Albert Einstein

# Sobre la teoría de la relatividad especial y general

Alianza editorial
El libro de bolsillo

Título original: *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*
Traducción revisada de Miguel Paredes Larrucea

Primera edición: 1984
Tercera edición: 2012
Quinta reimpresión: 2022

Diseño de colección: Estrada Design
Ilustración de cubierta: Retrato de Albert Einstein (fotografía sin fecha).
© Album / akg-images

Copyright © The Hebrew University of Jesrusalem, Israel
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 1984, 2022
Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15
28027 Madrid
www.alianzaeditorial.es

PAPEL DE FIBRA CERTIFICADA

ISBN: 978-84-206-0974-4
Depósito legal: M. 33.840-2012
Composición: Grupo Anaya
Printed in Spain

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

# Índice

Segunda parte: Sobre la teoría de la relatividad general

Consideraciones acerca del universo como un todo



Apéndice

# Prólogo

El presente librito pretende dar una idea lo más exacta posible de la teoría de la relatividad, pensando en aquellos que, sin dominar el aparato matemático de la física teórica, tienen interés en la teoría desde el punto de vista científico o filosófico general. La lectura exige una formación de bachillerato aproximadamente y –pese a la brevedad del libro– no poca paciencia y voluntad por parte del lector. El autor ha puesto todo su empeño en resaltar con la máxima claridad y sencillez las ideas principales, respetando por lo general el orden y el contexto en que realmente surgieron. En aras de la claridad me pareció inevitable repetirme a menudo, sin reparar lo más mínimo en la elegancia expositiva; me atuve obstinadamente al precepto del genial teórico L. Boltzmann, de dejar la elegancia para los sastres y zapateros. Las dificultades inherentes a la teoría propiamente dicha creo no habérselas ocultado al lector, mientras que las bases físicas empíricas de la teoría las he tratado deliberadamente con cierta despreocupación, para que al lector más alejado de la física no le ocurra lo que al caminante, a quien los árboles no le dejan ver el bosque. Espero que el librito depare a más de uno algunas horas de alegre esparcimiento.

A. Einstein
Diciembre de 1916

# Primera parte: Sobre la teoría de la relatividad especial

## 1. El contenido físico de las proposiciones geométricas

Seguro que también tú, querido lector, conociste de niño el soberbio edificio de la Geometría de Euclides y recuerdas, quizá con más respeto que amor, la imponente estructura por cuyas altas escalinatas te trajeron y llevaron durante horas sin cuento los meticulosos profesores de la asignatura. Y seguro que, en virtud de ese tu pasado, castigarías con el desprecio a cualquiera que declarase falsa incluso la más recóndita proposición de esta ciencia. Pero es muy posible que este sentimiento de orgullosa seguridad te abandonara de inmediato si alguien te preguntara: «¿Qué entiendes tú al afirmar que estas proposiciones son verdaderas?». Detengámonos un rato en esta cuestión.

La Geometría parte de ciertos conceptos básicos, como el de plano, punto, recta, a los que estamos en condiciones de asociar representaciones más o menos claras, así como de ciertas proposiciones simples (axiomas) que, sobre la base de aquellas representaciones, nos inclinamos a dar por «verdaderas». Todas las demás proposiciones son derivadas entonces de aquellos axiomas (es decir, son demostradas) sobre la base de un método lógico cuya legitimidad nos sentimos obligados a reconocer. Una proposición es correcta, o «verdadera», cuando se deriva de los axiomas a través de ese método reconocido. La cuestión de la «verdad» de las distintas proposiciones geométricas remite, pues, a la de la «verdad» de los axiomas. Sin embargo, se sabe desde hace mucho que esta última cuestión no sólo no es resoluble con los métodos de la Geometría, sino que ni siquiera tiene sentido en sí. No se puede preguntar si es verdad o no que por dos puntos sólo pasa *una* recta. Únicamente cabe decir que la Geometría euclidiana trata de figuras a las que llama «rectas» y a las cuales asigna la propiedad de quedar unívocamente determinadas por dos de sus puntos. El concepto de «verdadero» no se aplica a las proposiciones de la Geometría pura, porque con la palabra «verdadero» solemos designar siempre, en última instancia, la coincidencia con un objeto «real»; la Geometría, sin embargo, no se ocupa de la relación de sus conceptos con los objetos de la experiencia, sino sólo de la relación lógica que guardan estos conceptos entre sí.

