

Albert Einstein

SU VIDA,
SU OBRA
Y SU MUNDO

José Manuel
Sánchez Ron

Albert Einstein

SU VIDA, SU OBRA Y SU MUNDO



DRAKONTOS

Director:

JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON

Albert Einstein

SU VIDA, SU OBRA Y SU MUNDO

José Manuel Sánchez Ron

Primera edición: noviembre de 2015

Albert Einstein: su vida, su obra y su mundo

José Manuel Sánchez Ron

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

© José Manuel Sánchez Ron

© Fundación BBVA, 2015

Plaza de San Nicolás, 4. 48005 Bilbao
www.bbva.es

© Editorial Planeta S. A., 2015

Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es

ISBN (Planeta): 978-84-9892-897-6

ISBN (Fundación BBVA): 978-84-92937-62-2

Depósito legal: B. 24.121 - 2015

2015. Impreso y encuadernado en España por Unigraf

*Para Ana, Mireya y Amaya,
treinta y dos años después,
pero con el mismo amor*

PREFACIO

Mi primer libro, con el que verdaderamente comencé mi carrera de historiador de la ciencia, aunque entonces todavía la compatibilizaba con la de físico, se publicó en 1983 y se titulaba *El origen y desarrollo de la relatividad* (Sánchez Ron, 1983). Treinta y dos años más tarde, y después de haber publicado no pocos artículos sobre distintos apartados de la historia de las teorías especial y general de la relatividad, vuelvo al tema en forma de libro, pero desde una perspectiva mucho más amplia y completa, que no se restringe a las teorías de la relatividad, pretendiendo abarcar toda la obra de Einstein, al igual que su biografía, entendida de la manera más amplia posible.¹ En todos esos años, he aprendido bastante, consecuencia no sólo de mis propios estudios sino de que la bibliografía sobre Einstein ha crecido de manera sustancial, estando además disponibles en la actualidad materiales ausentes en la década de 1980 (mención especial se debe al proyecto, en marcha, de la publicación, a cargo de Princeton University Press, de los *Collected Papers of Albert Einstein*, de los que hasta la fecha, 2015, han aparecido catorce volúmenes, cubriendo el periodo que va del nacimiento de Einstein hasta mayo de 1925).²

Las teorías especial y general de la relatividad ya no son el único foco de este libro, frente al de 1983. Me ocupo también de los trabajos de Einstein en física cuántica, campo del que fue uno de sus fundadores, al igual de los que llevó a cabo después de crear la teoría de la relatividad general, realizados en la parte de su vida científica menos llamativa. Y todo engranado en su biografía, contemplada no sólo en el ámbito individual, sino en el contexto general del mundo en el que vivió, un mundo en el que tuvieron lugar dos guerras mundiales.

Como sucede en cualquier cambio profundo, para comprenderlo es preciso conocer lo que había antes. En el caso de la física que produjo Albert Einstein, para entenderla realmente es imprescindible poseer algunas ideas de la física anterior a él, de la denominada «física clásica», de sus contenidos y de los problemas que surgieron en ella a finales del siglo XIX. Los dos primeros capítulos ofrecen un resumen de los dos pilares fundamentales de esa física clásica, la dinámica de Isaac Newton y la electrodinámica de James Clerk Maxwell. Ambas son absolutamente esenciales para comprender la génesis de la teoría de la relatividad especial, que modificó radicalmente conceptos, como los de espacio y tiempo absolutos, sobre los que asentó Newton su dinámica. Por lo que se refiere a la teoría de la relatividad general, no es posible entender su origen al margen de la teoría de la relatividad especial y de la teoría newtoniana de la gravitación universal. Y con respecto a la física cuántica, surgió como respuesta a agudos problemas que plagaban toda la física clásica, en especial la teoría electromagnética.

Sucede, además, que el presente año, 2015, constituye un magnífico momento para publicar este libro, ya que el 25 de noviembre se cumplen cien años de la presentación definitiva de la teoría de la relatividad general, para algunos —entre los que me encuentro—, la construcción teórica más original de toda la historia de la ciencia.

Si todo autor de un libro, al menos la gran mayoría de ellos, es deudor de numerosos apoyos con los cuales, y sobre los cuales, construyó su obra, mucho más sucede en el caso de un texto cuya historia temporal es tan dilatada como la de éste. Quiero recordar y

agradecer la ayuda que me han prestado, con sus enseñanzas, conversaciones, trabajos y ejemplos, Paul Forman, Thomas Glick, Peter Havas (que desgraciadamente ya no se encuentra entre nosotros), József Illy, Lewis Pyenson, John Stachel y Jürgen Renn. A mi querido amigo Juan Fernández Santarén, le agradezco su ayuda con las ilustraciones (desgraciadamente, en agosto, cuando este libro ya estaba componiéndose, Juan falleció inesperadamente); a mi editora Carmen Esteban por su, como siempre, magnífica disposición y paciencia; a la Fundación BBVA y a su director, Rafael Pardo, por acoger con tanto cariño la idea de este libro, ayudando generosamente en su edición. Y, muy por encima de todos, a mi esposa y compañera de ya casi una vida, Ana, que junto a mis hijas, Mireya y Amaya, me han alegrado y alegran la vida, haciéndome pensar que merece la pena vivirla.

ÍNDICE

1. LA «FÍSICA CLÁSICA» (I): LA DINÁMICA DE NEWTON.....	2
Fuerzas de acción a distancia.....	6
Espacio y tiempo absolutos.....	7
Sistemas de referencias inerciales y transformación de Galileo.....	9
Equivalencia de la masa inercial y la masa gravitacional.....	11
2. LA «FÍSICA CLÁSICA» (II): LA ELECTRODINÁMICA DE MAXWELL.....	14
Recepción de la teoría electromagnética de Maxwell.....	20
3. LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA.....	24
La aberración estelar y el «coeficiente de arrastre» de Fresnel.....	25
El experimento de Michelson y Morley.....	29
Otros problemas para la física clásica: rayos X y radiactividad.....	34
Problemas «atómicos»: estructura atómica, espectroscopia y radiación de un cuerpo negro.....	37
4. HENDRIK A. LORENTZ.....	44
La teoría del electrón.....	46
Las transformaciones de Lorentz (1892).....	50
Contracción de longitudes: Fitzgerald y Lorentz.....	55
Las transformaciones de Lorentz (1895).....	60
Las transformaciones de Lorentz (1904).....	62
5. LARMOR Y POINCARÉ.....	68
Woldemar Voigt.....	69
Joseph Larmor.....	70
Henri Poincaré, un matemático polifacético.....	72
6. ALBERT EINSTEIN (1879-1905).....	80
La familia Einstein y la industria electrotécnica.....	83
De Múnich a Zúrich, Vía Pavía.....	85
Mileva Maric.....	93
Lieserl, la hija perdida de Maric y Einstein.....	98
Berna: experto de tercera clase en la Oficina de la Propiedad Intelectual y nuevos amigos.....	102
Matrimonio con Mileva Maric.....	108
La física y los maestros de Einstein vistos a través de sus cartas a Maric.....	110
7. LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD.....	114
El contexto del descubrimiento: influencias sobre Einstein.....	117
Ernst Mach.....	119
David Hume.....	123

El problema fundamental para Einstein.....	125
El contenido de «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento».....	131
De «Electrodinámica de los cuerpos en movimiento» a «Teoría de la relatividad».....	139
La relatividad especial, una teoría «de principios».....	141
8. MINKOWSKI: DEL ESPACIO AL ESPACIO-TIEMPO.....	144
El sentido geométrico de Minkowski.....	146
Minkowski en Gotinga.....	147
Del espacio al espacio-tiempo.....	154
La teoría del mundo absoluto.....	158
9. LA RECEPCIÓN DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL.....	160
Reacciones en Alemania.....	161
Gran Bretaña.....	166
La respuesta a la relatividad especial en Francia y Estados Unidos.....	172
10. CONTRIBUCIONES A LA FÍSICA CUÁNTICA.....	176
Einstein y la cuantización de la radiación (1905).....	177
Einstein y el efecto fotoeléctrico.....	183
Cuantos y calores específicos.....	185
De la Oficina de Patentes de Berna a la Universidad de Zúrich.....	187
Einstein sobre la dualidad onda-corpúsculo (1909).....	188
¿Una teoría clásica para los cuantos?.....	189
El Consejo Solvay de 1911.....	192
11. EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA.....	198
El artículo del <i>Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik</i> de 1907.....	199
El valor heurístico del principio de equivalencia.....	202
12. CATEDRÁTICO EN PRAGA (1910-1912).....	204
La gravitación vuelve a escena.....	209
Max Abraham, Gunnar Nordström y la gravitación.....	214
El problema del disco que gira.....	218
Adiós a Praga.....	227
Exposición de razones para abandonar Praga.....	230
13. ZÚRICH (1912-1914): GRAVITACIÓN Y GEOMETRÍA NO EUCLIDEA.....	232
Geometría riemanniana para una teoría relativista de la gravitación.....	233
La geometría riemanniana.....	234
El <i>Entwurf</i> de Einstein y Grossmann.....	238
Problemas personales, divorcio y nuevo matrimonio.....	245
Oferta de Berlín.....	253
14. BERLÍN (1914-1918): FÍSICA Y POLÍTICA.....	256
Ciencia en Berlín, hacia 1914.....	257
Testigo y protagonista de la primera guerra mundial.....	261
Noviembre de 1915.....	268
Sobre el papel de las matemáticas en la física.....	273

