

Biblioteca
STEPHEN HAWKING

EDICIÓN DE

STEPHEN HAWKING

LA GRAN ILUSIÓN

Las grandes obras de Albert Einstein

CRÍTICA

LA GRAN ILUSIÓN

LAS GRANDES OBRAS
DE ALBERT EINSTEIN

Edición de
STEPHEN HAWKING

CRÍTICA
BARCELONA

Primera edición: noviembre de 2010

Primera edición en esta nueva presentación: marzo de 2024

La gran ilusión. Las grandes obras de Albert Einstein.

Stephen Hawking

La lectura abre horizontes, iguala oportunidades y construye una sociedad mejor.

La propiedad intelectual es clave en la creación de contenidos culturales porque sostiene el ecosistema de quienes escriben y de nuestras librerías. Al comprar este libro estarás contribuyendo a mantener dicho ecosistema vivo y en crecimiento.

En Grupo Planeta agradecemos que nos ayudes a apoyar así la autonomía creativa de autoras y autores para que puedan continuar desempeñando su labor. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear 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

Título original: *A stubbornly persistent illusion*

© Stephen Hawking, 2007

© de la traducción, Javier García Sanz, 2008

© Editorial Planeta, S. A., 2024

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: 978-84-9199-628-6

Depósito legal: B. 1.933-2024

Impresión y encuadernación: Limpergraf

Printed in Spain - Impreso en España



I

EL PRINCIPIO
DE LA RELATIVIDAD

A veces podemos engañarnos y pensar que los grandes avances científicos, como la teoría de la relatividad de Einstein, se desarrollaron a partir de la nada y de forma completamente independiente de trabajos anteriores. En «El Principio de la Relatividad», vemos el contexto a partir del cual Einstein desarrolló su teoría, incluyendo alguno de los artículos fundamentales en los que se basó.

Para situar en su contexto este trabajo, lo mejor es considerar el *statu quo* de la física a principios del siglo xx. En 1864, James Clerk Maxwell desarrolló una teoría completa de electricidad y magnetismo, y demostró que un campo eléctrico es creado por una carga estacionaria, y que un campo magnético se genera por una carga en movimiento. Se entendían, pues, como fuerzas de naturaleza distinta.

Hendrick A. Lorentz, en una serie de artículos publicados en 1895 y 1904, planteaba una cuestión aparentemente simple. ¿Qué sucede si tenemos una carga en reposo y nosotros pasamos por su lado corriendo? Lorentz demostró que para un observador en movimiento, una carga en reposo «parecerá» una carga en movimiento, y por tanto, un campo eléctrico parecerá un campo magnético. Lorentz demostró además que para un observador en movimiento, una onda electromagnética se propagará a la misma velocidad que para un observador estacionario: a la velocidad de la luz.

En 1905 Einstein llegó a una conclusión similar: los fundamentos de las fuerzas eléctrica y magnética están relacionados entre sí,

y pueden aparecer en proporciones distintas para observadores moviéndose a velocidades distintas. Pero Einstein demostró mucho más. Postuló que todas las leyes físicas deben ser válidas en cualquier «sistema de referencia inercial» (viajar a velocidad fija en módulo y dirección), y que para cualquiera de sus observadores la velocidad de la luz será una constante.

Estas suposiciones estaban bien de acuerdo tanto con las teorías de Maxwell como con el trabajo experimental de Michelson y Morley, quienes demostraron que la luz viaja a velocidad constante sin importar el movimiento de la Tierra. Einstein postuló que dos observadores con barras métricas y relojes idénticos, que se mueven el uno respecto del otro verán más corta la barra métrica de la otra persona, y verán cómo el reloj del otro funciona más lentamente. En esta aparente paradoja se basa la esencia de la relatividad.

Las transformaciones entre sistemas en movimiento, convencionalmente conocidas como transformaciones de Lorentz, trajeron consigo una importante corrección a las leyes de movimiento de sir Isaac Newton. Según Newton, el aplicar una fuerza constante a un cuerpo lo acelera. Y hacerlo indefinidamente aumentará la velocidad del cuerpo sin límites. Sin embargo, la teoría de la relatividad de Einstein demostró que nada puede sobrepasar la velocidad de la luz (Newton estaba equivocado, pero sólo en el límite en que las velocidades se aproximan a la de la luz).

