

Alain Riazuelo

# Por qué $E = mc^2$

La historia de una ecuación  
que cambió el mundo

Postfacio de Étienne Klein

Traducción de Miguel Paredes Larrucea



**Alianza** editorial  
El libro de bolsillo

Título original: *Pourquoi E = mc<sup>2</sup>*

Diseño de colección: Estrada Design  
Diseño de cubierta: Manuel Estrada

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.



© Éditions humenSciences / Humensis, 2022  
© de la traducción: Miguel Paredes Larrucea, 2025  
© Alianza Editorial, S. A., 2025  
Calle Valentín Beato, 21  
28037 Madrid  
[www.alianzaeditorial.es](http://www.alianzaeditorial.es)

ISBN: 978-84-1148-972-0  
Depósito legal: M-3404-2025  
Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: [alianzaeditorial@anaya.es](mailto:alianzaeditorial@anaya.es)

La observación, a veces el azar, descubre los fenómenos; el método experimental los desarrolla y determina sus leyes físicas: pero el misterio último de las fuerzas elementales que los producen solamente puede ser revelado mediante la fuerza del pensamiento.

JEAN-BAPTISTE BIOT,  
«Sur l'aimantation imprimée aux métaux  
par l'électricité en mouvement»,  
*Journal des Savans*, abril 1821, p. 235



# Índice

- 11 Agradecimientos
- 13 Icónica, y sin embargo...
  
- 15 Introducción
  
- 19 1. Todo comienza con la luz
- 35 2. ¿Creían que estaba ya todo comprendido? Pues no...
- 42 3. El fracaso «más fructífero de la historia de las ciencias»
- 49 4. 1905, año milagroso
- 65 5. La relatividad especial
- 79 6. Notoriedad e incredulidad
- 90 7. Y por tanto...  $E = mc^2$
- 97 8. El fuego de las estrellas
- 112 9. Si  $E = mc^2$ , entonces Newton estaba equivocado
- 115 10. La otra relatividad
- 135 11. *Experimentum crucis*
- 159 12. Canonización
- 181 13. Una nueva visión del mundo
- 211 14. La bella durmiente
- 226 15. Extrema gravedad
- 253 16. Reconstruir el puzle
- 268 17. El final de la búsqueda

285	18. $E = mc^2$ sigue ahí
297	19. Verlo para creerlo
311	20. El último misterio
324	21. La evolución de una teoría
327	Epílogo: ¿Por qué $E = mc^2$ ?
331	Postfacio de Étienne Klein
339	Bibliografía
371	Índice onomástico

# Agradecimientos

A Olivia Recasens, y sin ningún orden en particular, Laurent Vergne, Éric Gourgoulhon, André Brahic, Franck Beaudoin, Hubert Reeves, Serge Koutchmy, Serge Jodra, Serge Brunier, Jacqueline Zorlu, Leiji Matsumoto, Jean-Pierre Chièze, Gaston Leroux, Gary Gygax, Quentin Lazzarotto, Richard Stephenson, Nathalie Deruelle... y evidentemente a Albert Einstein.



## Icónica, y sin embargo...

El objetivo de este libro es hablarles de la ecuación más famosa de la ciencia:  $E = mc^2$ . Se trata de una fórmula caligráficamente muy sencilla. Todos los caracteres que contiene son o números o letras o un signo matemático que todo el mundo conoce (el signo igual), por lo que cualquiera es capaz de pronunciarla. Pero su significado no salta a la vista, y es lógico: si no se sabe qué representan esa  $E$ , esa  $m$  y esa  $c$ , es imposible entender de qué nos está hablando. Sin embargo, esta ecuación está omnipresente en el mundo que nos rodea. De hecho es la cosa más indispensable para nuestra existencia, porque es lo que hace que brille el Sol y lo que hizo posible que las generaciones de estrellas que hubo en el pasado fabricasen los átomos de los que está constituida la Tierra y nosotros mismos. Pero para llegar hasta ahí tenemos naturalmente que explicar el contexto en el que apareció la ecuación y referirnos a su autor, del que el lector habrá oído hablar al menos una vez en su vida:

Albert Einstein. También hay que explicar sus consecuencias, algunas directas —la fuente de energía del Sol— y otras más inesperadas, como los agujeros negros o la historia del universo.