El que, a pesar de todo, nos sintamos inclinados a calificar de «verdaderas» las proposiciones de la Geometría tiene fácil explicación. Los conceptos geométricos se corresponden más o menos exactamente con objetos en la naturaleza, que son, sin ningún género de dudas, la única causa de su formación. La Geometría no lo tiene en cuenta a fin de dar a su estructura el máximo rigor lógico; la costumbre, por ejemplo, de ver un segmento como dos lugares marcados en un cuerpo prácticamente rígido está muy afincada en nuestros hábitos de pensamiento. Y también estamos acostumbrados a suponer que tres puntos están situados sobre una recta cuando, mediante adecuada elección del punto de observación, podemos hacer coincidir sus imágenes al mirar con un solo ojo.

Si, dejándonos llevar por los hábitos de pensamiento, añadimos ahora a las proposiciones de la Geometría euclidiana una única proposición más, la de que a dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido les corresponde siempre la misma distancia (segmento), independientemente de las variaciones de posición a que sometamos el cuerpo, entonces las proposiciones de la Geometría euclidiana se convierten en proposiciones referentes a las posibles posiciones relativas de cuerpos prácticamente rígidos[1]. La Geometría así ampliada hay que contemplarla como una rama de la física. Ahora sí cabe preguntarse por la «verdad» de las proposiciones geométricas así interpretadas, porque es posible preguntar si son válidas o no para aquellos objetos reales que hemos asignado a los conceptos geométricos. Aunque con cierta imprecisión,

1. De esta manera se le asigna también a la línea recta un objeto de la naturaleza. Tres puntos de un cuerpo rígido *A, B, C* se hallan situados sobre una línea recta cuando, dados los puntos *A* y *C*, el punto *B* está elegido de tal manera que la suma de las distancias $\overline{AB}$ y $\overline{BC}$ es lo más pequeña posible. Esta indicación incompleta puede bastar de momento.

podemos decir, pues, que por «verdad» de una proposición geométrica entendemos en este sentido su validez en una construcción con regla y compás.

Naturalmente, la convicción de que las proposiciones geométricas son «verdaderas» en este sentido descansa exclusivamente en experiencias harto incompletas. De entrada, daremos por supuesta la verdad de las proposiciones geométricas, para luego, en la última parte de la exposición (la teoría de la relatividad general), ver que esa verdad tiene sus límites y precisar cuáles son éstos.

## 2. El sistema de coordenadas

Basándonos en la interpretación física de la distancia que acabamos de señalar, estamos también en condiciones de determinar la distancia entre dos puntos de un cuerpo rígido por medio de mediciones. Para ello necesitamos un segmento (barra *S*) que podamos utilizar de una vez para siempre como unidad de medida. Si *A* y *B* son dos puntos de un cuerpo rígido, su recta de unión es entonces construible según las leyes de la Geometría; sobre esta recta de unión, y a partir de *A,* llevamos el segmento *S* tantas veces como sea necesario para llegar a *B*. El número de repeticiones de esta operación es la medida del segmento $\overline{AB}$. Sobre esto descansa toda medición de longitudes[2].

2. Se ha supuesto, sin embargo, que la medición es exacta, es decir, que da un número entero. De esta dificultad se deshace uno empleando escalas subdivididas, cuya introducción no exige ningún método fundamentalmente nuevo.

Cualquier descripción espacial del lugar de un suceso o de un objeto consiste en especificar el punto de un cuerpo rígido (cuerpo de referencia) con el cual coincide el suceso, y esto vale no sólo para la descripción científica, sino también para la vida cotidiana. Si analizo la especificación espacial «en Berlín, en la Plaza de Potsdam», veo que significa lo siguiente. El suelo terrestre es el cuerpo rígido al que se refiere la especificación espacial; sobre él, «Plaza de Potsdam en Berlín» es un determinado punto, provisto de nombre, con el cual coincide espacialmente el suceso[3].

