

## ¿Qué es la teoría de la relatividad?\*

Albert Einstein

He aceptado con gusto la petición que me formulara su colega para escribir unas líneas sobre la relatividad, para ser publicadas por el *Times*. Después de la lamentable interrupción del antiguo y activo intercambio de ideas entre los hombres de ciencia, me resulta grata esta oportunidad de expresar mis sentimientos de alegría y agradecimiento para los astrónomos y físicos de Inglaterra.

Con total respeto por las solemnes tradiciones del trabajo científico en ese país, los más eminentes hombres de ciencia han entregado su tiempo y su esfuerzo, y las instituciones científicas no han ahorrado gastos para demostrar el alcance de una teoría que fue perfeccionada y publicada, durante la guerra, en el país de sus enemigos. Aun cuando la investigación de la influencia del campo gravitatorio del sol en los rayos de luz es un tema puramente objetivo, no puedo menos que expresar las gracias, de manera personal, a mis colegas ingleses por su trabajo. Sin esa labor es poco probable que se hubiera obtenido durante el curso de mi vida la comprobación de la más importante inferencia de mi teoría.

En física podemos diferenciar varias clases de teorías. La mayor parte de ellas son constructivas e intentan organizar un cuadro de *los* fenómenos más complejos a partir de materiales que provienen de un esquema formal relativamente simple, que sirve de punto de partida.

Así, la teoría cinética de los gases trata de reducir los procesos mecánico, térmico y de difusión al movimiento de las moléculas, o sea que intenta reproducirlos a partir de la hipótesis del movimiento molecular. Cuando decimos que hemos logrado comprender un grupo de procesos naturales, siempre queremos significar que hemos hallado una teoría constructiva que abarca el proceso en cuestión.

Junto con esta clase de teorías principales, existe un segundo tipo al que llamaré “teorías de principios”. En éstas se emplea el método analítico, no el sintético. Los elementos que configuran su base y punto de partida no se construyen por vía de hipótesis, sino que se descubren empíricamente; son características generales de procesos naturales, principios que dan origen a criterios formulados de modo matemático, que los distintos procesos o sus representaciones teóricas tendrán que satisfacer. La termodinámica, por ejemplo, por medios analíticos, a partir de la experiencia universalmente probada de

que el movimiento perpetuo es imposible, trata de deducir las condiciones necesarias que habrán de satisfacer los distintos hechos.

Las ventajas de la teoría constructiva son la integridad, la adaptabilidad y la claridad; en el caso de la teoría de principios, nos encontramos con las ventajas de la perfección lógica y la seguridad de los fundamentos.

La teoría de la relatividad pertenece a esta segunda clase. Para captar su naturaleza es necesario, en primer lugar, conocer los principios en los que está fundamentada. Sin embargo, antes de referirme a ellos, debo recordar que la teoría de la relatividad reúne dos elementos distintos: la teoría especial y la teoría general. La teoría especial, sobre la que se apoya la teoría general, se aplica a todos los fenómenos físicos, exceptuada sólo la gravitación. La teoría general ofrece la ley de la gravitación y sus relaciones con las otras fuerzas de la naturaleza.

Desde los tiempos de los antiguos griegos se sabe que, para describir el movimiento de un cuerpo, es preciso utilizar un segundo cuerpo al cual se ha de referir el movimiento del primero. El movimiento de un vehículo es considerado con referencia a la superficie de la Tierra, el de un planeta con respecto a la totalidad de las estrellas fijas visibles. En física, este cuerpo de referencia recibe el nombre de sistema de coordenadas. Las leyes mecánicas de Galileo y Newton, por ejemplo, sólo pueden ser formuladas con la ayuda de un sistema de coordenadas.

No obstante, el movimiento de este sistema de coordenadas no puede ser elegido de modo arbitrario. Para que las leyes de la mecánica sean válidas, tendrá que estar libre de rotación y aceleración. Un sistema de coordenadas admitido en mecánica se denomina "sistema inercial". El estado de movimiento de un sistema inercial, según la mecánica, no está, sin embargo, determinado unívocamente por la naturaleza. Por el contrario, todo sistema de coordenadas que se mueve uniformemente y en línea recta con respecto a un sistema inercial es, asimismo, un sistema inercial. Con el nombre de "principio de relatividad restringida", se indica la generalización de esta definición a cualquier fenómeno natural: es decir, que toda ley universal válida en relación con un sistema de coordenadas  $C$ , también ha de ser válida en relación con un sistema de coordenadas  $C'$ , siempre que éste esté dotado de un movimiento uniforme de traslación con respecto a  $C$ .

El segundo principio en que se apoya la teoría de la relatividad restringida es "el principio de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío". Este principio afirma que la luz en el vacío siempre tiene una determinada velocidad de propagación, independiente del estado de movimiento del observador o de la fuente de luz. La confianza que los físicos depositan en este principio surge de los éxitos obtenidos por la electrodinámica de Maxwell y Lorentz.

Estos dos principios están poderosamente apoyados por la experiencia, pero no parecen ser lógicamente conciliables. La teoría de la relatividad restringida, por fin, ha logrado unificarlos lógicamente, a través de una modifica-

ción de la cinemática, o sea mediante la doctrina de las leyes que relacionan el espacio y el tiempo (desde el punto de vista de la física). Se comprobó que hablar de la simultaneidad de dos hechos no tiene sentido sino con relación a un sistema de coordenadas dado y que el tamaño de los patrones de medida y la velocidad a que da vueltas el reloj dependen de su estado de movimiento con respecto del sistema de coordenadas.