Es esta exploración la que he intentado emprender, teniendo siempre en cuenta el espíritu de la colección de la que la edición francesa forma parte («Comment a-t-on su?» de humenSciences), a saber, hablar de ciencia contando su historia, pero no de la manera erudita como lo haría un historiador, sino en el estilo más personal (y sin embargo riguroso) de un científico que utiliza estos conceptos en su trabajo diario. Y todo ello respetando la otra característica de la colección, a saber, que el libro no sea ni demasiado extenso ni demasiado complicado, para que sea accesible a todo el mundo. El resultado de este trabajo de equilibrista es lo que el lector tiene entre sus manos. Debido a la sutileza de algunos conceptos, habrá sin duda pasajes más difíciles que otros, pero espero que el conjunto esté al alcance del mayor número posible de personas; en todo caso es ese el objetivo declarado de la empresa. Y si por falta de espacio no he podido desarrollar algunos conceptos tanto como merecen, sepan que la intención no era privarle de ellos al lector, sino al contrario, despertar en él las ganas de saber más.

# Introducción

El descubrimiento de la ecuación  $E = mc^2$  es el episodio más célebre de la gran búsqueda científica encaminada a encontrar las leyes físicas que gobiernan nuestro mundo. Esta búsqueda ha existido sin duda desde tiempos inmemoriales, pero llevada a cabo racionalmente y acompañada de cierto éxito solamente a partir de la Antigüedad griega. Sin embargo, fue solo mucho más tarde, y tras largos periodos de estancamiento, cuando realmente emprendió el vuelo, gracias al que durante mucho tiempo fue considerado el más grande científico, Isaac Newton (1643-1727). Aunque siempre es difícil comparar épocas e individuos, probablemente solo haya otro hombre que pueda disputar ese estatus a Newton. Es el más famoso de todos, el único que puede presumir de ser universalmente conocido y reconocido: Albert Einstein (1879-1955). Como muchos de los lectores ya sabrán, es a Einstein a quien debemos la famosa —aunque algo misteriosa— fórmula  $E = mc^2$  que revo-

lucionó nuestra concepción del mundo, o al menos la concepción que los científicos de la época tenían de él. Pero lo que sin duda sabe menos la gente es que esta ecuación y las razones que llevaron a su descubrimiento apuntaban a un fallo en el notable edificio construido por Isaac Newton dos siglos antes. Este fallo indicaba que lo que el científico inglés había descubierto no era del todo exacto y que por tanto había que corregirlo. Lo que nadie sabía es hasta qué punto corregir lo que aparentemente era un defecto menor cambiaría de nuevo nuestra representación del mundo. El arquitecto fue una vez más Albert Einstein, y fue este logro, mucho más que su icónica  $E = mc^2$ , lo que le hizo célebre para siempre y por lo que es considerado el más grande de todos. Los destinos de Newton y Einstein están así indisolublemente unidos, a pesar de que vivieron con 250 años de diferencia. Pero en lo que concierne a este libro, toda nuestra atención se centrará en el segundo.

Einstein, personaje central en esta obra, no es sin embargo su único actor. En la historia que va a desplegarse ante los ojos del lector van a intervenir muchos protagonistas. Algunos serán figurantes efímeros, otros desempeñarán un papel importante y serán mucho más que dobles o comparasas. Porque lo más importante que quiero que recuerden es que la ciencia es ante todo una empresa altruista y colectiva. Quienes hacen posibles los mayores avances no son, sin embargo, infalibles. Ellos solos no pueden tener éxito en todo lo que emprenden ni tener siempre las intuiciones correctas. Einstein ofrecerá la quintaesencia de estas dos facetas, por sus inmensos logros, por supuesto, pero también porque ello no le impidió a veces verse sobrepasado por sus propias creaciones. Lejos de empañar su leyenda, estas

(raras) malas decisiones darán más profundidad, más humanidad al personaje.

Pero más que los gloriosos o discretos logros de los unos y los otros, el aspecto que personalmente más me fascina de la ciencia es esa posibilidad que ofrece a sus protagonistas de dialogar a través de los siglos. Por supuesto, los muertos no hablan, pero los vivos escriben. El lector tendrá varias veces la oportunidad de ver cómo científicos de distintas épocas han intercambiado de algún modo ideas por encima y más allá de su breve existencia. Los científicos y las científicas de épocas pasadas legaron a sus sucesores observaciones o enseñanzas que estos utilizarían mucho tiempo después y que a su vez les darían un significado más amplio que el imaginado por sus predecesores. En algunos casos me tomaré la libertad de advertir al lector cuando sea así. En otros, le dejaré la sorpresa de descubrirlo.