Una coincidencia tramposa: Einstein, Hilbert y las ecuaciones del campo gravitacional.....	275
Karl Schwarzschild y su solución de las ecuaciones del campo gravitacional.....	282
La recepción de la relatividad general.....	285
La cosmología relativista.....	291
Más física cuántica: las transiciones atómicas.....	298
15. FAMA MUNDIAL.....	300
El eclipse de Sol de 1919 y la desviación de los rayos de luz.....	301
Ondas y radiación gravitacional.....	312
Baño de multitudes: viaje a Estados Unidos (1921).....	314
Einstein e Israel.....	317
Entre dos aguas: Einstein en un mundo político y científico dividido.....	320
Conferenciante solicitado.....	329
Helen Dukas y Caputh.....	337
Relatividad y filosofía.....	340
16. TEORÍAS DEL CAMPO UNIFICADO Y FÍSICA CUÁNTICA.....	348
Einstein, crítico de la relatividad general.....	349
Generalizaciones matemáticas en la búsqueda de una teoría del campo unificado.....	352
Las filosofías de Einstein.....	362
La atracción de las matemáticas.....	368
Nuevas contribuciones a la física cuántica: la estadística de Bose-Einstein.....	371
Crítico de la mecánica cuántica.....	374
El dios y la religión de Einstein.....	382
17. EL ÚLTIMO VIAJE: DE BERLÍN A PRINCETON.....	384
Einstein y el régimen de Hitler.....	385
Problemas en Estados Unidos.....	401
El descubrimiento de la fisión del uranio.....	407
Einstein escribe a Roosevelt.....	411
Todavía un científico productivo.....	419
Los ayudantes de Einstein en Princeton.....	420
Einstein, Podolsky y Rosen.....	423
Lentes gravitacionales.....	429
Einstein y la noción de «singularidad».....	430
Ecuaciones de movimiento en relatividad general.....	433
La leyenda se hace memoria: la muerte de Einstein.....	436
Epílogo.....	440
El «personaje del siglo XX».....	445
Notas.....	448
Bibliografía.....	462
Índice onomástico.....	480

CAPÍTULO 1

LA «FÍSICA CLÁSICA» (I): LA DINÁMICA DE NEWTON

Por «física clásica» se suele entender el conjunto de tres ramas de la física: la dinámica que Isaac Newton (1642-1727) presentó en su gran tratado de 1687, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*); la, menos general que ésta, electrodinámica que James Clerk Maxwell completó en la segunda mitad del siglo XIX, y la termodinámica.¹ Para los propósitos de este libro, sólo nos interesan las dos primeras. En este capítulo expondré los fundamentos de la construcción newtoniana.

La dinámica (o mecánica) de Newton se fundamenta en tres, utilizando la expresión que aparece en los *Principia*, «Axiomas o Leyes del movimiento». La primera, la de la inercia, la formuló Newton en su libro de la manera siguiente:²

Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado por fuerzas impresas a cambiar su estado.

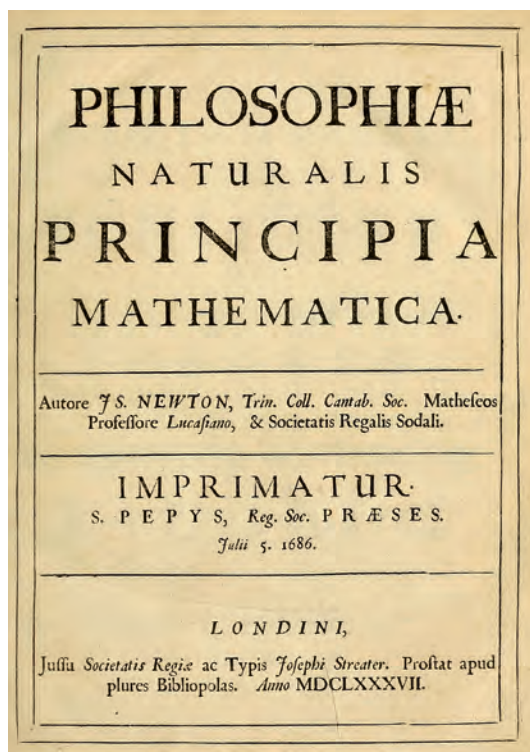
Los proyectiles perseveran en sus movimientos a no ser en cuanto son retardados por la resistencia del aire y son empujados hacia abajo por la gravedad. Una rueda, cuyas partes en cohesión continuamente se retraen de los movimientos rectilíneos, no cesa de dar vueltas sino en tanto en que el aire la frena. Los cuerpos más grandes de los cometas y de los planetas conservan por más tiempo sus movimientos, tanto de avance como de rotación, realizados en espacios menos resistentes.

De hecho, esta ley ya había sido esbozada por Galileo y formulada en toda su generalidad por René Descartes en uno de sus libros, *Les Principes de la Philosophie* (*Los principios de la filosofía*, 1644). Allí, en el apartado número 37 de la segunda parte, nos encontramos con la ley de la inercia (Descartes, 1995: 97): «La primera ley de la naturaleza: cada cosa permanece en el estado en el que está mientras nada modifique ese estado». Las dos siguientes leyes de la dinámica, ésas sí, fueron completamente originales de Newton. La segunda ley la enunció como sigue:

El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.

Si una fuerza cualquiera produce un movimiento dado, doblada producirá el doble y triplicada el triple, tanto si se aplica de una sola vez como si se aplica gradual y sucesivamente. Este movimiento (dado que se determina siempre en la misma dirección que la fuerza motriz), si el cuerpo se movía antes, o bien se añade sumándose a él, o se resta si es contrario, o se añade oblicuamente, si es oblicuo, y se compone con él según ambas determinaciones.

Si hay una ley fundamental para estudiar el movimiento, es ésta, que se refiere a los efectos de la aplicación de una fuerza y que habitualmente se enuncia como «Fuerza igual a masa por aceleración»: $F = m \cdot a$.³ (Aunque escrita tal como lo he hecho, se refiere a una sola dimensión, la fuerza es una magnitud con dirección, magnitud *vectorial*, o *vector*: el cambio de movimiento ocurre según la línea recta a lo largo de la cual se imprime la fuerza, o suma vectorial de fuerzas, en cuestión.)



No he dicho nada acerca de qué es la «masa». Pues bien, no es sino un parámetro que indica la resistencia de un cuerpo a abandonar el estado de reposo o un movimiento inercial.

La segunda ley proporciona el instrumento básico para determinar cómo se mueve un cuerpo; claro que para ello es imprescindible conocer la forma de la fuerza, algo que el sistema no proporciona, debiéndose definir de manera independiente: una vez que se conoce, el problema se reduce a integrar la ecuación para encontrar la trayectoria, esto es, «la posición en función del tiempo».

En cuanto a la tercera ley, el anunciado newtoniano es el siguiente:

Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria. O sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas.

El que empuja o atrae a otro es empujado o atraído por el otro en la misma medida. Si alguien oprime una piedra con el dedo, también su dedo es oprimido por la piedra. Si un caballo arrastra una piedra atada con una soga, el caballo es retroarrastrado (por así decirlo) igualmente, pues la soga estirada en ambas direcciones y con el propio impulso de contraerse tirará del caballo hacia la piedra y de la piedra hacia el caballo y tanto se opondrá al progreso de uno cuanto ayude al avance del otro. Si un cuerpo cualquiera golpeando sobre otro cuerpo cambiara el movimiento de éste de algún modo con su propia fuerza, él mismo a la vez sufrirá idéntico cambio en su propio movimiento y en sentido contrario por la fuerza del otro cuerpo (por la igualdad de la presión mutua). A tales acciones son iguales los cambios de movimientos, no de velocidades, y siempre que se trate de cuerpos no fijados por otra parte. Igualmente los cambios de velocidad en sentido contrario, puesto que los movimientos cambian igualmente, son inversamente proporcionales a los cuerpos. Se cumple esta ley también para las atracciones como se comprobará en un Escolio próximo.

Sin esta ley, la de la *acción y reacción*, no podría hablarse de *gravitación universal*, esto es, que el Sol atrae a, por ejemplo, la Tierra, pero que, recíprocamente, ésta también atrae al Sol.

