritu sutilísimo” como lo describiera Newton, de modo que las interacciones electromagnéticas las estudiaba con toda naturalidad en el marco de un éter omnipresente. Maxwell intentaba crear los cimientos de una nueva ciencia basada en el concepto de energía y 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.

En 1865 Maxwell publica el artículo titulado “A dynamical theory of the electromagnetic field”, considerado por muchos su aportación más importante. Mientras lo redactaba, el 5 de enero de 1865 escribió una carta a su joven primo Charles Cay (1841-1869), que por cierto fue sexto *wrangler* del *Tripes* de 1864, señalándole “Tengo un artículo a flote, con una teoría electromagnética de la luz que, salvo que me convenza de lo contrario, considero de gran valor”. Este “... considero de gran valor” de la traducción en español, realmente aún



tiene más énfasis en inglés pues Maxwell escribe “... I hold to be great guns”. Sólo a alguien como a su primo *favorito* habría expresado Maxwell una opinión tan personal sobre su propio trabajo. Maxwell había enviado previamente un breve resumen de su trabajo a la Royal Society el 27 de octubre de 1864 que él mismo leyó ante esta sociedad el 8 de diciembre de ese mismo año, aunque ni con la extensión ni con todo el contenido que luego aparecería en el artículo definitivo. Una vez Maxwell concluyó el artículo, lo remitió el 23 de marzo de 1865 a George Stokes, por aquel entonces Secretario de Ciencias Físicas de la Royal Society, y tras varias revisiones fue aceptado el 15 de junio de 1865 para su publicación en *Philosophical Transactions of the Royal Society* y enviado el 16 de junio de 1865 a la imprenta de Taylor & Francis. Este artículo se ha convertido por méritos propios en uno de los más importantes de la historia de la física al contener las “ecuaciones del campo electromagnético” (conocidas como “ecuaciones de Maxwell”) y la “teoría electromagnética de la luz”. Pero eso no era todo, en una de las hazañas más grandes del pensamiento humano, Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas propagándose a la velocidad de la luz y además concluyó que la luz era una onda electromagnética. Así se puede leer en el propio artículo lo que Maxwell, con modestia y humildad, concluía al

James Clerk Maxwell en su época de Cavendish Professor of Experimental Physics (cortesía: AIP Emilio Segre Visual Archives).

respecto: “... 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”.

Propuso veinte ecuaciones que denominó “ecuaciones generales del campo electromagnético” y que relacionan veinte variables que rigen el comportamiento de la interacción electromagnética. El artículo original tiene cincuenta y cuatro páginas y consta de siete partes:

- Introducción
- Sobre la inducción electromagnética
- Ecuaciones generales del campo electromagnético
- Acciones mecánicas en el campo
- Teoría de los condensadores
- Teoría electromagnética de la luz
- 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:

- 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 del campo electromagnético en coordenadas cartesianas y con ayuda de los cuaterniones ideados por William Rowan Hamilton (1805-1865) en 1843 (según relató el propio Hamilton mientras paseaba con su esposa por el puente de Broughamen de Dublín) y de los que Peter Tait, el amigo de Maxwell, fue uno de sus principales defensores. Hay que tener en cuenta que antes de la muerte de Maxwell el análisis vectorial no estaba del todo desarrollado. Tait, en el prefacio de su libro *An elementary treatise on quaternions* calificó de “panfleto” el libro de Gibbs sobre análisis vectorial y denominó despectivamente al análisis vectorial “una clase de monstruo hermafrodita”. Por eso no fue hasta 1884 cuando Oliver Heaviside (1850-1925), utilizando los métodos del análisis vectorial, sintetizó las veinte ecuaciones del campo electromagnético en las cuatro ecuaciones en forma vectorial 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, en la que Maxwell introdujo la “corriente de desplazamiento”. Desde entonces se conocieron como ecuaciones de Hertz-Heaviside o de Maxwell-Hertz (así las denomina Einstein en su artículo “Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento” publicado en 1905), hasta que en 1940 Einstein popularizó el término “ecuaciones de Maxwell” que se utiliza desde entonces. Estas ecuaciones proporcionan una base teórica completa para el tratamiento de los fenómenos electromagnéticos clásicos. 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 el que escribió estos signos?”

