



LA UNIFICACIÓ ELECTROMAGNÈTICA

150 ANIVERSARI DE LES EQUACIONS DE MAXWELL

Augusto Beléndez Vázquez

Quan utilitzem els telèfons mòbils, escoltem la ràdio, usem el comandament a distància, veiem la televisió o escalfem els aliments en el microones és probable que no sapiguem que James Clerk Maxwell és el responsable que aquesta tecnologia siga possible. L'any 1865 Maxwell va publicar un article titulat «Una teoria dinàmica del camp electromagnètic» en el qual afirmava: «sembla que tenim raons de pes per a concloure que la mateixa llum (incloent-hi la calor radiant i altres radiacions si n'hi ha) és una pertorbació electromagnètica en forma d'ones que es propaguen segons les lleis de l'electromagnetisme» (Maxwell, 1865). Aquest any 2015 se celebra el 150è aniversari de les equacions de Maxwell i de la teoria electromagnètica de la llum, esdeveniments que es commemoren en l'«Any internacional de la llum i de les tecnologies basades en la llum», declarat com a tal per l'ONU.

Al començament del segle XIX, electricitat, magnetisme i òptica eren tres disciplines independents. No obstant això, la situació va canviar gràcies a una invenció i a dos descobriments. La invenció va ser la pila elèctrica, una font de corrent elèctric continu, fabricada per Alessandro Volta cap a 1800. Els dos descobriments van ser, d'una banda, la demostració dels efectes magnètics produïts per corrents elèctrics realitzada per Hans Christian Oersted i André-Marie Ampère el 1820; i d'una altra, el descobriment de Michael Faraday el 1831 de la generació de corrent elèctric a partir de camps magnètics: la inducció electromagnètica. Aquestes contribucions van posar els pilars de l'electromagnetisme modern, que va culminar en l'últim terç del segle XIX amb la síntesi de Maxwell de l'electricitat, el magnetisme i l'òptica. Aquesta síntesi representa probablement la més profunda transformació dels fonaments de la física des dels temps de Newton i és un dels majors èxits de la ciència, ja que unifica els fenòmens elèctrics i magnètics i permet també desen-

volupar la teoria de les ones electromagnètiques, incloent-hi la llum (Udías, 2004).

■ ORÍGENS DE L'ELECTROMAGNETISME MODERN

Hans Christian Oersted (1777-1851) va estudiar filosofia natural en la Universitat de Copenhaguen, de la qual va ser catedràtic de Física i Química (Pérez i Varela, 2003). La invenció de la pila elèctrica havia estat una autèntica revolució entre els científics perquè els permetia treballar amb fonts permanents de «fluid elèctric». Oersted va començar a realitzar experiments amb una pila voltaica i a l'abril de 1820 va comprovar que un corrent elèctric desviava una agulla imantada situada a prop. Havia descobert que un corrent elèctric produïa efectes magnètics i que l'electricitat i el magnetisme no eren fenòmens independents. Oersted va publicar els seus resultats en un breu article en llatí, *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, datat el 21 de juliol de 1820 i va encunyar el terme *electromagnetisme* per a designar la part de la física que englobaria des de llavors ambdós fenòmens.