Los *Principia* contienen otra joya: la ley de la gravitación universal, una ley que permitió entender como un mismo fenómeno los movimientos celestes y la caída de los cuerpos en la superficie terrestre (fue la primera Gran Unificación de la física). Se enunciaba esta ley en la

parte tercera –o Libro III, significativamente titulado «El Sistema del Mundo»– de los *Principia*, concretamente en la «Proposición VII. Teorema VII» y en sus dos Corolarios:

PROPOSICIÓN VII. TEOREMA VII.

La gravedad ocurre en todos los cuerpos y es proporcional a la cantidad de materia existente en cada uno.

Hemos probado ya que todos los planetas gravitan entre sí y también que la gravedad hacia cada uno de ellos, considerado individualmente, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde cada lugar al centro del planeta. De lo cual se sigue que (por la Proposición LXIX del Libro I y sus Corolarios) la gravedad hacia todos es proporcional a la materia existente en ellos.

Por lo demás, dado que todas las partes de un planeta A gravitan hacia otro planeta B, la gravedad de una parte cualquiera es a la gravedad del todo como la materia de la parte a la materia del todo y para que en toda acción haya igual reacción (por la tercera Ley del movimiento), el planeta B gravitará a la inversa hacia todas las partes del planeta A y su gravedad hacia cada parte será su gravedad hacia el todo como la materia de la parte a la materia del todo Q.E.D.

COROLARIO 1. Por consiguiente, la gravedad hacia todo el planeta surge y se compone de la gravedad hacia cada parte. De lo cual tenemos ejemplos en las atracciones magnéticas y eléctricas. Pues la atracción entera hacia el todo surge de las atracciones hacia cada parte. Para la gravedad esto se entenderá imaginando que muchos planetas menores se reúnen en un globo y constituyen uno mayor. Pues la fuerza del todo deberá originarse de las fuerzas de las partes componentes. Si alguien objeta que todos los cuerpos que nos rodean deberían gravitar entre sí según esta ley, mientras que no percibimos en absoluto una gravedad de este estilo, debo responder que la gravedad en estos cuerpos al ser respecto a la gravedad de toda la Tierra como son estos cuerpos al cuerpo de la Tierra entera, es bastante menor que la que es observable.

COROLARIO 2. La gravitación hacia cada partícula igual de un cuerpo es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de los lugares a las partículas. Es evidente por el Corolario 3 de la Proposición LXXXIV del Libro I.

Expresada de forma analítica, esta ley, una de las grandes leyes de la ciencia, toma la forma de:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

donde F representa la fuerza gravitacional que atrae a dos cuerpos de masas m y M separados por una distancia r , y G es una constante, la constante de gravitación universal.

En realidad, esta expresión es una definición, la de la fuerza gravitacional; esto es, tomada por sí sola no sirve de nada y es preciso insertarla en el término de la izquierda de



Isaac Newton a la edad de 83 años. Artista desconocido.

la segunda ley del movimiento, $F = m \cdot a$. Una vez hecho esto y especificadas las condiciones del fenómeno que se quiere estudiar, hay que integrar la ecuación diferencial para obtener la trayectoria en función del tiempo, $x = x(t)$. En el caso, por ejemplo, de dos cuerpos (el Sol y un planeta), equivale a una fuerza central y se resuelve con cierta facilidad, obteniendo las tres leyes que Johannes Kepler había formulado para el movimiento de los planetas del Sistema Solar.⁴ Se resolvía así el gran problema de relacionar las órbitas elípticas con una fuerza gravitacional proporcional al inverso del cuadrado de la distancia.

FUERZAS DE ACCIÓN A DISTANCIA

Al mostrar su eficacia en el gran escenario que es el Sistema Solar (y, por extensión, en el conjunto del Universo, dominado por la gravitación), el concepto de *fuerza* pasó a ocupar un lugar central, conceptual y operativamente, en las ciencias físicas. Las «fuerzas» son los «instrumentos» que hacen que los cuerpos sepan de la existencia de otros. Y esto es muy importante: no olvidemos que el objeto primordial de la física es determinar cómo cambian los objetos que observamos. Pero la expresión «cómo cambia» algo, quiere decir «cómo cambia en el tiempo», «cómo varía el lugar que ocupa, su posición o su estado a lo largo del tiempo», cómo se *mueve*. Ahora bien, no tendría sentido hablar de «cambios en el tiempo» si sólo existiese un cuerpo en el Universo, porque ¿cómo podríamos identificar entonces que ese cuerpo cambia de posición?, ¿con respecto a qué? Aunque, por supuesto, tiene sentido plantearse el problema de cómo se mueve un cuerpo libre, o un conjunto de cuerpos (libres) que no interaccionan entre sí, la física más interesante es la que trata del movimiento de conjuntos de cuerpos que *interaccionan*, pero hablar con sentido de *interacciones* es tanto como hacerlo de *fuerzas*, que es cómo se afectan los cuerpos entre sí.

Tres han sido los conceptos creados para explicar la interacción (fuerza) entre cuerpos; de hecho, más que *creados*, podríamos decir, los tres conceptos *imaginables*, puesto que resulta difícil pensar en otras posibilidades. El primero es de *interacción por contacto*, esto es, mediante el choque de dos cuerpos, que de esta forma se ven, lógicamente, afectados en sus historias posteriores. El segundo es el de *interacción a través de un medio*, sea este medio del tipo que sea, los vórtices cartesianos o el éter-campo electromagnético. Finalmente, está la *interacción a distancia*, la forma de interacción más enigmática porque no necesita de ningún medio en

el que «se apoye», a través del cual se propague la interacción. Bien podríamos hablar en este caso de *correlaciones* en lugar de *interacciones*, pero independientemente de cuál sea el término empleado, queda lo misterioso de él.

Pues bien, las fuerzas que intervienen en la dinámica de Newton, las F que hay que insertar en la ecuación $F = m \cdot a$, son las misteriosas fuerzas de acción a distancia.

He dicho «misteriosas» acciones a distancia, porque nuestras mentes no pueden entender cómo pueden existir fuerzas, interacciones, que no se propagan a través de un medio, y menos aún, como sucede en el caso de la mecánica de Newton, que lo hacen instantáneamente. El propio Isaac Newton, el responsable de su introducción en la física, se refirió a esta característica de las acciones a distancia en una carta que dirigió el 25 de febrero de 1692 a Richard Bentley, a quien se debe que Newton autorizara la publicación de una segunda edición de los *Principia* (1713), de la manera siguiente:⁵ «Es inconcebible que la materia bruta inanimada opere y afecte (sin la mediación de otra cosa que no sea material) sobre otra materia sin contacto mutuo, como debe ser si la gravitación en el sentido de Epicuro es esencial e inherente a ella. Y ésta es la razón por la que deseo que no me adscriba la gravedad innata. Que la gravedad sea innata, inherente y esencial a la materia de forma que un cuerpo pueda actuar a distancia a través de un vacío sin la mediación de otra cosa con la cual su acción o fuerza puede ser transmitida de [un lugar] a otro, es para mí algo tan absurdo que no creo que pueda caer en ella ninguna persona con facultades competentes de pensamiento en asuntos filosóficos. La gravedad debe ser producida por un agente que actúe constantemente según ciertas leyes, pero si este agente es material o inmaterial es una cuestión que he dejado a la consideración de mis lectores». En otras palabras, Newton no creía realmente en las acciones a distancia, pero era lo suficientemente buen científico como para renunciar a un instrumento conceptual que mostraba su valor predictivo o, lo que es lo mismo, científico. Otra cosa es lo que él pensase, sin poderlo demostrar.

Mientras que la teoría de la relatividad especial es, en principio, compatible con fuerzas de acción a distancia (aunque no instantáneas), la relatividad general, al igual que la electrodinámica de Maxwell, son teorías de campos, esto es, construcciones en las que las fuerzas se transmiten a través de un medio, necesitando, por consiguiente, de funciones definidas en cada uno de los puntos de la región en que actúan esas fuerzas-interacciones de que se ocupan.

ESPACIO Y TIEMPO ABSOLUTOS

No podemos existir ni pensar fuera del espacio y del tiempo. Ambas entidades son ontológica y epistemológicamente necesarias para todo lo que se refiere a nuestra existencia y, por supuesto, para las teorías científicas que construimos: tenemos que situar los objetos que constituyen nuestras teorías en el espacio y ver –ya lo dije– cómo se mueven en el tiempo. Ahora bien, el que espacio y tiempo sean entidades imprescindibles no significa que esté claro qué son. La cinemática (la parte de la dinámica que estudia el movimiento, prescindiendo de las fuerzas que lo

producen) que construyó Newton se basaba en los conceptos de tiempo y espacio, pero considerados éstos *magnitudes absolutas*, cuyo valor era independiente de cualquier consideración relativa al observador. Veamos cómo las introdujo en los *Principia* (hacen su aparición, como es natural, muy al principio, en el «Escolio» que sigue a la «Definición VIII», una de las que abre el libro):

Nos ha parecido oportuno explicar hasta aquí los términos menos conocidos y el sentido en que se han de tomar en el futuro. En cuanto al tiempo, espacio, lugar y movimiento son de sobra conocidos para todos. Hay que señalar, sin embargo, que el vulgo no concibe estas magnitudes si no es con respecto a lo sensible. De ello se originan ciertos prejuicios para cuya destrucción conviene que las distingamos en absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y vulgares.