Pero la antigua física, incluidas las leyes del movimiento de Galileo y Newton, no encajan en la cinemática relativista. De esta última han surgido condiciones matemáticas generales a las que deben adecuarse las leyes naturales, si los dos principios antes mencionados son correctos. La física ha tenido pues que adaptarse. En particular, los científicos han llegado a una nueva ley de movimiento para puntos de masa a grandes velocidades, que ha sido confirmada de un modo admirable en el caso de las partículas con carga eléctrica. El resultado más importante de la teoría de la relatividad restringida se refiere a las masas inertes de los sistemas corpóreos. Se ha determinado que la inercia de un sistema depende necesariamente de su contenido de energía y esto conduce en forma directa a la noción de que la masa inerte es energía latente. El principio de conservación de la masa pierde su independencia y se fusiona con el de conservación de la energía.

La teoría de la relatividad restringida, que es simplemente un desarrollo sistemático de la electrodinámica de Lorentz y Maxwell, apunta hacia más allá de sí misma. ¿La independencia de las leyes físicas del estado de movimiento del sistema de coordenadas ha de restringirse al movimiento uniforme de traslación de cada sistema de coordenadas? ¿Qué relación guarda la naturaleza con nuestros sistemas de coordenadas y su estado de movimiento? Si a fin de describir la naturaleza fuera necesario utilizar un sistema de coordenadas arbitrariamente introducido por nosotros, su estado de movimiento no tendría que estar sujeto a ninguna restricción. Las leyes tendrían que ser por completo independientes de esta elección (principio de la relatividad general).

Este principio de la relatividad general se ha establecido con cierta facilidad gracias a un hecho de la experiencia, conocido desde hace mucho tiempo: el peso y la inercia de un cuerpo se expresan por la misma constante (igualdad de la masa inerte y de la masa pesante). Imaginemos un sistema de coordenadas que mantiene un movimiento de rotación uniforme con respecto a un sistema inercial a la manera newtoniana. Las fuerzas centrífugas que se manifiestan en relación con este sistema, de acuerdo con las conclusiones de Newton, deben ser consideradas como efecto de la inercia. Pero estas fuerzas centrífugas son proporcionales a las masas de los cuerpos, tal como las fuerzas de la gravedad. ¿No sería posible en este caso considerar que el sistema de coordenadas está en reposo y que las fuerzas centrífugas son fuerzas gravitatorias? Esta interpretación parece muy clara, pero la mecánica clásica la prohíbe.

Esta rápida descripción deja entrever que una teoría de la relatividad general debe proporcionar las leyes de la gravitación y la perseverancia en es-

ta idea ha justificado nuestras esperanzas.

Pero el camino era más arduo de lo que habíamos supuesto, porque ha exigido el abandono de la geometría euclidiana; es decir que las leyes según las cuales los cuerpos sólidos pueden estar dispuestos en el espacio no concuerdan por completo con las leyes espaciales atribuidas a los cuerpos por la geometría euclidiana. A esto nos referimos al hablar de “curvatura del espacio”. Los conceptos fundamentales de “recta”, de “plano”, etcétera, pierden, por lo tanto, su significado preciso en física.

En la teoría de la relatividad general la ciencia del espacio y del tiempo, o cinemática, ya no se presenta como fundamento independiente del resto de la física. El comportamiento geométrico de los cuerpos y la marcha de los relojes dependen de los campos gravitatorios, que a su vez son producidos por la materia.

La nueva teoría de la gravitación, en lo que se refiere a principios, se diferencia considerablemente de la de Newton. Pero sus resultados prácticos concuerdan tan de cerca con los de la teoría de Newton que es difícil hallar criterios de diferenciación accesibles a la experiencia. Hasta el presente se han descubierto:

1. En la revolución de las elipses de las órbitas planetarias en torno al sol (confirmado en el caso de Mercurio).
2. En la curvatura de los rayos de luz por la acción de los campos gravitatorios (confirmado por las fotografías del eclipse solar de la expedición inglesa).
3. En un desplazamiento de las líneas espectrales hacia el extremo rojo del espectro en el caso de la luz transmitida a nosotros desde estrellas de considerable masa (no confirmado hasta el presente). \*\*

El atractivo fundamental de la teoría radica en el hecho de que es completa desde el punto de vista lógico. Si una sola de las conclusiones que se extraigan de ella resulta ser errada, tendremos que abandonarla, pues modificarla sin destruir toda su estructura parece ser imposible.

Que nadie suponga, sin embargo, que el importante trabajo de Newton puede ser invalidado por ésta o por cualquier otra teoría. Sus grandes y lúcidas ideas retendrán para siempre su significación única como fundamentos de toda nuestra moderna estructura conceptual dentro de la esfera de la filosofía natural.

*Nota:* Algunas de las afirmaciones aparecidas en su periódico y concierne a mi vida y mi persona tienen origen en la vívida imaginación del articulista. Aquí también encontramos una aplicación más del principio de la relatividad, para gozo del lector: hoy, en Alemania, se me describe como “sabio

alemán”, en tanto que en Inglaterra se dice que soy un “judío suizo”. Si mi destino me llevara a ser definido como una *bête noire*, me convertiría en un “judío suizo” para los alemanes y en un “sabio alemán” para los ingleses.\*\*\*

NOTAS

\*Escrito a petición del *The London Times*. Publicado el 28 de noviembre de 1919.

\*\*Este criterio ha sido confirmado posteriormente.

\*\*\*© ANTONI BOSCH, EDITOR, Barcelona. Publicado en Albert Einstein, *Mis ideas y Opiniones*, Barcelona, Antoni Bosch, Editor, 1980, pp. 19-23. Traducción de ANA GOLDAR. **teorema** agradece a ANTONI BOSCH, EDITOR, su amable permiso para reproducir aquí la traducción castellana de este artículo.