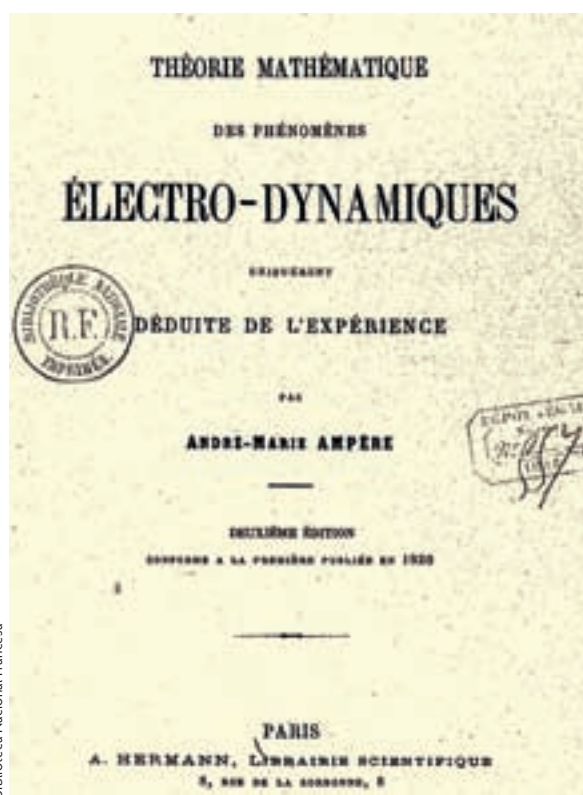
Contemporani d'Oersted va ser el francès André-Marie Ampère (1775-1836). Els seus primers anys van estar marcats per la Revolució Francesa i per l'execució de son pare en la guillotina (Pérez i Varela, 2003). Després de ser durant uns quants anys professor de física i química en centres d'ensenyament secundari, el 1804 va obtenir una plaça de professor en l'Escola Politècnica de París i el 1814 va ser admès en l'Acadèmia de Ciències francesa. Encara que Ampère va mostrar grans qualitats per a les matemàtiques, l'òptica i la química, les seues contribucions més importants les va fer en el camp de l'electromagnetisme. El 1820 va tenir notícies del descobriment d'Oersted, aquell *conflictus electrici* capaç de fer que es desviara una agulla imantada, i aquell mateix estiu va realitzar

**«AL COMENÇAMENT DEL
SEGLE XIX, ELECTRICITAT,
MAGNETISME I ÒPTICA
EREN TRES DISCIPLINES
INDEPENDENTS»**

A l'esquerra, imatge de James Clerk Maxwell (1831-1879), qui, junt amb Newton i Einstein, és considerat un dels grans de la història de la física. La seua teoria del camp electromagnètic va esdevenir fonamental tant per a la comprensió dels fenòmens naturals com per al desenvolupament del món de la tècnica i, en particular, de les telecomunicacions.



MÉTODE



Biblioteca Nacional Francesa

La demostració dels efectes magnètics produïts per corrents elèctrics realitzada per Hans Christian Oersted i André-Marie Ampère el 1820 va contribuir a establir les bases de l'electromagnetisme modern. A l'esquerra, imatge d'Oersted. A la dreta, portada de *Teoria matemàtica dels fenòmens electrodinàmics* d'Ampère.

diversos experiments. Si un corrent elèctric produïa efectes magnètics sobre un imant, per què no podria produir efectes magnètics sobre un altre corrent?

Al setembre de 1820 va presentar els seus resultats en l'Acadèmia de Ciències: l'acció mútua entre corrents sense intervenció de cap imant. És a dir, dos corrents elèctrics paral·lels s'atrauen o es repel·leixen segons siguin els seus sentits iguals o oposats, respectivament. El 1826 va publicar el seu llibre *Teoria matemàtica dels fenòmens electrodinàmics deduïda únicament de l'experiència*, en el qual afirmava que «el magnetisme és electricitat en moviment» i que els fenòmens magnètics depenen només de l'existència i del moviment de càrregues elèctriques.

El cas de Michael Faraday (1791-1867) no és freqüent en la història de la física. De família humil, va abandonar l'escola als tretze anys per a treballar en un taller d'enquadernació. Allí es va despertar la seua passió per la ciència després de llegir la veu *electricitat* de l'*Enciclopèdia Britànica* quan l'estava enquadrant, després d'això va començar a fer experiments en un laboratori improvisat. El 1813 va ser contractat com a ajudant de laboratori de Humphrey Davy en la Royal Institution de Londres, de la qual seria triat membre el 1824 i on va treballar fins que va morir el 1867. Faraday

va causar tal impressió a Davy que aquest, en ser preguntat per quin havia estat el seu major descobriment científic, va respondre: «El meu gran descobriment ha estat Michael Faraday» (Díaz, 2001).