- I. El tiempo absoluto, verdadero y matemático en sí y por su naturaleza y sin relación con algo externo, fluye uniformemente y, por otro nombre, se llama duración; el relativo, aparente y vulgar, es una medida sensible y externa de cualquier duración, mediante el movimiento (sea la medida exacta o desigual) y de la que el vulgo usa en lugar del verdadero espacio: así, la hora, el día, el mes, el año.
- II. El espacio absoluto, por su naturaleza y sin relación con cualquier cosa externa, siempre permanece igual e inmóvil; el relativo es cualquier cantidad o dimensión variable de este espacio, que se define por nuestros sentidos según su situación respecto a los cuerpos, espacio que el vulgo toma por el espacio inmóvil: así, una extensión espacial subterránea, aérea o celeste definida por su situación relativa a la Tierra. El espacio absoluto y el relativo son el mismo en especie y en magnitud, pero no permanecen siempre el mismo numéricamente. Pues si la Tierra, por ejemplo, se mueve, el espacio de nuestra atmósfera que relativamente y respecto a la Tierra siempre permanece el mismo, ahora será una parte del espacio absoluto por la que pasa el aire, después otra parte y así, desde un punto de vista absoluto, siempre cambiará.

A pesar de la rotundidad de manifestaciones como las anteriores y de su aparente claridad, existían problemas para determinar en qué consistía realmente el espacio absoluto o, lo que es lo mismo, cómo determinar un movimiento absoluto. Y Newton fue consciente de ello: «es posible –escribía en la misma “Definición VIII”– que, en realidad, no exista ningún cuerpo que esté en total reposo, al que referir lugar y movimiento». Y a continuación añadía:

Se distinguen el reposo y el movimiento absolutos y relativos entre sí por sus propiedades, causas y efectos. Es propiedad del reposo que los cuerpos verdaderamente quietos están en reposo entre sí. Por tanto, al ser posible que un cuerpo cualquiera en la región de las estrellas fijas, o más lejos, permanezca en reposo absoluto y no se pueda saber por las situaciones respectivas de los cuerpos entre sí en nuestras cercanías si alguno de ellos conserva su posición constante respecto al cuerpo lejano, por ende no se puede definir el reposo verdadero por las posiciones relativas de estos cuerpos.

«Se distinguen el reposo y movimiento absolutos y relativos entre sí –decía–, por sus propiedades, causas y efectos.» Y precisamente por uno de esos efectos, pensaba Newton que podía, al menos en una clase de situaciones, identificar el movimiento absoluto. Se trata de su famoso experimento del cubo.

Veremos en su momento que en el siglo XIX Ernst Mach volvió a estudiar este experimento (real, puesto que como él mismo confesaba, Newton lo había llevado a cabo, se supone que en sus habitaciones del Trinity College de Cambridge), dando origen a lo que se conoce como «principio de Mach», que tiene que ver con la teoría de la relatividad general.

SISTEMAS DE REFERENCIAS INERCIALES Y TRANSFORMACIÓN DE GALILEO

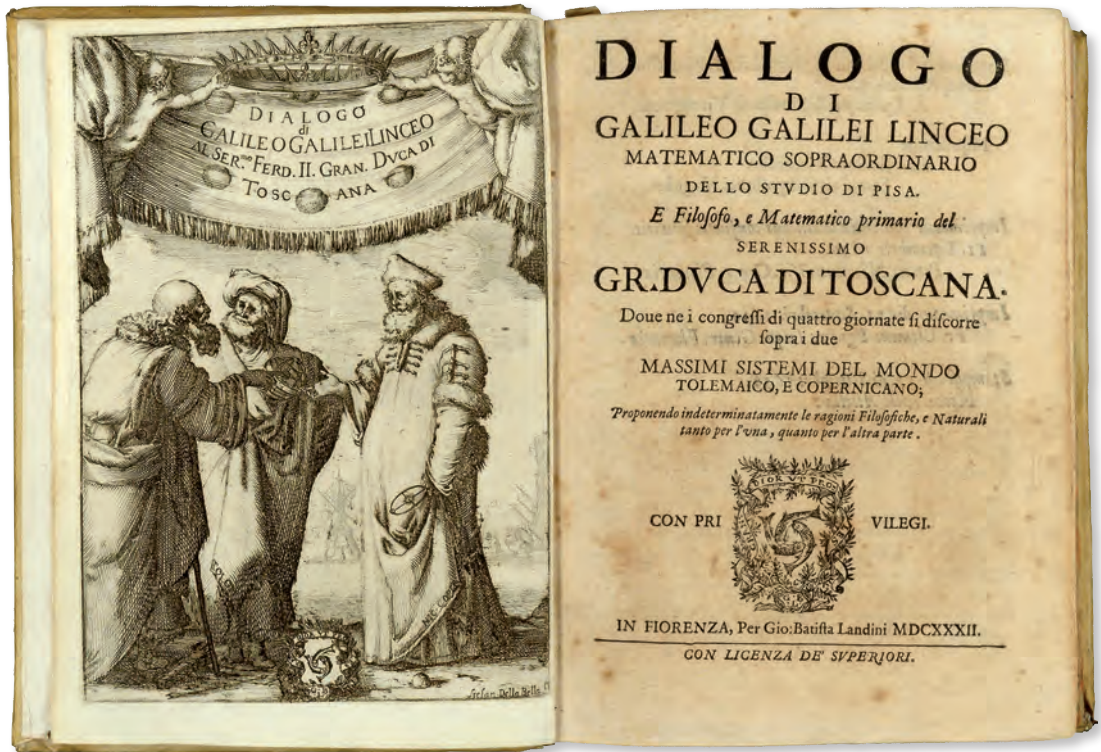
Aunque no parecía que fuese sencillo ni claro determinar puntos de referencia en el espacio absoluto que Newton asumía, ello no significaba que no pudiesen utilizarse, y con buen provecho, sistemas de referencia particulares. A la cabeza de ellos, los denominados «sistemas de referencia inerciales». Veamos en qué consisten, suponiendo, como parece, que el espacio tiene tres dimensiones (alto, ancho y largo).

Los fenómenos físicos se producen en un instante y lugar determinados y son contemplados por observadores que se encuentran en una situación concreta. Con respecto al sistema geométrico (espacio) que se toma como *marco de referencia* –para Newton, el verdadero era el «espacio absoluto»–, esos observadores pueden: 1) no moverse (*reposo*); 2) moverse con velocidad constante (*movimiento uniforme*), o 3) moverse con velocidad variable (*movimiento acelerado*)... siempre que sea posible determinar esas situaciones (movimientos uniforme o acelerado), algo que, en realidad, se supone más que se demuestra.

Obviamente, los marcos de referencia constituyen elementos esenciales cuando se trata de describir el movimiento de los cuerpos. En sus estudios, durante el siglo XVII, Galileo prestó especial atención a este punto. Una de las situaciones que consideró en su famoso *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicano* (*Diálogo sobre los dos sistemas máximos del mundo, el ptolemaico y el copernicano*), de 1632, es la de un observador situado en la cubierta de un barco presenciando la caída de un cuerpo desde la cofa. Él vería la caída como una trayectoria rectilínea perpendicular, mientras que otro colocado fuera del barco, a una cierta distancia, observaría que el movimiento del cuerpo seguiría



Galileo. Retrato de Domenico Tintoretto.



Portada del *Dialogo* de Galileo.

una trayectoria que se alejaba continuamente de la perpendicular. Un mismo fenómeno (la caída del cuerpo) descrito de dos maneras diferentes, según el marco de referencia considerado.

Es muy importante señalar que los marcos, o sistemas, de referencia que Galileo consideraba implicaban relaciones entre movimientos uniformes o situaciones de reposo. Son los denominados *sistemas de referencia inerciales*, mientras que los acelerados son *no inerciales*.

Para Galileo, al igual que más tarde para Newton en su dinámica, nada cambiaba desde el punto de vista de las leyes de la física del movimiento si se tomaban como marcos de referencia sistemas de referencia inerciales diferentes. Ahora bien, esto no quiere decir que la introducción de un segundo marco de referencia no complicase la explicación. Consideremos, por ejemplo, una partícula P, que se mueve con velocidad v en el sistema de referencia A y que, a su vez, éste se mueve con velocidad u respecto a un sistema de referencia B. Según Galileo y Newton (y también de acuerdo a nuestra intuición), la velocidad de P con respecto a B será la suma de v y u , esto es $v + u$.