Einstein se dio cuenta de que la relatividad estaba incompleta. Sólo se aplicaba a sistemas en los cuales los cuerpos se mueven a velocidades constantes, mientras que en campos gravitacionales los cuerpos están constantemente en aceleración. Así que entre 1911 y 1916 desarrolló su «teoría general de la relatividad» en varios artículos históricos, cuyos resultados principales están descritos en las secciones 7 y 8 de «El principio de la relatividad».

En uno de sus «experimentos mentales» (conocidos como *gedankenexperiments*), Einstein postuló que no debía haber ninguna

diferencia entre un experimento realizado en un ascensor quieto en el suelo, y uno que está siendo acelerado hacia arriba a espacio abierto. Dado que un sistema de referencia en aceleración provocará que todos los proyectiles, incluyendo los haces de luz, sean curvados, Einstein demostró que la luz sería curvada por campos gravitacionales. De hecho, la teoría general recalca que son *espacio y tiempo* los que se curvan, y que la luz, o cualquier otro objeto, simplemente sigue una «línea recta» a lo largo del espacio-tiempo.

Como John Archibald Wheeler decía: «la materia dice al espacio-tiempo cómo curvarse, y el espacio-tiempo dice a la materia cómo moverse». Einstein se dio cuenta de que sus ecuaciones no sólo podían gobernar el comportamiento de haces de luz y estrellas, sino también del universo como conjunto. Notó que el universo podía no ser estático y que debía o bien expandirse o bien colapsar, y así es como la relatividad general constituye la base del campo que ahora se conoce como cosmología, tal y como se detalla en la sección 10.

Para forzar al universo a un estado permanentemente estático, Einstein introdujo un término ad hoc en sus ecuaciones de campo conocido como la «constante cosmológica». Cuando en 1929 Edwin Hubble descubrió que el universo se expandía, Einstein reconoció su error y se refirió a la constante cosmológica como «la mayor metedura de pata de mi vida». Recientemente, la constante cosmológica ha sido reintroducida en la cosmología con una nueva forma: la «energía oscura» que impregna el universo. Recientes observaciones de supernovas lejanas sugieren que la energía oscura es la que proporciona el combustible para una aceleración del universo.

El modelo con el que Einstein se presentó sigue aún vigente, y todavía no ha fallado en ninguna de las pruebas u observaciones a gran escala. Cuando uno lee sus pensamientos sobre estos asuntos, lo que prevalece de manera extraordinariamente notable es todo lo que él, y posteriores investigadores, fueron capaces de deducir a partir de supuestos iniciales tan simples.

SOBRE LA ELECTRODINÁMICA DE LOS CUERPOS EN MOVIMIENTO*

Es bien sabido que, cuando se aplica a cuerpos en movimiento, la electrodinámica de Maxwell tal como hoy se entiende normalmente conduce a asimetrías que no parecen ser inherentes a los fenómenos. Tomemos, por ejemplo, la interacción electrodinámica entre un imán y un conductor. Aquí los fenómenos observables dependen sólo del movimiento relativo del conductor y el imán, mientras que la visión habitual traza una nítida distinción entre los dos casos, en donde o bien uno u otro de los dos cuerpos está en movimiento. Pues, en efecto, si el imán está en movimiento y el conductor está en reposo, en la vecindad del imán aparece un campo electromagnético con una energía definida que produce una corriente dondequiera que haya localizados elementos del conductor. Pero si el imán está en reposo mientras que el conductor está en movimiento, no hay ningún campo eléctrico en la vecindad del imán, sino más bien una fuerza electromotriz en el conductor a la que no corresponde ninguna energía per se, sino que, suponiendo una igualdad del movimiento relativo en los dos casos, da lugar a corrientes eléctricas de la misma magnitud y el mismo curso que las producidas por las fuerzas eléctricas en el primer caso.

* «Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik*, 17, 1905.

Ejemplos de este tipo, junto con los infructuosos intentos de detectar un movimiento de la Tierra con relación al «medio lumínico», llevan a la conjetura de que ni los fenómenos de la mecánica, ni tampoco los de la electrodinámica tienen propiedades que correspondan al concepto de reposo absoluto. Más bien, las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica serán válidas para todos los sistemas de coordenadas en los que rigen las ecuaciones de la mecánica, como ya se ha demostrado para cantidades de primer orden. Elevaremos esta conjetura (cuyo contenido será denominado en adelante «el principio de relatividad») al estatus de un postulado e introduciremos también otro postulado, que es sólo aparentemente incompatible con él, a saber, que la luz se propaga siempre en el espacio vacío con una velocidad definida V que es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor. Estos dos postulados bastan para conseguir una electrodinámica de cuerpos en movimiento simple y consistente basada en la teoría de Maxwell para cuerpos en reposo. La introducción de un «éter lumínico» se mostrará superflua, puesto que la idea que se va a desarrollar aquí no requerirá un «espacio en reposo absoluto» dotado de propiedades especiales, ni asigna un vector velocidad a un punto del espacio vacío donde están teniendo lugar procesos electromagnéticos.