El 1821 Faraday va repetir l'experiment d'Oersted situant un petit imant al voltant d'un fil amb corrent i va comprovar que la força exercida pel corrent sobre l'imant era de naturalesa circular. Com va expressar anys després, el fil estava envoltat per una sèrie infinita de «línies de força» circulars i concèntriques: el camp magnètic del corrent, terme encunyat per Faraday. El 1831 va aconseguir produir un corrent elèctric a partir d'una acció magnètica, fenomen conegut com a inducció electromagnètica. Va comprovar que en fer passar un corrent elèctric per una bobina, es generava un altre corrent de molt curta durada en una altra bobina pròxima. Aquest descobriment va marcar una fita decisiva en el progrés, no sols de la ciència sinó de la societat i és l'utilitzat avui dia per a produir energia elèctrica a gran escala en les centrals elèctriques.

Faraday va abandonar la teoria dels fluids per a explicar l'electricitat i el magnetisme i va introduir els conceptes de *camp* i *línies de camp*, apartant-se de la descripció mecanicista dels fenòmens naturals al més pur estil newtonià d'*accions a distància*.

Lucia Sapina



Michael Faraday va introduir el concepte de *línies de força* per a representar els camps elèctric i magnètic i el 1831 va aconseguir produir un corrent elèctric a partir d'una acció magnètica. En la imatge, estàtua de Faraday que presideix l'entrada a la Royal Institution de Londres.

«FARADAY VA ENCUNYAR EL CONCEPTE DE CAMP ELECTROMAGNÈTIC I EL 1831 VA ACONSEGUIR PRODUIR UN CORRENT ELÈCTRIC A PARTIR D'UNA ACCIÓ MAGNÈTICA»

■ JAMES CLERK MAXWELL

James Clerk Maxwell (1831-1879) va ser un dels científics més importants de tots els temps. Ens va deixar la teoria del camp electromagnètic, fonamental no sols des del punt de vista de la comprensió dels fenòmens naturals sinó per l'aplicació que té en el món de la tècnica, en particular en l'avui omnipresent univers de les telecomunicacions. Maxwell és un dels grans de la història de la física, junt amb Newton i Einstein (Sánchez Ron, 2006).

Maxwell va nèixer a Edimburg al si d'una família benestant. Després de rebre educació privada en la finca familiar de Glenlair, va ser enviat a l'Acadèmia d'Edimburg, en la qual va estar-se cinc anys i on va aprendre francès, alemany, lògica, filosofia, química i matemàtiques. El 1847 va accedir a la Universitat d'Edimburg i després de tres cursos va ingressar en la Universitat de Cambridge, el centre més influent de la física en aquella època, i va ser admès al Trinity College. En finalitzar els seus estudis Maxwell va guanyar la càtedra de filosofia natural del Marischal College d'Aberdeen, on va passar quatre anys. Allí va realitzar investigacions sobre la teoria del color i va contraure matrimoni amb Katherine Mary Dewar, filla del *Principal* del College. El 1860 va abandonar Aberdeen per a ocupar una altra càtedra al King's College de Londres i un any després va ser nomenat membre de la Royal Society. Al febrer de 1865, a mitjan curs, va renunciar a la seua càtedra londinenca per voluntat pròpia, per a tornar a la seua finca escocesa de Glenlair (Reid, 2014). Allí va escriure la seua gran obra, publicada el 1873, el *Tractat d'electricitat i magnetisme*, dos volums de més de 500 pàgines cadascun, text cimera de la física del segle XIX i comparable als *Principia* de Newton publicats quasi dos segles abans. En aquesta obra, Maxwell aconsegueix unificar tots els fenòmens coneguts fins al moment sobre electricitat i magnetisme.

El 1871 Maxwell va ser designat per a ocupar la càtedra de Física Experimental de la Universitat de Cambridge, acabada de crear, i el 1874 se'l va dotar d'un nou centre d'investigació, el Laboratori Cavendish, del qual va ser el primer director. A començament de 1879 la salut de Maxwell va començar a ressentir-se i el 5 de novembre d'aquell mateix any va morir de càncer abdominal. Tenia 48 anys.