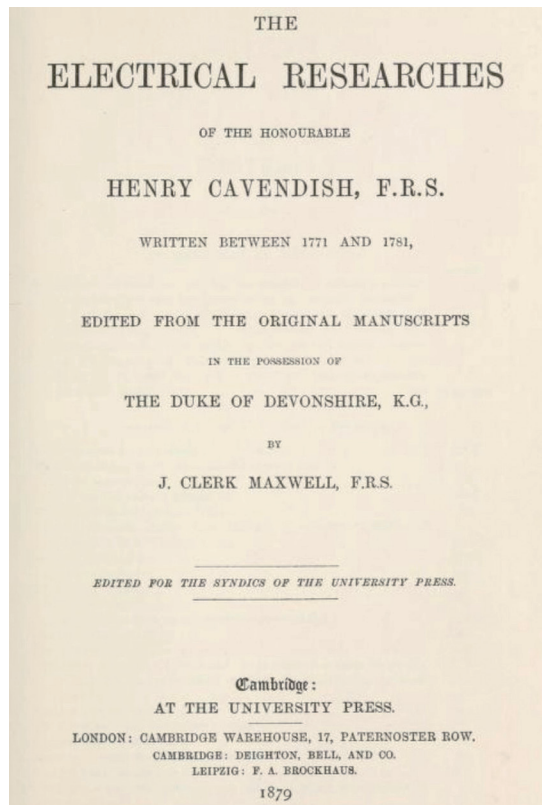
La sexta parte de su artículo Maxwell la titula “teoría electromagnética de la luz” y en ella Maxwell combinó las ecuaciones del campo electromagnético y obtuvo una ecuación de onda y propuso la existencia de las ondas electromagnéticas. Determinó la velocidad de propagación de estas ondas electromagnéticas en aire teniendo en cuenta el valor de la permitividad eléctrica determinado por Weber y Kohlrausch en 1857 y comparó su resultado con los valores de la velocidad de la luz medidos por Fizeau y por Foucault en 1849 y 1862, respectivamente. Al ser tan parecidos los valores de la velocidad de estas ondas electromagnéticas con la velocidad de la luz concluyó que “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



Entrada al antiguo Laboratorio Cavendish en la Universidad de Cambridge (University of Cambridge, Cavendish Laboratory, cortesía: AIP Emilio Segre Visual Archives).

siempre. El carácter electromagnético de la luz sobre el que había especulado Faraday en 1846 en su artículo "Thoughts on ray vibrations" 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. Maxwell no sólo acababa de predecir teóricamente la existencia de las ondas electromagnéticas, sino que además había concluido que la luz era un tipo de estas ondas. Einstein se refirió a ese momento crucial de Maxwell en su artículo "Considerations concerning the fundamentals of theoretical physics" publicado en 1940 en la revista *Science* con el siguiente comentario: "¡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". Es evidente que antes de Maxwell la velocidad de la luz era sólo una velocidad entre muchas, pero después de Maxwell, se convirtió en una auténtica privilegiada de la física, indicando el camino a Einstein y la relatividad. Dedujo que las ondas electromagnéticas eran ondas transversales y 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.

Es importante señalar que Maxwell sentía gran admiración por Faraday hasta tal punto que atribuye al artículo "Thoughts on ray vibrations" publicado por Faraday en 1846 las ideas que le sirvieron de base para la elaboración de su teoría electromagnética de la luz. En la página 466 de su artículo de 1865 Maxwell se refiere al artículo de Faraday de 1846 de la siguiente forma: "La concepción de la propagación de perturbaciones magnéticas transversales y la exclusión de las normales está claramente establecida por el Profesor Faraday en sus 'consideraciones sobre los rayos'. La teoría electromagnética de la luz, según lo propuesto por él [Faraday], es la misma en esencia, a la que yo he comenzado a desarrollar en este trabajo, a excepción de que en 1846 no había datos para calcular la velocidad de propagación". Y en la página 461 de esta misma publicación de 1865, Maxwell también escribe lo siguiente sobre el efecto magneto-óptico descubierto por Faraday justo veinte años antes: "Faraday descubrió que cuando un rayo de luz polarizada plana atraviesa un medio diamagnético transparente en la dirección de las líneas de fuerza magnética producidas por imanes o corrientes situados en sus alrededores, se produce un giro en el plano de polarización de la luz". Maxwell cita seis veces a Faraday y lo menciona tres veces más en su artículo "A dynamical theory of the electromagnetic field". Esto no puede ser considerado como algo fuera de lo normal y no es en absoluto extraño. Como ya se