El que las leyes del movimiento deben ser las mismas, independientemente de cuál sea el sistema de referencia inercial que se esté utilizando, constituye un rasgo fundamental de la mecánica newtoniana, al que se suele denominar «*Principio de relatividad de Galileo*». En el caso de dos sistemas de referencia inerciales, con uno de ellos moviéndose con velocidad v con respecto al otro a lo largo de la dirección del eje de las x , las ecuaciones que relacionan las coordenadas de ambos sistemas son las denominadas *transformaciones de Galileo*:

$$\begin{aligned}x' &= x - v \cdot t \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

Sería a principios del siglo XX, cuando la física relativista de Einstein modificaría radicalmente el estatus de estas transformaciones. Como veremos en su momento, la gran novedad de la teoría especial de la relatividad es que en ella espacio y tiempo son relativos, es decir, que conceptos como simultaneidad y longitud no tienen una significación absoluta: el valor de la medida de tiempos y longitudes depende del sistema de referencia en el que se efectúen las medidas.

EQUIVALENCIA DE LA MASA INERCIAL Y LA MASA GRAVITACIONAL

Otra importante característica de la dinámica newtoniana, una que sería esencial para Einstein en la construcción de la teoría de la relatividad general, es la equivalencia entre «masa inercial» y «masa gravitacional».

La conjunción de la segunda ley con la ley del inverso del cuadrado de la distancia permitió entender un hecho observado por Galileo (y por otros anteriormente): que todos los cuerpos caen juntos a pesar de que sus pesos sean diferentes (el «peso», P , se define como $P = m \cdot g$, donde g es la aceleración de la gravedad; evidentemente el peso es una magnitud variable en función de la latitud y de la altura). La cuestión es importante porque involucra al concepto de masa.

En principio, cabría esperar que en la ley $F = m \cdot a$, la masa no fuese idéntica a la masa que aparece en la ley del inverso del cuadrado de la distancia, ya que, como apunté, en el primer caso se trata de una magnitud relacionada con la resistencia de un cuerpo a abandonar su movimiento inercial (masa inercial, m_i), mientras que en el segundo caso es una magnitud que representa la reacción ante la fuerza gravitacional (masa gravitacional, m_g). Ahora bien, si suponemos que ambas son idénticas, podemos escribir para el movimiento de un cuerpo de masa m que cae hacia la Tierra (de masa M) debido a la atracción gravitacional

$$m \cdot a = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

y como m aparece en los dos lados de la ecuación, se puede eliminarla y obtener

$$a = \frac{G \cdot M}{r^2}$$

esto es, la aceleración con la que cae el cuerpo no depende de su masa, únicamente de la masa de la Tierra, con lo que recuperamos («deducimos») la observación de Galileo.

EINSTEIN SOBRE NEWTON

«Hace doscientos años fallecía Isaac Newton. Ahora nos sentimos obligados a recordar a este brillante genio que determinó el curso del pensamiento y la investigación en Occidente como nadie hasta entonces ni nadie hasta ahora. No sólo fue genial como inventor de ciertos métodos clave, sino que poseyó una maestría única sobre el material empírico conocido en sus días y también fue dueño de una maravillosa inventiva en lo que se refiere a métodos de demostración matemáticos y físicos [...]. Para comprenderlo de manera clara, hemos de tener en cuenta que antes de Newton no existía un sistema completo de causalidad física, capaz de representar cualquiera de las características profundas del mundo empírico [...].

Galileo ya había avanzado brillantemente hacia el conocimiento de las leyes del movimiento; había descubierto las leyes de inercia y la ley de caída libre de los cuerpos en el campo gravitatorio de la Tierra [...]. Es posible que hoy nos parezca muy pequeña la distancia que separa los descubrimientos de Galileo de las leyes del movimiento de Newton, pero ha de tenerse en cuenta que las dos proposiciones anteriores están formuladas de manera tal que se refieren al movimiento como un todo, en tanto que las leyes del movimiento de Newton proporcionan una respuesta a la siguiente pregunta: ¿cómo cambia, en un tiempo infinitamente breve, el estado dinámico de un punto

material bajo la influencia de una fuerza externa? Sólo al considerar lo que ocurría durante un tiempo infinitamente breve (ley diferencial), pudo Newton llegar a la formulación de leyes válidas para cualquier tipo de movimiento. Tomó el concepto de fuerza de la estática, que ya había alcanzado un nivel muy alto de desarrollo. Estuvo en condiciones de conectar fuerza y aceleración sólo al introducir un nuevo concepto de masa que, por extraño que parezca, se basaba en una definición ilusoria. Hoy estamos tan habituados a formar conceptos que corresponden a cocientes diferenciales que apenas sí somos capaces de llegar a comprender qué enorme poder de abstracción era necesario para obtener la ley diferencial general del movimiento mediante un doble proceso al límite, en cuyo transcurso debía inventarse por añadidura el concepto de masa [...].

Sobre la base que brevemente hemos esbozado aquí, Newton logró explicar los movimientos de los planetas, lunas y cometas hasta en sus menores detalles, así como las mareas y el movimiento de la Tierra que origina la precesión de los equinoccios, una proeza deductiva de extraordinaria magnificencia. Tuvo que haber sido muy impresionante descubrir que la causa del movimiento de los cuerpos celestes es idéntica a la gravedad, con la que todos estamos tan familiarizados en la vida cotidiana.

Pero la importancia de la obra de Newton no se reduce a la creación de una base útil y lógicamente satisfactoria de la mecánica. Hasta finales del siglo XIX, esos descubrimientos formaron parte del programa de todo investigador en el campo de la física teórica. Todos los fenómenos físicos debían ser referidos a masas sujetas a las leyes del movimiento descubiertas por Newton. La ley de fuerza debía ser, simplemente, extendida y adaptada al tipo de fenómeno que se fuera a estudiar [...].

Considerada un programa de todo el conjunto de la física teórica, la teoría del movimiento de Newton recibió su primera dificultad de la teoría de la electricidad de Maxwell. Se había llegado a comprender con claridad que las interacciones eléctricas y magnéticas entre los cuerpos no eran debidas a fuerzas que operaran de modo instantáneo y a distancia, sino a procesos que se propagan a través del espacio a una velocidad finita [...]. El desarrollo de la teoría del campo electromagnético –una vez que fueron abandonadas las hipótesis de Newton de las fuerzas actuando a distancia– condujo también al intento de explicar las leyes newtonianas del movimiento a través del electromagnetismo o bien reemplazarlas por otras más precisas, basadas en la teoría de campos [...].

La teoría de Maxwell y Lorentz condujo de forma inevitable a la teoría de la relatividad

restringida que, al abandonar la noción de simultaneidad absoluta, excluía la existencia de fuerzas que actúan instantáneamente a distancia. Se deduce de esta teoría que la masa no es una magnitud constante, sino que depende de (en rigor es equivalente a) la cantidad de energía. También demostró esta teoría que las leyes del movimiento de Newton sólo eran válidas para velocidades pequeñas; en su lugar, estableció una nueva ley del movimiento en la cual la velocidad de la luz en el vacío aparece como velocidad límite.»

Albert Einstein (1927 a), «La mecánica de Newton y su influencia en el desarrollo de la física teórica».

En sus *Notas autobiográficas*, Einstein también se ocupó –como no podía ser de otra forma– de las aportaciones de Newton. Allí, tras exponer cómo la física newtoniana había sido superada, escribió: «Basta ya. Newton, perdóname: tú encontraste el único camino posible en tu época para un hombre de máxima capacidad intelectual y de creación. Los conceptos que tú creaste siguen rigiendo nuestro pensamiento físico, aunque ahora sabemos que, si aspiramos a una comprensión más profunda, hay que sustituirlos por otros más alejados de la esfera de la experiencia inmediata» (Einstein, 1949 a; Sánchez Ron, ed., 2005: 55).

