

# EINSTEIN Y LA INTUICIÓN

El camino para entender las teorías  
de la relatividad

ANTONIO ACÍN DAL MASCHIO

Shackleton  
— b o o k s —

*Einstein y la intuición*

© Antonio Acín Dal Maschio, 2021

© de esta edición, Shackleton Books, S. L., 2021

Shackleton  
— b o o k s —

   @Shackletonbooks  
shackletonbooks.com

Realización editorial: Bonallettera Alcompas, S. L.

Diseño de cubierta: Pau Taverna

Diseño y maquetación: Kira Riera

© Ilustraciones: Jordi Dacs.

© Fotografías: todas las imágenes son de dominio público.

ISBN: 978-84-1361-089-4

Depósito legal: B 15791-2021

Impreso por EGEDSA (España).

Reservados todos los derechos. Queda rigurosamente prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento y su distribución mediante alquiler o préstamo públicos.

# CONTENIDO

<b>Introducción</b>	<b>7</b>
<b>La semilla de la relatividad</b>	<b>17</b>
La ciencia antes de la ciencia	18
Galileo, el primer relativista	25
La tentación pitagórica	34
Las dimensiones no importan	37
Y los observadores tampoco	41
Correlaciones y causalidad	44
<b>El camino hacia la relatividad</b>	<b>49</b>
Sin noticias del éter	55
Y entonces apareció Einstein	59
<b>La relatividad especial</b>	<b>69</b>
El tiempo se dilata y el espacio se contrae	69
Bienvenidos al espacio-tiempo	78
De nuevo la causalidad. La geometría del espacio-tiempo	81
Persiguiendo a la relatividad especial	94
¿Es la teoría antiintuitiva?	99
<b>Masa y energía</b>	<b>103</b>
Todo cambia, pero nada cambia	104
El cuadrimomento	110
$E = mc^2$ , todo un icono de la física	112
No es posible saltar al hiperespacio	115
Los límites de velocidad	118

<b>La teoría de la relatividad general</b>	<b>121</b>
Algo falla con Newton	122
Ascensores en caída y abducciones alienígenas	128
De nuevo el tiempo y la luz	132
La gravedad es cuestión de geometría	136
Persiguiendo la relatividad general	139
<b>La hija rebelde</b>	<b>149</b>
El efecto fotoeléctrico	151
Un mundo de probabilidades	155
El argumento EPR	158
Las desigualdades de Bell	162
Cuántica <i>versus</i> relatividad	166
Cuando falla la intuición	168
<b>Apéndice 1: Cálculo de la dilatación del tiempo</b>	<b>173</b>
<b>Apéndice 2: Invariancia de la luz y dilatación del tiempo en el espacio-tiempo</b>	<b>175</b>
<b>Apéndice 3: Derivación del cuádrimomento</b>	<b>179</b>
<b>Bibliografía recomendada</b>	<b>183</b>
<b>Glosario</b>	<b>187</b>

# Introducción

*«La imaginación es más importante que el conocimiento.  
El conocimiento es limitado y la imaginación circunda el mundo.»*

ALBERT EINSTEIN, en *The Saturday Evening Post*

Todo aquel que se haya interesado en algún momento por la física contemporánea habrá notado que en no pocas ocasiones se la describe echando mano de etiquetas tales como «paradójica» o «antiintuitiva». Según esta lectura, ya convencional, en las primeras décadas del siglo xx se produjo un proceso de efervescencia científica del que emergió un conjunto de teorías destinado a representar una ruptura radical con la física vigente hasta aquella fecha (conocida como «clásica» a partir de entonces), y que nos ofrece una imagen de la realidad en abierto contraste con nuestra manera «espontánea» y aparentemente irrenunciable de concebir el mundo. Se trata esta de una caracterización en la que coinciden buena parte de los libros tanto académicos como divulgativos, y que tiene el mérito indudable de rodear de un cierto halo de misterio, e incluso de glamur, a los progresos realizados por la ciencia en los últimos cien años. Si todo quedara aquí, seguramente no tendríamos nada que objetar.

El problema es que esa insistencia en la aparente «antiintuitividad» (permítasenos «el palabro») de la física contemporánea puede convertirse, a ojos del común de los mortales, en un remedo de la macabra admonición con la que se encontraban las almas antes de ingresar en el infierno dantesco: *Lasciate ogne speranza, voi ch'intrate* ('Vosotros que entráis, abandonad toda esperanza'). No hay nada que hacer, parecen advertirnos: la ciencia contemporánea se ha convertido en una disciplina abstrusa que desafía nuestras capacidades y esquemas «naturales» de comprensión, una suerte de rito místico del que deberían mantenerse alejados los no iniciados. A decir verdad, no parece un buen punto de partida para la divulgación ni una imagen que contribuya especialmente a promover el interés y la curiosidad por la labor científica entre los aficionados.