En resumen, habrán comprendido que, en mi opinión, hablar de la ecuación  $E = mc^2$  sin explicar de dónde viene o cuáles fueron sus consecuencias no tiene ningún sentido: en ciencia, como en muchos otros ámbitos, enunciar los hechos sin presentar su contexto no ayuda en nada a comprenderlos; al contrario, contribuye a dar una idea falsa de ellos, lo que sería el colmo en una obra de divulgación científica. La historia de  $E = mc^2$  va por tanto a necesitar dar algunos rodeos indispensables antes de entrar en el meollo de la cuestión. Comienza así por un problema con el cual dicha ecuación solo guarda una relación en apariencia muy distante: la luz. En efecto, adelantándonos a lo que veremos después en el libro, la  $E$  en la ecuación  $E = mc^2$  representa la energía y la  $m$  la masa. Ahora bien, la luz es un ente que ciertamente posee energía... pero que no tiene masa.

Por qué  $E = mc^2$

La relación entre la luz y la famosa ecuación parece por tanto muy débil a primera vista. Sin embargo, es a través de una sorprendente propiedad de la luz como se encontrará la famosa ecuación. Y es, por tanto, por ahí como comienza esta historia...

# 1. Todo comienza con la luz

¿Qué es la luz? Como suele ocurrir cuando se trata de cuestiones científicas fundamentales, las primeras reflexiones conseguidas se las debemos a los pensadores de la antigua Grecia. ¿Era un «fuego continuo» o una miríada de partículas elementales? ¿Surgía de los cuerpos incandescentes o era una propiedad que emanaba de nuestros ojos? ¿Se propagaba instantáneamente o a una velocidad finita? Fueron muchas las hipótesis, a menudo contradictorias, que se formularon sobre estas y muchas otras cuestiones. No todas eran correctas, ni mucho menos, pero el fermento intelectual de esta civilización empezó al menos a desbrozar la cuestión.

No es fácil detallar en pocas líneas todas las etapas a través de las cuales se elaboró la visión moderna del fenómeno de la luz, pero sí hay que mencionar algunos hitos esenciales. La cuestión de la velocidad de la luz fue la primera en quedar dirimida definitivamente. En 1676, el astrónomo

de origen danés Ole Rømer (1644-1710) observó anomalías en el movimiento de los satélites de Júpiter. Aunque los movimientos de los satélites parecen extraordinariamente regulares, algunos eventos que pueden fecharse con gran precisión, como el momento en que un satélite iluminado por el Sol desaparece o sale de la sombra de Júpiter, no se producen a intervalos perfectamente regulares, y su cronología parece desplazarse unos diez minutos antes o después de la esperada. Rømer acaba por comprender que el motivo no había que buscarlo en el movimiento de los satélites, que se produce con una cadencia metronómica, sino en el tiempo que se tarda en observarlo. Si la luz viaja a una velocidad grande pero finita, lo que percibimos no es el reflejo del presente inmediato, sino el de un pasado más o menos lejano que vemos con un retardo tanto mayor cuanto más tiempo haya viajado la luz, es decir, cuanto mayor sea la distancia que nos separa del fenómeno que observamos. Júpiter y la Tierra giran alrededor del Sol siguiendo trayectorias aproximadamente circulares, pero a velocidades distintas y a distancias diferentes de nuestra estrella, por lo que la distancia entre la Tierra y Júpiter varía a lo largo del año. Si la luz viaja a una velocidad finita, entonces el baile de los satélites de Júpiter se verá desde una distancia mayor cuando la Tierra y Júpiter están en lados opuestos del Sol que cuando están en el mismo lado. Por tanto, el aparente adelanto o retardo de los fenómenos observados está ligado simplemente a la variación de la distancia entre estas configuraciones planetarias, es decir, al hecho de que, en palabras de Rømer, «la luz necesita tiempo» para recorrer esa distancia suplementaria. En la época de Rømer aún no se conoce bien el valor de la distancia entre la Tierra y el