■ LES EQUACIONS DE MAXWELL

Maxwell ens va deixar contribucions en la teoria del color, el coneixement de l'estructura dels anells de Saturn i la física estadística, però sobretot en electromagnetisme. El 1856 va publicar *Sobre les línies de força de Faraday* i el 1861 *Sobre les línies físiques de força*. En aquests dos articles va proporcionar una explicació matemàtica de les idees de Faraday sobre els fenòmens elèctrics i

magnètics en funció de la distribució de línies de força en l'espai, abandonant definitivament la doctrina clàssica de les forces elèctriques i magnètiques com a accions a distància. La seua teoria matemàtica incloïa l'èter, aquell «esperit subtilíssim» com el va descriure Newton. Les interaccions electromagnètiques les estudiava amb tota naturalitat en el marc d'un èter omnipresent. Maxwell es va mantenir ferm en la convicció que l'èter no era una entitat hipotètica sinó real i, de fet, per als físics del segle XIX l'èter era tan real com les pedres que formaven el Laboratori Cavendish.

Amb 33 anys va publicar «Una teoria dinàmica del camp electromagnètic». En aquest article Maxwell inclou vint equacions que va denominar «equacions generals del camp electromagnètic» i que relaciona amb vint variables que regeixen el comportament de la interacció electromagnètica. L'article consta de 53 pàgines i conté set parts distintes. Les seues vint equacions generals del camp electromagnètic, que expressen i resumeixen les lleis experimentals de l'electromagnetisme, proporcionen una base teòrica completa per al tractament dels fenòmens electromagnètics clàssics. Maxwell hi va mostrar que electricitat i magnetisme no són sinó manifestacions diferents d'un mateix substrat físic, electromagnètic (Sánchez Ron, 2006).

El 1884 Oliver Heaviside i, posteriorment i de manera independent, Heinrich Hertz, utilitzant la notació vectorial, van sintetitzar les vint equacions del camp electromagnètic en les quatre equacions de Maxwell que coneixem avui dia: la llei de Gauss del camp elèctric, la llei de Gauss del camp magnètic, la llei de Faraday-Henry de la inducció electromagnètica i la llei d'Ampère-Maxwell. Des de llavors les equacions de l'electromagnetisme es van conèixer com a equacions d'Hertz-Heaviside o de Maxwell-Hertz, fins que el 1940 Einstein va popularitzar el terme «equacions de Maxwell» (Turnbull, 2013). El físic d'origen austríac Ludwig Boltzmann va considerar que aquestes equacions eren tan belles per la seua simplicitat i elegància que, amb una cita del *Faust* de Goethe, es va preguntar: «Va ser potser un déu el qui va escriure aquests signes?» (Darrigolp, 2002).

En la sisena part del seu article de 1865, titulada «Teoria electromagnètica de la llum», Maxwell conclou: «difícilment podem evitar la inferència que la llum no és una altra cosa que ondulacions transversals del mateix mitjà que és la causa dels fenòmens elèctrics i magnètics». Maxwell va demostrar que les equacions del camp electromagnètic podien combinar-se per a donar lloc a una equació d'ona i va proposar l'existència de les ones electromagnètiques. En calcular la velocitat de propagació d'aquestes ones va obtenir el valor de la velocitat de

**«LA SÍNTESIS DE MAXWELL
MARCÓ UN HITO EN LA
HISTORIA DE LA UNIFICACIÓN
DE LAS FUERZAS»**



James Clerk Foundation

El 1871 Maxwell va ser designat per a ocupar l'acabada de crear càtedra de Física Experimental de la Universitat de Cambridge i el 1874 se li va dotar d'un nou centre d'investigació, el laboratori Cavendish (en la imatge), del qual va ser el primer director.

la llum, va concloure que la llum era una ona electromagnètica.