La figura de Albert Einstein fue clave en el desarrollo de esta revolución científica tildada de incomprensible. Tanto es así, que podríamos decir sin temor a equivocarnos que no existe área de la física teórica del último siglo que no sea deudora de sus decisivas aportaciones. Sus teorías de la relatividad (especial y general) representan una revisión radical de los conceptos fundamentales en torno a los cuales se articula nuestra comprensión de la realidad: masa, energía, tiempo y espacio adquieren un nuevo significado en la física posteinsteiniana. La equivalencia entre masa y energía, recogida en la famosa ecuación  $E = mc^2$ , está en la base del desarrollo de la tecnología nuclear, que ha marcado (para bien y para mal) la historia del último siglo. De igual manera, las teorías más modernas acerca



Albert Einstein en 1921, el mismo año en que recibió el Premio Nobel de Física. Fotografía del retratista Ferdinand Schmutzer.

del universo, desde su expansión hasta el *big bang* o los agujeros negros, no serían posibles sin la relatividad general, en la que han tenido su origen. Incluso en el ámbito de la mecánica cuántica, al que raramente suele asociarse su nombre, las aportaciones de Einstein resultaron cruciales para el desarrollo de la teoría; no debería olvidarse que fue

galardonado con el Premio Nobel de Física por su explicación del efecto fotoeléctrico, que dio el pistoletazo de salida a la cuantificación de la luz.

Visto así, resulta bastante intuitivo dedicar un libro a su figura. Pero ¿qué necesidad había de escribir otro más? ¿Qué puede quedar por decir acerca del físico más famoso de la historia después de cientos, miles, seguramente centenares de miles de páginas impresas sobre él y sus ideas? Sin duda, esto es algo que merece una explicación, y esta explicación nos devuelve, como quizás alguien pueda ya sospechar, a la manida acusación de antiintuitividad con la que abríamos esta introducción.

En buena medida, el propósito principal de este libro es precisamente el de contestar (o, cuando menos, aportar algunos matices) a la interpretación que se ha hecho con tanta frecuencia de las teorías de Einstein. Dicho de otro modo, nuestro propósito es defender la «naturalidad» de la concepción del mundo que se deriva de ellas y mostrar cómo, con las debidas contextualizaciones, esta responde y encaja con algunos de los principios que empleamos de forma espontánea en muchas otras situaciones. A primera vista puede no parecer una tarea fácil, pero disponemos de un sólido indicio de la razonabilidad de nuestro proyecto: Einstein suele ser presentado como paradigma del científico intuitivo con la misma frecuencia con la que la relatividad es acusada de lo contrario. Y en este caso la descripción es del todo acertada. El punto de partida de sus investigaciones fue siempre el respeto a un conjunto de supuestos «naturales» acerca de cómo debía funcionar el mundo, intuiciones que

luego traducía en un formalismo teórico que exploraba hasta las últimas consecuencias.

Procuraremos, pues, identificar y explicitar esos supuestos imprescindibles para penetrar en la lógica de la relatividad, como si nos metiéramos en la cabeza del propio Einstein. Para ello, nos serviremos de algunas consideraciones de carácter histórico y filosófico (o epistemológico, si se prefiere) que, lejos de constituir un simple adorno literario, representan piezas fundamentales en la demostración que nos hemos propuesto. Nos ayudarán a identificar un conjunto de requisitos que de forma espontánea exigimos a toda explicación científica, una serie de supuestos compartidos a partir de los cuales los hitos que nos llevan a las teorías de la relatividad irán cayendo por su propio peso como piezas de dominó. En cierta medida, es justo ahí donde reside la nota diferencial de este texto; si este (¡otro!) libro sobre Einstein tiene sentido, no será tanto por la formulación científica de las teorías (que es la que es), sino por la perspectiva desde la que se enfoca. El lector juzgará si lo hemos conseguido.

Antes de proseguir, conviene en todo caso hacer un par de salvedades para evitar la actitud que los anglosajones definirían como *overpromising* o, dicho de forma más prosaica, para no convertirnos en una suerte de vendedores de remedios milagrosos. La primera de ellas tiene que ver con el alcance de nuestra misión. Nuestro intento por resaltar los aspectos intuitivos de los desarrollos de la física contemporánea abarca, a lo sumo, la teoría de la relatividad, pero difícilmente la mecánica cuántica. Qué le vamos