CAPÍTULO 2

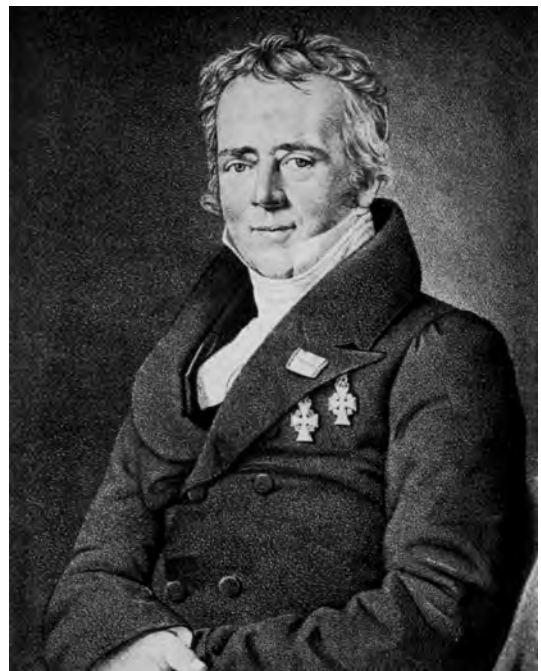
LA «FÍSICA CLÁSICA» (II):
LA ELECTRODINÁMICA
DE MAXWELL

Entre los fenómenos físicos que los seres humanos identificaron antes, se encuentran la electricidad y el magnetismo. Éste, el magnetismo, fue el primero del que tuvo conciencia y así fue por una circunstancia especial: se manifiesta explícitamente en un mineral que se encuentra en la naturaleza, la magnetita, una mezcla de óxidos de hierro. Parece que el primer lugar occidental donde se halló y fue reconocida su propiedad de atraer al hierro fue en una región de Asia Menor llamada Magnesia, de donde tomaría el nombre de *magnetismo* y el mineral, magnetita más tarde, *pedra imán*. Tales de Mileto (c. 624-546 a.C.) se refirió a ella destacando que comunicaba la capacidad de atraer al hierro mediante el contacto. Seguramente encontrarse en Jonia, una región de Asia Menor, ayudó a Tales a descubrir ese fenómeno.

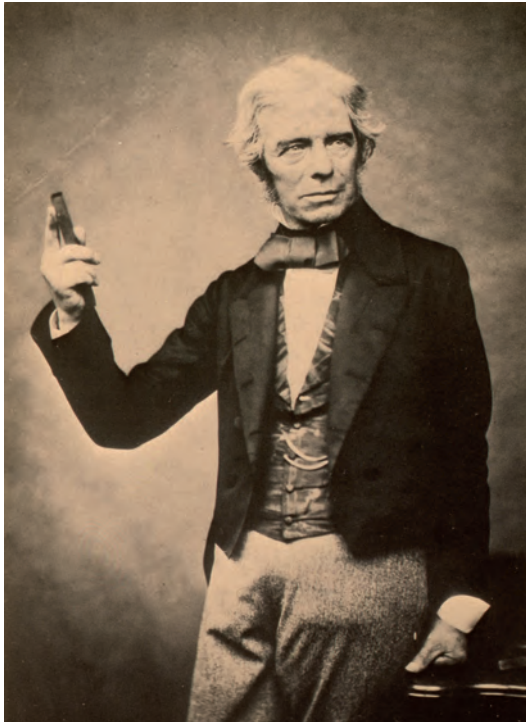
Diferente fue el descubrimiento de la electricidad, resultado de una acción natural: la que producen los rayos de las tormentas o cuando se fricciona con piezas de lana o piel, ámbar (*electrike*), una resina fósil del *Pinus succinifera*. Aunque la electricidad no existe libre en la naturaleza de la misma forma que el magnetismo –se crea y se consume en la producción de una chispa–, sus efectos eran lo suficientemente evidentes como para no poder ignorarlos.

Durante prácticamente dos milenios, electricidad y magnetismo caminaron separados, como si fueran dos fenómenos diferentes. Semejante situación sólo comenzó a cambiar en 1820, cuando un catedrático de Física de la Universidad de Copenhague y secretario de la Real Academia de Ciencias danesa, Hans Christian Oersted (1777-1851), hizo un sencillo experimento. Sencillo, pero de grandes consecuencias. Oersted colocó un hilo metálico (esto es, un conductor) horizontalmente, en la dirección del meridiano magnético, justo por encima de una aguja magnética. Mientras no circulaba ninguna corriente por el hilo, éste y la aguja continuaban estando paralelos, pero cuando se conectaba al hilo, una de las baterías que Alessandro Volta había ideado en 1800 la aguja se desviaba, más cuanto mayor fuese la intensidad de la corriente. Y, cuando se cambiaba la dirección de la corriente (cambiando el orden de la conexión a los polos de la batería), la aguja se movía en dirección contraria. Magnetismo y electricidad, hasta entonces distintos e independientes, se revelaron sensibles a la proximidad.

En 1831, Michael Faraday (1791-1867), un aprendiz de encuadernador que ascendió de ayudante (1813) de Humphry Davy en la Royal Institution londinense a *Fullerian professor* de Química en ese mismo centro



Hans Christian Oersted. Óleo pintado por Christian Albrecht Jensen, 1832-1833.



Michael Faraday.

magnetismo, se necesitaba otro tipo de científico, uno que dominase las habilidades matemáticas necesarias para construir una teoría de la electricidad y el magnetismo. No hubo que esperar mucho ni alejarse de Inglaterra para que tal personaje apareciese: el escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) fue capaz de unir todos los cabos sueltos que proliferaban en la electricidad y el magnetismo e, introduciendo ideas nuevas, formuló una teoría completa del campo electromagnético.

Maxwell, uno de los físicos más notables de toda la historia, disfrutó de una cuidada educación en Edimburgo y en Cambridge, donde siguió el exigente, especialmente desde el punto de vista matemático, *Mathematical Tripos*, el sistema de exámenes que entonces se utilizaba allí, y ocupó cátedras en Aberdeen, Londres (King's College) y Cambridge, donde fue el primer director del luego famoso Laboratorio Cavendish, además de catedrático de Física experimental. Su capacidad matemática le permitió encontrar soluciones a problemas concretos, como el de la estructura de los anillos de Saturno, además de una formulación unitaria de los fenómenos electromagnéticos, y ser uno de los fundadores de la física estadística.

Como reconoció en su gran tratado electromagnético, *Treatise on Electricity and Magnetism* (*Un tratado sobre Electricidad y Magnetismo*; 1873), Maxwell admiró profundamente a Faraday (Maxwell, 1873, 1954: ix):

Según avanzaba en el estudio de Faraday, me di cuenta de que su método de concebir los fenómenos era también matemático, aunque no viniese presentado en la forma convencional

(1833), demostró el efecto recíproco: que el magnetismo estaba relacionado con la electricidad. Expresado en los términos más sencillos posibles (y, por tanto, omitiendo los pasos que lo llevaron a este resultado), lo que hizo Faraday fue demostrar que cuando se introducía y sacaba un cable entre los polos de un imán —lo que significaba que el cable era sometido a un campo magnético variable—, se creaba una corriente eléctrica en ese cable.

La intuición natural y habilidad experimental de Faraday hicieron avanzar sustancialmente el estudio de los fenómenos electromagnéticos: en lo esencial, Faraday creó el concepto *campo electromagnético*, con el que expresaba que los efectos de la electricidad y el magnetismo producidos por cargas o imanes penetraban en el espacio. Pero, para poder desarrollar una teoría del electro-

de símbolos matemáticos. También encontré que estos métodos podían ser expresados en las formas matemáticas ordinarias y así ser comparados con los realmente matemáticos.

Por ejemplo, Faraday vio, con el ojo de su mente, líneas de fuerzas atravesando todo el espacio, allí donde los matemáticos veían centros de fuerza atrayendo a distancia: Faraday vio un medio donde ellos sólo veían distancia: Faraday buscó el asiento de los fenómenos en acciones reales que se propagaban por el medio.

Provisto de todo este bagaje, comenzó su ataque al problema de producir una teoría para los fenómenos eléctricos y magnéticos, tarea en la que destacan dos trabajos, escritos mientras era catedrático de Filosofía de la Naturaleza en el King's College de Londres: «Sobre las líneas de fuerza de Faraday» y «Sobre las líneas físicas de fuerza» (Maxwell, 1856, 1861-1862).

Expresado de manera sintética, la teoría a la que llegó Maxwell estaba constituida por un conjunto de doce ecuaciones en derivadas parciales (cuatro grupos de tres ecuaciones vectoriales) donde las incógnitas que se debían resolver eran una serie de funciones que determinaban una «estructura» —una función— continua que transmitía las fuerzas, la interacción, electromagnética. Esa «estructura continua» es lo que denominamos *campo electromagnético*. Por consiguiente, al contrario de lo que sucedía con la dinámica que había propuesto Newton en sus *Principia*, donde, como vimos, la interacción se transmitía a distancia, sin ningún tipo de soporte, la explicación de Maxwell se basaba en un medio continuo, el *campo electromagnético*, también llamado en ocasiones «éter electromagnético». Este modelo, el de las teorías de campos, que no violenta nuestras capacidades cognitivas como lo hacen las acciones a distancia, sería el que se impondría en la física del futuro.¹

La electrodinámica de Maxwell, la que él construyó, estaba aún incompleta. Las doce ecuaciones que formaban su teoría, únicamente determinaban la dinámica del campo electromagnético, esto es, cómo variaba en el tiempo. Faltaba algo esencial: la interacción entre los «productores» de ese campo —como las cargas eléctricas— y el propio campo; en particular, cómo afectaba al movimiento de una carga, un campo electromagnético determinado. Volveré a esta cuestión cuando haga su entrada en este libro Hendrik Antoon Lorentz.