Portada del libro *The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish*, editado por Maxwell y publicado en 1879.

ha señalado, Maxwell admiraba a Faraday y gran parte su trabajo sobre electromagnetismo está basado en el trabajo previo de Faraday. Además fue Maxwell quien modeló matemáticamente los descubrimientos experimentales de Faraday sobre electromagnetismo en la teoría que ha llegado a nuestros días. "Si he logrado ver más lejos, es porque he subido a hombros de gigantes" escribió Newton a Hooke en 1676. Doscientos cincuenta años después, durante una de las visitas que Einstein realizó a Cambridge alguien le comentó "usted ha hecho grandes cosas, pero porque se subió a hombros de Newton" a lo que Einstein le replicó "eso no es cierto, estoy subido a hombros de Maxwell". Es más que probable que si alguien

PART III.—GENERAL EQUATIONS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD.

Electrical Currents (p, q, r).

Electrical Displacements (f, g, h).

$$\left. \begin{aligned} p' &= p + \frac{df}{dt}, \\ q' &= q + \frac{dg}{dt}, \\ r' &= r + \frac{dh}{dt}. \end{aligned} \right\} \text{(A)}$$

Equations of Currents.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dt} - \frac{db}{dx} &= 4\pi p', \\ \frac{dx}{dz} - \frac{dy}{dx} &= 4\pi q', \\ \frac{db}{dx} - \frac{dx}{dz} &= 4\pi r'. \end{aligned} \right\} \text{(C)}$$

Equations of Electric Elasticity,

$$\left. \begin{aligned} P &= kf, \\ Q &= kq, \\ R &= kh. \end{aligned} \right\} \text{(E)}$$

Equation of Free Electricity,

$$e + \frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0. \quad \text{(G)}$$

Equations of Magnetic Force.

$$\left. \begin{aligned} \mu\alpha &= \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}, \\ \mu\beta &= \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx}, \\ \mu\gamma &= \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}. \end{aligned} \right\} \text{(B)}$$

Equations of Electromotive Force.

$$\left. \begin{aligned} P &= \mu \left(\gamma \frac{dy}{dt} - \beta \frac{dz}{dt} \right) - \frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx}, \\ Q &= \mu \left(\alpha \frac{dz}{dt} - \gamma \frac{dx}{dt} \right) - \frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy}, \\ R &= \mu \left(\beta \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz}. \end{aligned} \right\} \text{(D)}$$

Equations of Electric Resistance,

$$\left. \begin{aligned} P &= -\xi p, \\ Q &= -\xi q, \\ R &= -\xi r. \end{aligned} \right\} \text{(F)}$$

Equation of Continuity,

$$\frac{de}{dt} + \frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0. \quad \text{(H)}$$

Ecuaciones del campo electromagnético tal y como aparecen en el artículo original de Maxwell publicado en 1865 ("A dynamical theory of the electromagnetic field").



Estatua de James Clerk Maxwell en Edimburgo realizada por Alexander Stoddart. Maxwell sujeta uno de sus discos de colores y está acompañado de su perro Toby (fotografía de Augusto Beléndez Pascual).

hubiera hecho una afirmación similar a Maxwell, éste habría señalado que él se subió a hombros de Faraday.

Las ondas electromagnéticas cuya existencia fue predicha matemáticamente por Maxwell en 1865 en su artículo "A dynamical theory of the electromagnetic field" fueron producidas por primera vez en el laboratorio en 1888 por Heinrich Hertz (1857-1894). Para ello, y con ayuda de circuitos oscilantes LC, Hertz consiguió generar ondas de radiofrecuencia de longitud de onda del orden del metro. Esto suponía la confirmación de la teoría de Maxwell y una victoria sobre los ingenieros telegráficos como William Preece (1834-1913), Director del Servicio Británico de Correos y Telégrafos, que negaba la aplicabilidad de la física de Maxwell a cuestiones de ingeniería práctica. 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 el 12 de diciembre de 1901 el ingeniero italiano y Premio Nobel de Física Guglielmo Marconi (1874-1937) al realizar una transmisión mediante ondas de radio a través del Océano Atlántico entre Poldhu, Cornualles (Inglaterra) y San Juan de Terranova (Canadá). De no haber fallecido, Maxwell hubiera tenido entonces 70 años y habría podido disfrutar del éxito de su predicción teórica realizada 36 años atrás.