Como toda la electrodinámica, la teoría que va a desarrollarse aquí está basada en la cinemática de un cuerpo rígido, puesto que las afirmaciones de una teoría semejante tienen que ver con las relaciones entre cuerpos rígidos (sistemas de coordenadas), relojes y procesos electromagnéticos. Una consideración insuficiente de esta circunstancia está en la raíz de las dificultades con las que debe enfrentarse actualmente la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.

A. PARTE CINEMÁTICA

1. DEFINICIÓN DE SIMULTANEIDAD

Consideremos un sistema de coordenadas en el que son válidas las ecuaciones mecánicas de Newton. Para distinguir nominalmente dicho sistema de aquellos que van a introducirse más tarde, y para hacer esta presentación más precisa, le llamaremos «sistema de reposo».

Si una partícula está en reposo con respecto a este sistema de coordenadas, su posición relativa al último puede determinarse por medio de varas de medir rígidas utilizando los métodos de la geometría euclidiana y expresarse en coordenadas cartesianas.

Si queremos describir el *movimiento* de una partícula, damos los valores de sus coordenadas como funciones del tiempo. Sin embargo, debemos tener en cuenta que una descripción matemática de este tipo sólo tiene sentido físico si tenemos ya claro lo que entendemos aquí por «tiempo». Debemos tener en cuenta que todos nuestros juicios que implican al tiempo son siempre juicios sobre *sucesos simultáneos*. Si, por ejemplo, yo digo que «El tren llega aquí a las 7 en punto», eso significa, más o menos, «La manecilla pequeña de mi reloj apuntando a las 7 y la llegada del tren son sucesos simultáneos».¹

Podría parecer que todas las dificultades implicadas en la definición de «tiempo» podrían superarse si sustituyo «posición de la manecilla pequeña de mi reloj» por «tiempo». Semejante definición es suficiente si va a definirse un tiempo exclusivamente para el lugar en el que está localizado el reloj; pero la definición ya no es satisfactoria cuando tienen que enlazarse temporalmente series de

1. No discutiremos aquí la imprecisión inherente al concepto de simultaneidad de dos sucesos que tienen lugar en la misma posición (aproximadamente), lo que sólo puede ser eliminado mediante una abstracción.

sucesos que ocurren en localizaciones diferentes, o —lo que es equivalente— cuando hay que evaluar temporalmente sucesos que ocurren en lugares remotos del reloj.

Por supuesto, podríamos contentarnos con evaluar el tiempo de los sucesos estacionando en el origen de las coordenadas a un observador con un reloj; este observador asigna a cada suceso a evaluar la posición correspondiente de las manecillas del reloj cuando a través del espacio vacío le llega una señal luminosa procedente de dicho suceso. Sin embargo, sabemos por experiencia que una coordinación semejante tiene el inconveniente de que no es independiente de la posición del observador con el reloj. Llegamos a un arreglo más práctico mediante el siguiente argumento.

Si existe un reloj en el punto A en el espacio, entonces un observador situado en A puede evaluar el tiempo de los sucesos en la inmediata vecindad de A hallando las posiciones de las manecillas del reloj que son simultáneas con dichos sucesos. Si existe otro reloj en el punto B que se asemeja en todos los aspectos al que hay en A , entonces el tiempo de los sucesos en la inmediata vecindad de B puede ser evaluado por un observador en B . Pero no es posible comparar el tiempo de un suceso en A con uno en B sin una estipulación adicional. Hasta aquí hemos definido sólo un «tiempo- A » y un «tiempo- B », pero no un «tiempo» común para A y B . El último puede ahora determinarse estableciendo por definición que el «tiempo» requerido por la luz para viajar de A a B es igual al «tiempo» que requiere para viajar de B a A . En efecto, supongamos que un rayo de luz parte de A hacia B en un «tiempo- A » t_A , es reflejado desde B hacia A en un «tiempo- B » t_B , y llega de nuevo a A en un «tiempo- A » t'_A . Los dos relojes son sincrónicos por definición si

$$t_B - t_A = t'_A - t_B.$$

Suponemos que es posible que esta definición de sincronidad esté libre de contradicciones, y que lo esté para puntos en número arbitrario, y por consiguiente son válidas en general las relaciones siguientes:

1. Si el reloj en B marcha de forma síncrona con el reloj en A , el reloj en A marcha de forma síncrona con el reloj en B .
2. Si el reloj en A marcha de forma síncrona con el reloj en B así como con el reloj en C , entonces los relojes en B y C también marchan de forma síncrona uno con relación al otro.