James Clerk Maxwell y su esposa en Escocia, hacia 1875.

MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Si hay un fenómeno físico conocido, es el de la luz, indisolublemente unida a la historia de nuestra especie (y de la vida). Que se conociese no significa que se supiese cuál era su naturaleza. Esto no impidió, sin embargo, que se intentase medir con qué velocidad se desplazaba. La primera prueba directa de que la velocidad a la que se propaga la luz no es infinita provino del astrónomo danés Olaus Roemer (1644-1710), al proponer que las discrepancias en las medidas de los periodos de revolución de uno de los satélites de Júpiter, descubiertos por Galileo en 1609-1610, se debían a que se hacían cuando la Tierra se encontraba en posiciones diferentes de su trayectoria en torno al Sol y, por consiguiente, la luz proveniente del mismo debía recorrer distancias distintas. Basándose en esta idea, a comienzos de septiembre de 1675, Roemer predijo en la Académie des Sciences de París que el 9 de noviembre lo emergería del cono de sombra producido por Júpiter diez minutos más tarde, predicción que fue verificada por los astrónomos parisienses, reforzando de esta manera la tesis de la finitud de la velocidad de la luz. A lo largo del tiempo se han dado valores diferentes para el cálculo que supuestamente hizo Roemer de la velocidad de la luz, cuando, en realidad, él no suministró ningún

valor, interesado únicamente como estaba en determinar si esa velocidad era finita.

El siguiente avance en esta cuestión procedió de un astrónomo inglés, James Bradley (1693-1762), sucesor de Halley como Astrónomo Real en 1742. En 1728 había publicado un artículo, «A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F.R.S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. giving an Account of a new discovered Motion of the Fixed Stars» («Una carta del reverendo señor James Bradley, Savilian professor en Oxford y F.R.S [Fellow of the Royal Society], al doctor Edmond Halley, Astrónomo Real, describiendo un nuevo movimiento descubierto de las estrellas fijas»), en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society (pp. 637-660), en el que presentaba las consecuencias que derivaba de un fenómeno descubierto por él mismo, denominado *aberración estelar*, un efecto distinto al bien conocido de antiguo paralaje (diferencia entre las posiciones aparentes que en la bóveda celeste tiene un astro, según el punto desde el que se observa). Básicamente, la aberración estelar se debe a la diferencia entre la posición observada de una estrella y su posición real, diferencia debida a la combinación de la velocidad del observador y la velocidad

En el segundo de los artículos antes citados, Maxwell dio a conocer un resultado de extraordinaria importancia: la unificación de la óptica con el electromagnetismo. Cuando se lee este artículo, en concreto la tercera parte («La teoría de vórtices moleculares aplicada a la electricidad estática»), vemos que al calcular la velocidad de las ondas transversales a partir del cociente entre fuerzas eléctricas y magnéticas, Maxwell encontró el valor conocido para la velocidad de la luz. Casi siglo y medio después de que fuesen escritas esas palabras, todavía se puede apreciar la excitación que sentía Maxwell cuando escribió: «Difícilmente podemos evitar la inferencia de que *la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos*».

En otras palabras, como sucede a menudo cuando se dispone de una nueva teoría fundamental, ésta no sólo describe aquellos fenómenos para los que en principio fue concebida, sino que explica y predice otros. En el caso que nos ocupa, el descubrimiento fue que las ondas luminosas

de la luz. «Un telescopio –razonaba Bradley– suministra la verdadera posición de una estrella sólo si el movimiento de la Tierra coincide con la dirección de la luz que llega de la estrella; en caso contrario, hay que inclinar el telescopio en el sentido del movimiento de la Tierra, para que la luz lo atraviese según su eje. Esta desviación es máxima cuando los dos movimientos son perpendiculares y nula cuando coinciden sus direcciones. Ahora bien, como la Tierra cambia continuamente de dirección en su órbita alrededor del Sol, vemos a la estrella como si fuese ella la que varía constantemente de posición.» Mediante una serie de cálculos no muy complicados y basándose en la teoría corpuscular de la luz, Bradley halló que, de forma aproximada, el valor de esa aberración astronómica era igual al cociente v/c , donde v es la velocidad de la Tierra alrededor del Sol y c , la velocidad de la luz. Y como fue capaz de medir el valor de la aberración, dedujo que la luz se propagaba con una velocidad de 298.500 kilómetros por segundo.

La primera determinación no astronómica de la velocidad de la luz la obtuvo el físico francés Armand Fizeau (1819-1896) en un artículo publicado en 1849 («Note sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière»), «Nota

sobre un experimento relativo a la velocidad de propagación de la luz») en *Comptes Rendus de la Académie des Sciences* 29, pp. 90-132. Utilizando una rueda dentada que podía girar con una velocidad variable, cuando el disco estaba en reposo, enviaba un rayo de luz desde el lado del observador que miraba al disco de manera que pasara por uno de los dientes, llegase a un espejo y fuese reflejada por éste de vuelta al observador. A continuación, la rueda se ponía en movimiento y llegaba un momento en el que la luz reflejada era bloqueada por el siguiente diente. A una velocidad mayor, la luz podía pasar por ese diente y, como se conocía la velocidad de giro de la rueda, se podía calcular el tiempo que tardaba en colocarse en la posición adecuada el segundo diente. Y se podían utilizar estos datos, junto a la distancia conocida entre el espejo y el observador, para calcular la velocidad de la luz, que Fizeau estimó en 315.688 kilómetros por segundo.

Llegaron luego otras estimaciones y otros métodos; por ejemplo, los obtenidos por Leon Foucault, en 1862, o por Albert A. Michelson, que dedicó una parte importante de su carrera a este problema: su mejor resultado es el que obtuvo en 1927: 299.789 kilómetros por segundo.

eran ondas de fuerzas eléctricas y magnéticas o, lo que es lo mismo, que la óptica pasaba a verse englobada en el electromagnetismo, una conclusión que se vio reforzada de manera aparentemente definitiva (más tarde, la física cuántica puso límites a esta afirmación) con los experimentos que en 1888 llevó a cabo Heinrich Hertz (1857-1894), quien demostró que tanto los efectos electromagnéticos como calor radiante y luz se transmitían a través de un mismo medio mediante perturbaciones (ondas), que son, en todos los aspectos, iguales y que sólo necesitaban de instrumentos de recepción adecuados para hacerlas manifiestas a nuestros sentidos.

Los resultados obtenidos por Hertz atrajeron inmediatamente la atención sobre el problema de la comunicación sin hilos. Thomas A. Edison y Nikola Tesla, en Estados Unidos, Oliver Lodge y William Preece, en Inglaterra, y algunos otros científicos hicieron distintas contribuciones en esta línea, pero fue el italiano Guglielmo Marconi quien con más ahínco y habilidad combinó estos conocimientos para producir un sistema que permitió la comunicación sin

utilizar cables por los que circulase corriente eléctrica. A partir de entonces, el electromagnetismo se convirtió en un elemento fundamental de cualquier sociedad, algo que, a su vez, implicaba que los fenómenos electromagnéticos fuesen investigados con afán. La teoría de la relatividad especial no fue ajena a tales orígenes.

RECEPCIÓN DE LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE MAXWELL

Teniendo en cuenta que la electrodinámica de Maxwell tuvo mucho que ver con el origen de la teoría de la relatividad especial, en particular, como veremos, por los esfuerzos que Hendrik A. Lorentz llevó a cabo para perfeccionar la formulación maxwelliana, es importante comentar cómo recibieron otros físicos los escritos de Maxwell.

Que la teoría electromagnética era importante es algo que pocos dudaron o pudieron negar. Ahora bien, también es innegable que las dificultades que muchos –tal vez la mayoría– encontraron para comprender los escritos de Maxwell, con el *Treatise* a la cabeza, fueron muy grandes. El estilo analítico, conceptual y discursivo de Maxwell, no siempre un expositor transparente, junto a la complejidad del tratamiento matemático al que se vio obligado a recurrir, resultaban obstáculos tremendos para muchos de aquellos científicos que deseaban beneficiarse de sus investigaciones. Un magnífico ejemplo en este sentido lo proporciona el físico alemán Heinrich Hertz, quien, como he señalado, en 1888 suministró una de las demostraciones más trascendentales de la corrección de la teoría electromagnética de Maxwell: la existencia de la radiación electromagnética. En una recopilación de escritos de Hertz publicada en 1892, *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*, encontramos párrafos tan sustanciales como los siguientes:²

Y ahora, para ser más preciso, ¿qué es lo que llamamos la teoría de Faraday-Maxwell? Maxwell nos ha dejado como resultado de su pensamiento maduro un gran tratado sobre Electricidad y Magnetismo, de manera que podría decirse que la teoría de Maxwell es la que se promulga en ese trabajo, pero tal respuesta difícilmente será considerada satisfactoria por todos los científicos que han estudiado de cerca la cuestión. Muchas de las personas que se han lanzado con celo al estudio del libro de Maxwell, e incluso aquellas que no han tropezado con las inusitadas dificultades matemáticas, se han visto obligadas, a pesar de todo, a abandonar la esperanza de formarse ellas mismas una visión consistente completa de las ideas de Maxwell. Yo mismo no he tenido mejor suerte. A pesar de sentir la mayor admiración posible por las concepciones matemáticas de Maxwell, no siempre he estado seguro de haber captado el significado físico de sus afirmaciones, de manera que no me ha sido posible guiarme en mis experimentos directamente por el libro de Maxwell. Más bien, he sido guiado por el trabajo de Helmholtz, como de hecho se puede comprobar claramente por el modo en que mis experimentos han sido planteados. Pero desgraciadamente, en el caso especial límite de la teoría de Helmholtz que conduce a las ecuaciones de Maxwell, a la que señalan los experimentos, la base física de la teoría de Helmholtz desaparece, como de hecho ocurre siempre, tan pronto como se deja de lado la acción a distancia.