Este primitivo modo de localización sólo es aplicable a lugares situados en la superficie de cuerpos rígidos y depende de la existencia de puntos distinguibles sobre aquélla. Veamos cómo el ingenio humano se libera de estas dos limitaciones sin que la esencia del método de localización sufra modificación alguna. Si sobre la Plaza de Potsdam flota por ejemplo una nube, su posición, referida a la superficie terrestre, cabrá fijarla sin más que erigir en la plaza un mástil vertical que llegue hasta la nube. La longitud del mástil medida con la barra unidad, junto con la especificación del lugar que ocupa el pie del mástil, constituyen entonces una especificación completa del lugar. El ejemplo nos muestra de qué manera se fue refinando el concepto de lugar:

*a)* Se prolonga el cuerpo rígido al que se refiere la localización, de modo que el cuerpo rígido ampliado llegue hasta el objeto a localizar.

3. No es preciso entrar aquí con más detenimiento en el significado de «coincidencia espacial», pues este concepto es claro en la medida en que, en un caso real, apenas habría división de opiniones en torno a su validez.

*b)* Para la caracterización del lugar se utilizan *números,* en vez de puntos marcados por un nombre (en el caso anterior, la longitud del mástil medida con la barra).

*c)* Se sigue hablando de la altura de la nube aun cuando no se erija un mástil que llegue hasta ella. En nuestro caso, se determina –mediante fotografías de la nube desde diversos puntos del suelo y teniendo en cuenta las propiedades de propagación de la luz– qué longitud habría que dar al mástil para llegar a la nube.

De estas consideraciones se echa de ver que para la descripción de lugares será ventajoso independizarse de la existencia de puntos marcados por nombres y situados sobre el cuerpo rígido al que se refiere la localización, y utilizar en lugar de ello números. La física, en sus mediciones, cubre este objetivo empleando el sistema de coordenadas cartesianas.

Este sistema consta de tres paredes rígidas, planas, perpendiculares entre sí y ligadas a un cuerpo rígido. El lugar de cualquier suceso, referido al sistema de coordenadas, viene descrito (en esencia) por la especificación de la longitud de las tres verticales o coordenadas *(x, y, z)* (cf. Fig. 2, p. 40 *infra*) que pueden trazarse desde el suceso hasta esas tres paredes. Las longitudes de estas tres perpendiculares pueden determinarse mediante una sucesión de manipulaciones con barras rígidas, manipulaciones que vienen prescritas por las leyes y métodos de la Geometría euclidiana.

En las aplicaciones no suelen construirse realmente esas paredes rígidas que forman el sistema de coordenadas; y las coordenadas tampoco se determinan realmente por medio de construcciones con barras rígidas, sino indirectamente. Pero el sentido físico de las localizaciones debe buscarse siempre en concordancia con las consideraciones anteriores, so pena de que los resultados de la física y la astronomía se diluyan en la falta de claridad[4].

La conclusión es, por tanto, la siguiente: toda descripción espacial de sucesos se sirve de un cuerpo rígido al que hay que referirlos espacialmente. Esa referencia presupone que los «segmentos» se rigen por las leyes de la Geometría euclidiana, viniendo representados físicamente por dos marcas sobre un cuerpo rígido.

## 3. Espacio y tiempo en la Mecánica clásica

Si formulo el objetivo de la Mecánica diciendo que «la Mecánica debe describir cómo varía con el tiempo la posición de los cuerpos en el espacio», sin añadir grandes reservas y prolijas explicaciones, cargaría sobre mi conciencia algunos pecados capitales contra el sagrado espíritu de la claridad. Indiquemos antes que nada estos pecados.

No está claro qué debe entenderse aquí por «posición» y «espacio». Supongamos que estoy asomado a la ventanilla de un vagón de ferrocarril que lleva una marcha uniforme, y dejo caer una piedra a la vía, sin darle ningún impulso. Entonces veo (prescindiendo de

4. No es sino en la teoría de la relatividad general, estudiada en la segunda parte del libro, donde se hace necesario afinar y modificar esta concepción.

la influencia de la resistencia del aire) que la piedra cae en línea recta. Un peatón que presencie mi travesura desde el camino observa que la piedra cae a tierra según un arco de parábola. Yo pregunto ahora: las «posiciones» que recorre la piedra ¿están «realmente» sobre una recta o sobre una parábola? Por otro lado, ¿qué significa aquí movimiento en el «espacio»? La respuesta es evidente después de lo dicho en §2. Dejemos de momento a un lado la oscura palabra «espacio», que, para ser sinceros, no nos dice absolutamente nada; en lugar de ella ponemos «movimiento respecto a un cuerpo de referencia prácticamente rígido». Las posiciones con relación al cuerpo de referencia (vagón del tren *o* suelo) han sido ya definidas explícitamente en el epígrafe anterior. Introduciendo en lugar de «cuerpo de referencia» el concepto de «sistema de coordenadas», que es útil para la descripción matemática, podemos decir: la piedra describe, con relación a un sistema de coordenadas rígidamente unido al vagón, una recta; con relación a un sistema de coordenadas rígidamente ligado al suelo, una parábola. En este ejemplo se ve claramente que en rigor no existe una trayectoria[5], sino sólo una trayectoria con relación a un cuerpo de referencia determinado.