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 ciento cincuenta 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.

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". Esta "síntesis" es uno de los mayores logros de la física, pues no sólo unificó los fenómenos luminosos, eléctricos y magnéticos, sino que permitió desarrollar toda la teoría de las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz. Esta "síntesis de Maxwell" marcó un hito importante en la historia de la unificación de las fuerzas físicas hasta tal punto que a finales del siglo XIX entre los físicos estaba extendida la opinión de que las leyes físicas ya estaban suficientemente comprendidas. Esta opinión condujo a la famosa afirmación del físico y Premio Nobel de Física Albert Michelson (1852-1931) que en su libro *Light waves and their uses* señalaba que ya no se realizarían más descubrimientos fundamentales, a lo sumo se perfeccionarían las determinaciones de las constantes físicas alcanzando seis o más cifras decimales. Nada más lejos de la realidad. 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 la teoría de la relatividad especial y de este cambio de paradigma es responsable tanto la luz, otra vez la luz, como la teoría de las ondas electromagnéticas de Maxwell, pues sentó las bases para dos de las ideas más revolucionarias surgidas a principios del siglo XX relacionadas con el estudio de la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro que llevó a Max Planck (1858-1947) 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 hitos históricos de la ciencia de la luz que se conmemoraron en el "Año Internacional de la Luz 2015"—, y por otro el experimento 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.

Sin lugar a dudas, la obra de Maxwell sobre electromagnetismo fue majestuosa y extensa, sin embargo tuvo ciertas limitaciones, como fue el intento de conciliar la mecánica de Newton con su electromagnetismo, problema que finalmente fue resuelto por Einstein en 1905 con su teoría de la

relatividad especial. Tras los trabajos de Einstein, el éter luminífero —ese “espíritu sutilísimo”, considerado el medio en el que se propagaba la luz 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.

El propio Einstein reconoció que su teoría de la relatividad especial debía sus orígenes a las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético y en su artículo “Maxwell’s influence on the development of the conception of physical reality” publicado en 1931 en el libro *James Clerk Maxwell: A Commemoration Volume 1831-1931*, editado en Cambridge en 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 “el trabajo de James Clerk Maxwell cambió el mundo para siempre”. Esta frase de Einstein ha hecho que Maxwell sea calificado en ocasiones como “el hombre que cambió el mundo para siempre”.

Bibliografía recomendada

Existe una gran bibliografía sobre Maxwell y muchos artículos y libros que tratan de su obra, por lo que sólo se mencionan los que me parecen indispensables y que además son los que más he consultado a la hora de escribir este artículo.

- [1] J. M. SÁNCHEZ RON (edición y traducción), *J. C. Maxwell: Materia y movimiento* (Crítica, Barcelona 2006).
- [2] J. GABÀS, *La naturaleza de la luz: Maxwell* (Nivola libros y ediciones, Madrid 2012).
- [3] B. MAHON, *The man who changed everything: The life of James Clerk Maxwell* (John Wiley & Sons Ltd., Chichester 2014).
- [4] R. FLOOD, M. MCCARTNEY y A. WHITAKER (eds.), *James Clerk Maxwell. Perspectives on his Life and Work* (Oxford University Press, Oxford 2014).
- [5] N. FORBES y B. MAHON, *Faraday, Maxwell, and the Electromagnetic Field: How two men revolutionized Physics* (Prometheus Books, Nueva York 2014).
- [6] F. EVERITT, “James Clerk Maxwell: a force for physics”, *Physics World*, diciembre, 32-37 (2006).
- [7] J. C. MAXWELL, “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>
- [8] M. LONGAIR, “...a paper ...I hold to be great guns: a commentary on Maxwell (1865), A dynamical theory of the electromagnetic field”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **373**, Art. 20140473, 22 páginas (2015). Disponible en: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/373/2039/20140473>
- [9] En el siguiente enlace puede consultarse un listado de los libros y trabajos científicos publicados por James Clerk Maxwell (consultado el 16/02/2016) http://www.clerkmaxwellfoundation.org/PUBLISHED_SCIENTIFIC_PAPERS.pdf