Einstein es va referir a aquest moment crucial de Maxwell assenyalant: «Quants sentiments degué experimentar en comprovar que les equacions diferencials que ell havia formulat indicaven que els camps electromagnètics s'expandien en forma d'ones a la velocitat de la llum! A molt pocs homes en el món els ha estat concedida una experiència d'aquesta índole» (Einstein, 1940). Abans de Maxwell, la velocitat de la llum era només una velocitat entre moltes. Després d'ell, la velocitat de la llum es va convertir en una privilegiada que va assenyalar el camí a Einstein i la relativitat.

Les ones electromagnètiques van ser produïdes per Heinrich Hertz en un laboratori el 1888, la qual cosa va confirmar la teoria de Maxwell. El 1901 l'enginyer italià Guillermo Marconi va realitzar una transmissió mitjançant ones electromagnètiques a través de l'oceà Atlàntic, entre Cornualla (Anglaterra) i Sant Joan de Terranova (Canadà). Marconi va rebre el premi Nobel de Física el 1909 per les seues contribucions al desenvolupament de la telegrafia sense fils.



James Clerk Foundation

El 1865, Maxwell va renunciar a la càtedra al King's College de Londres per a tornar a la seua finca escocesa de Glenlair. Allí va escriure la seua gran obra, el *Tractat d'electricitat i magnetisme*, text cimer de la física del segle XIX i comparable als *Principia* de Newton publicats quasi dos segles abans. En la imatge, James Clerk Maxwell amb la seua dona, Katherine Mary Dewar, el 1869.

Raigs gamma, raigs X, radiació ultraviolada, llum visible, radiació infraroja, microones, i ones de ràdio i televisió, totes aquestes radiacions constitueixen l'espectre de les ones electromagnètiques, ones l'existència de les quals va predir Maxwell fa 150 anys. La síntesi de Maxwell va marcar una fita en la història de la unificació de les forces de tal envergadura que a les acaballes del segle XIX molts físics pensaven que les lleis físiques ja estaven prou compreses. Això va conduir el físic nord-americà Albert Michelson a escriure: «les lleis fonamentals de la física ja han estat descobertes i estan establides tan fermament que la possibilitat que es realitzen més descobriments fonamentals és extremadament remota; a tot estirar es perfeccionaran les determinacions de les constants físiques aconseguint sis o set xifres decimals» (Michelson, 1903). Res més lluny de la realitat. En els primers anys del segle XX es van produir dos canvis transcendents en la física amb la teoria dels quants de Planck (1900) i la teoria de la relativitat especial d'Einstein (1905), ambdues conseqüència de la teoria electromagnètica de Maxwell, que va establir les bases per a aquestes dues idees revolu-

cionàries. És evident que Maxwell va obrir les portes a la física del segle XX (Gabàs, 2012).

■ EL LLEGAT DE MAXWELL

Encara que el treball de Maxwell sobre electromagnetisme va ser crucial, tenia les seues limitacions i una d'aquestes era la conciliació de la mecànica newtoniana i l'electromagnetisme de Maxwell, problema que va ser resolt per Einstein el 1905 amb la seua teoria de la relativitat especial. Després dels treballs d'Einstein, l'èter luminífer –el centre d'atenció de la física del segle XIX– era mort i soterrat. El mateix Einstein va reconèixer que la seua teoria especial de la relativitat devia els seus orígens a les equacions de Maxwell. En un article publicat el 1931, amb motiu del centenari del naixement de Maxwell, va afirmar que «una època científica va acabar i una altra va començar amb Maxwell» i que «el treball de James Clerk Maxwell va canviar el món per sempre» (Einstein, 1931).

Richard Feynman, premi Nobel de Física el 1965, va assenyalar: «amb una perspectiva molt àmplia de la història de la humanitat contemplada, posem per cas d'aquí a deu mil anys, no hi ha el menor dubte que es considerarà que el fet més significatiu del segle XIX és el descobriment realitzat per Maxwell de les lleis de l'electromagnetisme» (Feynman *et al.*, 1987). 🌐

REFERÈNCIES

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

Augusto Beléndez Vázquez. Catedràtic de Física Aplicada i director de l'Institut Universitari de Física Aplicada a les Ciències i les Tecnologies. Universitat d'Alacant.