Ahora bien, la descripción *completa* del movimiento no se obtiene sino al especificar cómo varía la posición del cuerpo *con el tiempo,* o lo que es lo mismo, para cada punto de la trayectoria hay que indicar en qué momento se encuentra allí el cuerpo. Estos datos hay que comple-

5. Es decir, una curva a lo largo de la cual se mueve el cuerpo.

tarlos con una definición del tiempo en virtud de la cual podamos considerar estos valores temporales como magnitudes esencialmente observables (resultados de mediciones). Dentro de la Mecánica clásica, satisfacemos esta condición –con relación al ejemplo anterior– de la siguiente manera. Imaginemos dos relojes exactamente iguales; uno de ellos lo tiene el hombre en la ventanilla del vagón de tren; el otro, el hombre que está en el camino. Cada uno de ellos verifica en qué lugar del correspondiente cuerpo de referencia se encuentra la piedra en cada instante marcado por el reloj que tiene en la mano. Nos abstenemos de entrar aquí en la imprecisión introducida por el carácter finito de la velocidad de propagación de la luz. Sobre este extremo, y sobre una segunda dificultad que se presenta aquí, hablaremos detenidamente más adelante.

## 4. El sistema de coordenadas de Galileo

Como es sabido, la ley fundamental de la Mecánica de Galileo y Newton, conocida por la ley de inercia, dice: un cuerpo suficientemente alejado de otros cuerpos persiste en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. Este principio se pronuncia no sólo sobre el movimiento de los cuerpos, sino también sobre qué cuerpos de referencia o sistemas de coordenadas son permisibles en la Mecánica y pueden utilizarse en las descripciones mecánicas. Algunos de los cuerpos a los que sin duda cabe aplicar con gran aproximación la ley de inercia son las estrellas fijas. Ahora bien, si utilizamos un sistema de coordenadas solidario con la Tierra, cada estrella fija describe, con relación a él y a lo largo de un día (astronómico), una circunferencia de radio enorme, en contradicción con el enunciado de la ley de inercia. Así pues, si uno se atiene a esta ley, entonces los movimientos sólo cabe referirlos a sistemas de coordenadas con relación a los cuales las estrellas fijas no ejecutan movimientos circulares. Un sistema de coordenadas cuyo estado de movimiento es tal que con relación a él es válida la ley de inercia lo llamamos «sistema de coordenadas de Galileo». Las leyes de la Mecánica de Galileo-Newton sólo tienen validez para sistemas de coordenadas de Galileo.

## 5. El principio de la relatividad (en sentido restringido)

Para conseguir la mayor claridad posible, volvamos al ejemplo del vagón de tren que lleva una marcha uniforme. Su movimiento decimos que es una traslación uniforme («uniforme», porque es de velocidad y dirección constantes; «traslación», porque, aunque la posición del vagón varía con respecto a la vía, no ejecuta ningún giro). Supongamos que por los aires vuela un cuervo en línea recta y uniformemente (respecto a la vía). No hay duda de que el movimiento del cuervo es –respecto al vagón en marcha– un movimiento de distinta velocidad y diferente dirección; pero sigue siendo rectilíneo y uniforme. Expresado de modo abstracto: si una masa $m$ se mueve en línea recta y uniformemente respecto a un sistema de coordenadas *K,* entonces también se mueve en línea recta y uniformemente respecto a un segundo sistema de coordenadas *K´,* siempre que éste ejecute respecto a *K* un movimiento de traslación uniforme. Teniendo en cuenta lo dicho en el párrafo anterior, se desprende de aquí lo siguiente:

Si *K* es un sistema de coordenadas de Galileo, entonces también lo es cualquier otro sistema de coordenadas *K´* que respecto a *K* se halle en un estado de traslación uniforme. Las leyes de la Mecánica de Galileo-Newton valen tanto respecto a *K´* como respecto a *K.*

Demos un paso más en la generalización y enunciemos el siguiente principio: Si *K´* es un sistema de coordenadas que se mueve uniformemente y sin rotación respecto a *K,* entonces los fenómenos naturales transcurren con respecto a *K´* según idénticas leyes generales que con respecto a *K.* Esta proposición es lo que llamaremos el «principio de relatividad» (en sentido restringido).