Por medio de ciertos experimentos (mentales) físicos hemos establecido lo que debe entenderse por relojes síncronos en reposo relativo y situados en diferentes lugares, y con ello hemos llegado obviamente a definiciones de «síncrono» y «tiempo». El «tiempo» de un suceso es la lectura obtenida simultáneamente de un reloj en reposo situado en el lugar del suceso, que para todas las determinaciones temporales marcha de forma síncrona con un reloj especificado en reposo y, por supuesto, con el reloj especificado.

Basados en la experiencia, estipulamos además que la cantidad

$$\frac{2\overline{AB}}{t'_A - t_A} = V$$

es una constante universal (la velocidad de la luz en el espacio vacío).

Es esencial que hayamos definido el tiempo por medio de relojes en reposo en el sistema de reposo; puesto que el tiempo recién definido está relacionado con el sistema en reposo, le llamaremos «el tiempo del sistema de reposo».

2. SOBRE LA RELATIVIDAD DE LONGITUDES Y TIEMPOS

Las consideraciones siguientes están basadas en el principio de relatividad y el principio de constancia de la velocidad de la luz. Definimos estos dos principios como sigue:

1. Si los dos sistemas de coordenadas están en movimiento relativo de traslación, paralela uniforme, las leyes de acuerdo con las cuales cambian los estados de un sistema físico no dependen de con cuál de los dos sistemas están relacionados dichos cambios.
2. Todo rayo luminoso se mueve en el sistema de coordenadas «de reposo» con una velocidad fija V , independientemente de si este rayo luminoso es emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento. Por lo tanto,

$$\text{velocidad} = \frac{\text{recorrido de la luz}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

donde «intervalo de tiempo» debería entenderse en el sentido de la definición dada en la sección 1.

Tomemos una vara rígida en reposo; sea l su longitud, medida por una vara de medir que está también en reposo. Imaginemos ahora que se coloca el eje de la vara a lo largo del eje X del sistema de coordenadas en reposo, y que la vara es puesta entonces en movimiento de traslación paralela uniforme (con velocidad v) a lo largo del eje X en la dirección de las x crecientes. Preguntamos sobre la longitud de la vara de medir, que imaginamos debe establecerse por las dos operaciones siguientes:

- a) El observador se mueve junto con la mencionada vara de medir y la vara rígida susceptible de ser medida, y mide la longitud de esta vara tendiendo la vara de medir de la misma manera que si la vara susceptible de ser medida, el observador y la vara de medir estuvieran en reposo.
- b) Utilizando relojes en reposo y síncronos en el sistema de reposo como se esbozó en la sección 1, el observador determina en qué puntos del sistema de reposo están situados el principio y el final de la vara susceptible de ser medida en algún tiempo t dado. La distancia entre estos dos puntos, medida con la vara utilizada antes —pero no en reposo—, es también una longitud que podemos llamar la «longitud de la vara».

De acuerdo con el principio de relatividad, la longitud determinada por la operación (a), que llamaremos «la longitud de la vara en el sistema en movimiento», debe ser igual a la longitud l de la vara en reposo.

La longitud determinada utilizando la operación (b), que llamaremos «la longitud de la vara (en movimiento) en el sistema de reposo», será determinada sobre la base de nuestros dos principios, y encontraremos que difiere de l .

La cinemática actual supone implícitamente que las longitudes determinadas por las dos operaciones anteriores son exactamente iguales entre sí, o, en otras palabras, que en el tiempo t un cuerpo rígido en movimiento es totalmente reemplazable, en cuanto a su geometría, por el *mismo* cuerpo cuando está *en reposo* en una posición concreta.

Además, imaginamos los dos extremos (A y B) de la vara provistos de relojes que son síncronos con los relojes del sistema de reposo, i. e., cuyas lecturas corresponden siempre al «tiempo del sistema de reposo» en las localizaciones que los relojes resultan ocupar; por lo tanto, estos relojes son «síncronos en el sistema de reposo».