Sol, y la precisión con la que se datan los fenómenos de los eclipses es también bastante incierta debido a las limitaciones de los relojes. Así pues, Rømer no se aventura a dar ningún valor. En un primer momento la velocidad de la luz se estimará en unos 200 000 kilómetros por segundo (km/s, símbolo que utilizaremos a menudo). Posteriormente se harán intentos de medida cada vez más precisos, en particular por parte de los franceses Hippolyte Fizeau (1819-1896) y después Léon Foucault (1819-1868) a mediados del siglo XIX. Los valores convergerán finalmente hacia un valor casi igual a 300 000 km/s. El valor exacto importa poco en lo que sigue, por lo que utilizaré sistemáticamente este valor aproximado de 300 000 km/s, aunque el verdadero valor difiere ligeramente de él<sup>1</sup>.

Resuelta la cuestión de la velocidad de la luz, quedaba la de su naturaleza. ¿Era una entidad discreta, es decir, constituida por partículas, o una especie de medio continuo? El debate existía desde la Antigüedad y era similar al de la materia: ¿estaba formada esta por entidades elementales, los átomos (sobre los que volveremos), o por una sustancia divisible hasta el infinito? Para Platón (*ca.* 427-348 a. C.) por ejemplo, la materia y la luz eran entidades discretas, y la luz estaba formada por miríadas de diminutos tetraedros que se desplazaban por el espacio (si el lector se pregunta por qué demonios tetraedros, no se preocupe, pronto tendrá la respuesta). Pero en aquellos lejanos tiempos era im-

1. El valor exacto es de 299 792 458 metros por segundo o, si se prefiere, 299 792,458 km/s, suficiente para dar la vuelta a la Tierra más de siete veces en un segundo. Es fácil comprender por qué las observaciones sobre distancias astronómicas son más eficaces para poner de manifiesto la finitud de la velocidad de la luz.

posible zanjar la cuestión, y dos mil años después, a finales del siglo XVII, seguía existiendo un debate encarnizado entre los partidarios de la teoría corpuscular y los partidarios de una naturaleza ondulatoria, es decir, aquellos que defendían la idea de que la luz era una ondulación de algo que se propagaba progresivamente, como las ondas de agua cuando se arroja una piedra. Estos últimos estaban encabezados por el neerlandés Christiaan Huygens (1629-1695), y frente a él se hallaba el mayor científico de la época (y uno de los más grandes de la historia), Isaac Newton. Huygens era un óptico extraordinario. Perfeccionó el telescopio astronómico inventado por Galileo (1564-1642) hasta alcanzar un altísimo grado de precisión para aquellos tiempos. Gracias a sus instrumentos descubrió un satélite de Saturno, Titán. Mejoró también considerablemente la precisión de los relojes de su época, cosa de gran utilidad para el estudio de ciertos fenómenos astronómicos como la medición precisa de los movimientos de los satélites de Júpiter. Sus trabajos en el campo de la óptica le llevaron a explicar una ley empírica descubierta a principios de siglo por dos científicos, su compatriota Willebrord Snell (1580-1626) y el francés René Descartes (1596-1650). La ley en cuestión se refería a la refracción, es decir, al hecho de que la luz, al pasar de un medio a otro (por ejemplo, del aire al agua o viceversa), sufre un cambio de dirección. Es este fenómeno el que hace difícil estimar la profundidad de una piscina, que parece menos profunda cuando está llena que cuando está vacía, y es también gracias a él como funcionan muchos instrumentos ópticos, no en último lugar las gafas graduadas que el lector quizá lleve en la nariz: la luz se desvía al atravesar el vidrio o cualquier otro sólido transparente, lo que en el caso de las