Como vemos, se trata de una cita muy sustanciosa. No sólo por lo que dice acerca de la dificultad de comprender los escritos de Maxwell, sino por lo que señala acerca del papel que desempeñó en la aceptación de la teoría de Maxwell el gran fisiólogo, físico y matemático germano Hermann von Helmholtz, quien, como la gran mayoría de los investigadores centroeuropeos que se interesaron hacia la segunda mitad del siglo XIX por los fenómenos electromagnéticos (por ejemplo, W. Weber, B. Riemann, R. Clausius y W. Ritz), favoreció en sus estudios la utilización del concepto de acción a distancia; no obstante, sus análisis críticos de las teorías de otros científicos terminaron conduciéndolo a la elaboración de una formulación que contenía, como casos especiales, tanto otras teorías de acción a distancia como, en un caso límite, la propia teoría de Maxwell. Como Hertz señalaba en la cita anterior, finalmente se comprobó que era ese caso límite precisamente el que superaba las pruebas experimentales, con lo que el concepto de acción a distancia perdía, básicamente, su razón de ser en la descripción de los fenómenos electromagnéticos. Pero en el camino, muchos aprendieron a comprender la teoría de Maxwell a través de la de Helmholtz. Se debe señalar, por cierto, que la traducción de *Treatise* al alemán no se hizo esperar demasiado, puesto que fue publicada en 1883: *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus*.

Continuando con Hertz, enfrentado ante la dificultad de comprender el verdadero alcance y significado de los procedimientos seguidos por Maxwell, optaba por entender su teoría de la manera siguiente (Hertz, 1962: 21): «A la pregunta “¿Qué es la teoría de Maxwell?”, no conozco una respuesta más breve y más concreta que la siguiente: la teoría de Maxwell es el sistema de ecuaciones de Maxwell. Yo consideraría que toda teoría que conduce al mismo sistema de ecuaciones y que, por consiguiente, comprende los mismos posibles fenómenos, es una forma o caso especial de la teoría de Maxwell».

Treatise on Electricity and Magnetism de Maxwell también fue traducido pronto al francés, aunque un poco más tarde que en Alemania: los dos tomos de la versión francesa, titulada *Traité d'Électricité et de Magnétisme*, aparecieron en 1885 y 1889, pero ¿cómo respondieron los científicos galos ante la obra de Maxwell?

Uno de los científicos franceses más eminentes de la época era, sin duda, Henri Poincaré. Y también él se interesó por la teoría electromagnética de Maxwell. Su interés llegó al extremo de dedicar algunos de los cursos –que más tarde aparecían en forma de libros, redactados por algún colaborador suyo (Poincaré corregía, eso sí, las pruebas)– que impartía en la Sorbona a la teoría electromagnética. Así, contamos con: *Électricité et optique, I: Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière*; *II: Les théories de Helmholtz et les expériences de Hertz* (curso impartido el año académico 1888-1889), y *III: La lumière et les théories électrodynamiques* (curso 1899-1890). En uno de estos volúmenes, se lee (Poincaré, 1901: iii): «La primera vez que un lector francés abre el libro de Maxwell, un sentimiento de incomodidad, incluso de desconfianza, se mezcla al principio con el de admiración. Solamente después de una prolongada familiaridad y como resultado de muchos esfuerzos, desaparece este sentimiento, pero muchas mentes eminentes lo retienen para siempre».

EINSTEIN SOBRE MAXWELL

«El cambio mayor en la base axiomática de la física –en otras palabras: de nuestra concepción de la estructura de la realidad–, desde el momento en que Newton sentara las bases de la física teórica, fue provocado por los trabajos de Faraday y Maxwell en el campo de los fenómenos electromagnéticos [...].

Según el sistema de Newton, la realidad física se caracteriza por los conceptos de espacio, tiempo, punto material y fuerza (acción recíproca de los puntos materiales). Los fenómenos físicos, según el punto de vista de Newton, deben ser considerados movimientos, gobernados por leyes fijas, de puntos materiales en el espacio [...].

El aspecto menos satisfactorio de este sistema –aparte de las dificultades ínsitas en el concepto de “espacio absoluto”, que hace muy poco se han planteado una vez más– está en su descripción de la luz, que Newton también concibió compuesta por puntos materiales, de acuerdo con su sistema [...]. Con el fin de expresar matemáticamente su sistema, Newton tuvo que crear el concepto de cocientes diferenciales y expresar las leyes del movimiento en la forma de ecuaciones diferenciales totales: quizá el mayor avance intelectual logrado por una sola persona. Las

ecuaciones en derivadas parciales no eran necesarias para estos fines y tampoco Newton hizo un uso sistemático de ellas, pero fueron necesarias para la formulación de la mecánica de los cuerpos deformables [...].

Así fue como la ecuación diferencial parcial entró en la física teórica como un elemento ancilar, aunque gradualmente se ha ido convirtiendo en soberana. Esto tuvo su inicio en el siglo XIX, al imponerse la teoría ondulatoria bajo la presión de los hechos observados. La luz en el espacio vacío fue explicada como un fenómeno ondulatorio del éter y, por tanto, parecía innecesario considerarla un conglomerado de puntos materiales. En este momento, por primera vez, la ecuación en derivadas parciales se mostró como expresión natural de las realidades primarias de la física [...].

Aun cuando la idea de la realidad física había dejado de ser puramente atómica, continuaba siendo, de momento, puramente mecánica; en general, todavía se seguía intentando explicar todos los fenómenos como movimientos de masas inertes y, por cierto, ningún otro enfoque de los hechos parecía concebible. Se produce entonces el gran cambio, que para siempre estará asociado a los nombres de Faraday, Maxwell y

Hertz. En esta revolución, la mejor parte corresponde a Maxwell. Demostró que el conjunto de lo que por entonces se conocía acerca de la luz y de los fenómenos electromagnéticos se podía expresar mediante su conocido doble sistema de ecuaciones en derivadas parciales, en las que los campos eléctrico y magnético aparecen como las variables dependientes. Maxwell trató, por cierto, de explicar o justificar esas ecuaciones mediante la construcción de un modelo mecánico.

Construyó varios pero no se tomó demasiado en serio ninguno de ellos y, al final, quedaron las ecuaciones como lo esencial y las intensidades de campo como las entidades irreductibles. Hacia finales del siglo, la concepción del campo electromagnético como entidad última había sido aceptada de manera general y muchos científicos serios habían abandonado los intentos de dar una explicación mecánica a las ecuaciones de Maxwell. Y antes de que transcurriera mucho tiempo ocurrió, al contrario, que se intentaron explicar los puntos materiales y su inercia por medio de la teoría de campos de Maxwell; no obstante, este intento no alcanzó un éxito total.

Si dejamos a un lado los importantes resultados individuales que produjo la investigación de Maxwell a lo largo de toda su vida en importantes ámbitos de la física y nos concentramos en los

cambios que él aportó a la concepción de la naturaleza de la realidad física, podemos decir lo siguiente: antes de Maxwell, los investigadores concebían la realidad física –en la medida en que se supone que representa los fenómenos naturales– como puntos materiales, cuyos cambios sólo consistían en movimientos que pueden formularse mediante ecuaciones diferenciales totales. Después de Maxwell se concibió la realidad física como representada por campos continuos que no podían ser explicados mecánicamente y debían representarse mediante ecuaciones en derivadas parciales.

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; con todo, debemos admitir al mismo tiempo que el programa no ha sido desarrollado aún en todas sus partes. Los sistemas satisfactorios de la física que a partir de entonces se han desarrollado representan compromisos entre estos dos esquemas, que por esta misma razón ofrecen un carácter provisional, lógicamente incompleto, a pesar de que han facilitado grandes adelantos en algunos de los aspectos investigados.»

Albert Einstein (1931 a),
«La influencia de Maxwell en el desarrollo
de los conceptos de realidad física»