a hacer: el carácter paradójico de esta rama de la física es difícilmente rebatible. La segunda matización, tanto o más necesaria, es de naturaleza semántica: «intuitivo» no es sinónimo de «fácil». Si bien es cierto que lograr una comprensión adecuada de las contribuciones de Einstein a la física teórica no tiene por qué ser una hazaña titánica reservada a unos pocos elegidos, no lo es menos que representa un desafío que requiere un indudable ejercicio de abstracción y concentración. John Archibald Wheeler, discípulo y colaborador de Einstein, recurría a una iluminadora metáfora para caracterizar la labor científica de su maestro y amigo: era, nos decía, como enfrentarse a la ascensión de los picos más altos. En este libro intentaremos proporcionar al lector las rutas, cuerdas e instrumental necesario para alcanzar la cima, pero tendrá que ser él quien camine y trepe. El esfuerzo no debería desanimarnos si consideramos la excepcionalidad del premio que nos aguarda al final del recorrido: acceder a unas teorías de las que se ha dicho que como «creación de una sola inteligencia es sin duda alguna el logro intelectual más elevado de la humanidad».<sup>1</sup> Ahí es nada.

La discusión acerca de la menor o mayor complejidad nos conduce a abordar una cuestión peliaguda al respecto, y que surge inevitablemente a la hora de enfrentarse a la divulgación en materia de ciencia: ¿qué hacemos con las matemáticas? No deja de ser sorprendente que en las cubiertas de no pocos libros de divulgación científica se destaquen

<sup>1</sup> Henry A. Boorse, Lloyd Motz, Jefferson Hane Weaver, *The Atomic Scientists: A Biographical History*, Wiley Science Edition, 1989.

con grandes caracteres expresiones tales como: «¡Sin fórmulas matemáticas!», como si eso constituyera un mérito incontestable y un poderoso argumento de venta (bueno, a lo mejor esto último sí). Nosotros hemos preferido optar por una solución intermedia, que también creemos oportuno explicitar. Hemos preferido mantener aquellos desarrollos matemáticos que reúnan las dos condiciones siguientes: contribuir a proporcionar una comprensión más profunda de las implicaciones y el curso lógico de la teoría, y requerir unos conocimientos básicos de álgebra y cálculo. Sin embargo, no hemos podido resistirnos a la tentación de incluir también otros (pocos) desarrollos más técnicos que quien lo desee podrá seguir en los apéndices al final del volumen.

Estas son las coordenadas básicas a partir de las cuales se ha trazado el mapa de este libro. Para acometer nuestra misión, iniciaremos el recorrido haciendo un breve repaso a lo que hemos llamado la «ciencia antes de la ciencia», para detenernos con mayor profundidad en la revolución científica del siglo xvii, en general, y en la obra de Galileo Galilei, en particular. Además de conocer los antecedentes teóricos a partir de los cuales Einstein construyó sus teorías, la historia de la ciencia nos dará pie para fijar algunos de los principios que de forma «intuitiva» y «natural» exigimos que cumpla toda explicación científica de la realidad, sobre los que volveremos de forma recurrente a lo largo de los siguientes capítulos. El conjunto de la producción científica de Einstein, tanto en sus aciertos como en sus errores, solo se puede comprender si nos acercamos a él desde los presupuestos epistemológicos a los que su autor nunca quiso (o pudo) renunciar.

Dotados ya del imprescindible equipamiento conceptual y metodológico, estaremos listos para adentrarnos en las espesuras de las dos teorías a las que el nombre de Einstein ha quedado indisociablemente unido: la teoría especial de la relatividad y la teoría general de la relatividad. En su exposición, intentaremos mostrar cómo el carácter aparentemente antiintuitivo de algunas de sus conclusiones no es tal a partir de lo que hemos aprendido unas páginas antes. Acabaremos el libro abordando las aportaciones de Einstein a la física cuántica, un aspecto que no todas las obras en torno a su figura atienden como es debido.

Einstein fue un revolucionario no tan solo en el qué, sino también en el cómo. Si a Faraday se le concede convencionalmente el privilegio de ser reconocido como el mejor físico experimental de la historia, no cabe duda de que Einstein fue, y sigue siendo, el paradigma del físico teórico. En el imaginario colectivo, la labor científica se concibe como el resultado de la experimentación y la observación de los fenómenos, a partir de los cuales se llega a las conclusiones que aquellos parecerían imponernos. Primero vienen los hechos, luego la teoría. Einstein invierte la lógica del proceso, como si colocara el carro delante de los bueyes. El conjunto de la experiencia opera como un escenario de fondo, el lejano referente a partir del cual la razón alza el vuelo para imaginar, por sí sola y desligada de los hechos, hipótesis acerca del funcionamiento del mundo: son los célebres experimentos mentales. Es esa realidad «soñada» el punto de partida para la formulación de la teoría, de la que se deducen de forma estrictamente lógica las consecuencias

que, a la postre, serán objeto de confirmación empírica. Primero la teoría, luego los hechos. No es de extrañar, pues, que la realidad, y la entera comunidad científica, llevemos más de cien años persiguiendo a Einstein.