Mientras se mantuvo la creencia de que todos los fenómenos naturales se podían representar con ayuda de la Mecánica clásica, no se podía dudar de la validez de este principio de relatividad. Sin embargo, los ulteriores adelantos de la Electrodinámica y de la Óptica hicieron ver cada vez más claramente que la Mecánica clásica, como base de toda descripción física de la naturaleza, no era suficiente. La cuestión de la validez del principio de relatividad se tornó así perfectamente discutible, sin excluir la posibilidad de que la respuesta fuese negativa.

Existen, con todo, dos hechos generales que de entrada hablan muy a favor de la validez del principio de relatividad. En efecto, aunque la mecánica clásica no proporciona una base suficientemente ancha para representar teóricamente *todos* los fenómenos físicos, tiene que poseer un contenido de verdad muy importante, pues da con admirable precisión los movimientos reales de los cuerpos celestes. De ahí que en el campo de la *Mecánica* tenga que ser válido con gran exactitud el principio de relatividad. Que un principio de generalidad tan grande sea válido con tanta exactitud en un determinado campo de fenómenos pero falle en otro es, a priori, poco probable.

El segundo argumento, sobre el que volveremos más adelante, es el siguiente. Si el principio de relatividad (en sentido restringido) no es válido, entonces los sistemas de coordenadas de Galileo $K$, $K'$, $K''$, etc., que se mueven uniformemente unos respecto a otros, no serán equivalentes para la descripción de los fenómenos naturales. En ese caso no tendríamos más remedio que pensar que las leyes de la naturaleza sólo pueden formularse con especial sencillez y naturalidad si de entre todos los sistemas de coordenadas de Galileo eligiésemos como cuerpo de referencia *uno* ($K_0$) que tuviera un estado de movimiento determinado. A éste lo calificaríamos, y con razón (por sus ventajas para la descripción de la naturaleza), de «absolutamente en reposo», mientras que de los demás sistemas galileanos $K$ diríamos que son «móviles». Si la vía fuese el sistema $K_0$, pongamos por caso, entonces nuestro vagón de ferrocarril sería un sistema $K$ respecto al cual regirían leyes menos sencillas que respecto a $K_0$. Esta menor simplicidad habría que atribuirla a que el vagón $K$ se mueve respecto a $K_0$ (es decir, «realmente»). En estas leyes generales de la naturaleza formuladas respecto a $K$ tendrían que desempeñar un papel el módulo y la dirección de la velocidad del vagón. Sería de esperar, por ejemplo, que el tono de un tubo de órgano fuese distinto cuando su eje fuese paralelo a la dirección de marcha que cuando estuviese perpendicular. Ahora bien, la Tierra, debido a su movimiento orbital alrededor del Sol, es equiparable a un vagón que viajara a unos 30 km por segundo. Por consiguiente, caso de no ser válido el principio de relatividad, sería de esperar que la dirección instantánea del movimiento terrestre interviniera en las leyes de la naturaleza y que, por lo tanto, el comportamiento de los sistemas físicos dependiera de su orientación espacial respecto a la Tierra; porque, como la velocidad del movimiento de rotación terrestre varía de dirección en el transcurso del año, la Tierra no puede estar todo el año en reposo respecto al hipotético sistema $K_0$. Pese al esmero que se ha puesto en detectar una tal anisotropía del espacio físico terrestre, es decir, una no equivalencia de las distintas direcciones, jamás ha podido ser observada. Lo cual es un argumento de peso a favor del principio de la relatividad.

## 6. El teorema de adición de velocidades según la Mecánica clásica

Supongamos que nuestro tan traído y llevado vagón de ferrocarril viaja con velocidad constante $v$ por la línea, e imaginemos que por su interior camina un hombre en la dirección de marcha con velocidad $w$. ¿Con