gafas graduadas sirve para corregir los defectos de la vista. Huygens demuestra que si la luz es una onda, entonces es posible explicar las leyes de la refracción. Pero a él se le opone Isaac Newton. Newton es conocido sobre todo por haber formulado en 1687 las leyes de la gravitación universal (volveremos sobre ello), que, como su nombre indica, son universales, porque explican tanto fenómenos de la vida cotidiana (el ejemplo más famoso es la famosa manzana caída del árbol) como los fenómenos celestes, desde la trayectoria de la Luna alrededor de la Tierra hasta el curso de los planetas alrededor del Sol. Newton estudió también la luz. Entre otras cosas logró demostrar que la luz producida por una fuente luminosa está muchas veces formada por multitud de luces elementales, cada una de ellas con un color específico. Las gotas de agua pueden descomponer de manera natural la luz en la suma de sus luces elementales: es el conocido fenómeno del arco iris, que nos dice que la luz solar que nuestros ojos perciben como blanca está compuesta en realidad por toda una gama de colores que van del rojo al violeta, pasando por el naranja, el amarillo, el verde y el azul. Newton, por su parte, está convencido de que la luz está formada por minúsculas partículas. No tiene pruebas concluyentes, ni siquiera convincentes, pero en cuanto a prestigio e influencia Newton supera con creces a Huygens y es su visión la que por tanto va a imponerse durante más de un siglo. Pero en ciencia, aunque quien habla más alto puede dirigir el cotarro durante un tiempo, siempre llega un momento en que gana quien tiene razón. En los capítulos que siguen veremos varios ejemplos de ello. Y aquí es Huygens quien acabará ganando, aunque solo sea a título póstumo... y solamente por un tiempo.

El golpe decisivo a las ideas de Newton sobre la luz lo asesta más de un siglo después un compatriota suyo, Thomas Young (1773-1829). Young, igual que todos los científicos de su época, sabe que cuando la luz pasa por una minúscula abertura, esta parece comportarse como una nueva fuente de luz: la luz, después de rebasar la abertura, en lugar de propagarse únicamente en la dirección definida por esta y la fuente luminosa, se esparce en un abanico de direcciones, y se esparce tanto más cuanto más pequeña es la abertura. Es el fenómeno de la difracción de la luz, el que hace que en las fotografías astronómicas se vean «cruces» en lugar de estrellas brillantes, o el mismo tipo de efecto que cuando se ve de noche el alumbrado urbano a través de un visillo muy fino. Sustituyendo la luz por agua, se puede reproducir el mismo fenómeno con las olas generadas en un lado de un estanque separado del otro lado por una pared vertical provista de una pequeña abertura. Cuando las olas pasan por la abertura, se esparcen en todas las direcciones. Las olas son ondas, es decir, un fenómeno que se propaga gradualmente mediante variaciones de tal o cual magnitud física (en este caso, la altura del agua), y por tanto difractan, igual que difracta la luz. Eso podría ser una indicación sobre la naturaleza de la luz, que podría muy bien ser una onda porque posee una propiedad parecida a otro tipo de onda. Pero esta semejanza no basta para demostrarlo. Al fin y al cabo, si la luz constara de minúsculos corpúsculos, al chocar estos con el borde de la abertura podrían también partir en todas las direcciones y causar el fenómeno de la difracción.

Alrededor de 1800 Young realiza sus propios experimentos. Hace pasar la luz a través de una placa provista no de

uno sino de dos orificios, para luego proyectar el resultado sobre una pantalla. Si la luz estuviera compuesta de partículas, las zonas iluminadas que se verían en la pantalla serían la suma de las producidas por la luz al pasar por cada uno de los dos orificios estando el otro tapado. Pero no es eso lo que observa Young. Lo que ve en la pantalla es una alternancia de bandas claras y oscuras. Young comprende entonces que eso es la prueba de que la luz es una onda. En efecto, en ese caso los frentes de onda que pasan a través de un orificio son los mismos que los que pasan por el otro, de manera que los frentes de onda difractados (después de pasar por los orificios) no son independientes: guardan el recuerdo de su origen común. Debido a ello, los dos presentan simultáneamente una cresta (o un valle) si se observan cuando han recorrido la misma distancia, aunque sea por caminos diferentes. Y al proyectarlos juntos sobre una pantalla, se puede observar lo que ocurre en cada punto, cuando la diferencia de trayectos entre los dos frentes de onda nuevamente reunidos va cambiando progresivamente. Hay así zonas en las que los dos frentes de onda difractados son en ambos casos crestas o valles de la ondulación. Sus intensidades se suman y el resultado es una zona más clara. Si, por el contrario, los dos frentes de onda se reúnen en un punto donde la diferencia de distancias recorridas hace que uno esté en una cresta y el otro en un valle, entonces las amplitudes se cancelan y no se ve ninguna luz. La figura resultante en la pantalla es lo que se llama un patrón de interferencia: los dos haces de luz se han recombinado de una manera que en determinados puntos ha acentuado su efecto individual y en otros lo ha disminuido. El lector encontrará en la red diversos ejemplos gráficos de