

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD CUMPLE CIEN AÑOS

Juan A. López Villanueva

1. Introducción

En el año 1905, un empleado de la oficina de patentes de Berna, Albert Einstein, con tan sólo veintiséis años, conseguía publicar tres artículos de gran importancia en el desarrollo de la Física: En el primero, titulado "Sobre el movimiento de partículas pequeñas suspendidas en un líquido estacionario, requerido por la teoría cinética molecular del calor" proporcionaba una explicación teórica del movimiento caótico llamado "browniano", observado en 1828 por el médico y botánico británico Robert Brown mientras analizaba al microscopio una suspensión de granos de polen. Con este artículo, Einstein establecía las bases del estudio de los procesos estocásticos. En el segundo artículo, titulado "Sobre un punto de vista heurístico respecto a la producción y transformación de la luz", explicaba el efecto fotoeléctrico y proponía una teoría cuántica de la luz, que se emite, absorbe y transmite en forma de paquetes de energía llamados cuantos. Y en el tercer artículo, titulado "Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles", establecía las bases de la teoría especial de la relatividad. Completó este artículo con un cuarto titulado "¿Depende la inercia de un cuerpo de la energía que contiene?", en el que extraía importantes consecuencias de los postulados de la teoría de la relatividad y demostraba que la energía y la masa eran equivalentes e intercambiables, obteniendo la famosa fórmula " $E=mc^2$ ", que se ha llegado a llamar "la ecuación del siglo XX", y cuyo significado explicaremos más adelante.

La comunidad científica ha reconocido a 1905 como un año especialmente productivo y, en conmemoración de su centenario, ha designado a 2005 "Año Internacional de la Física". Los editores de la Revista Contraluz no han querido permanecer ajenos a este hecho y han propuesto dedicar un artículo, dentro de su sección "Caída Libre", a divulgar los aspectos principales de la teoría de la relatividad. Aunque esta teoría no fue la única aportación importante de ese año, de hecho Albert Einstein recibió el Premio Nobel de Física en 1921 por su explicación del efecto fotoeléctrico, sí podemos afirmar que es la que ha alcanzado más relevancia posteriormente. A pesar de no ser especialista en esta materia, he aceptado el reto y he tratado de explicar, de la forma más simple que he sido capaz, cuáles fueron los aspectos revolucionarios que introdujo la teoría de Einstein y en qué medida modificaron la visión que se tenía del mundo físico a principios del siglo XX.

En este artículo nos centraremos en la llamada "relatividad especial, o restringida", que es como se denomina a la teoría propuesta por Einstein en 1905. Previamente comentaremos la situación en la que se encontraba la Física antes de esa fecha y los problemas que empezaron a surgir y que motivaron el replanteamiento de ciertos conceptos básicos que no habían sido puestos en duda durante siglos. Finalmente describiremos las ideas fundamentales en las que se basa la teoría de Einstein y las principales consecuencias que se deducen de ellas. Aunque la teoría de la relatividad es a veces poco intuitiva, y es difícil poder extraer sus resultados sin recurrir a las matemáticas, hemos procurado evitarlas totalmente, por lo que el lector encontrará que algunas de las conclusiones no están suficientemente argumentadas. En cualquier caso, por la extensión del artículo y las características de la revista, se entiende que no es el objetivo de este trabajo desarrollar la teoría, sino más bien describirla someramente. No obstante, conviene hacer saber a los lectores interesados que es posible encontrar textos en los que se pueden seguir las principales deducciones y analizar las consecuencias más importantes sin utilizar más formalismo matemático que el que conoce cualquier estudiante de bachillerato¹.

2. La Relatividad de Galileo

Después de un proceso que comenzó con los trabajos de Galileo Galilei (1564-1642), refutando algunas teorías erróneas de Aristóteles, y que culminó con la publicación en 1687 de los "Principios matemáticos de la filosofía natural" de Sir Isaac Newton, los fundamentos de la mecánica² habían quedado bien establecidos, de manera que a finales del siglo XIX, más de doscientos años después, nadie dudaba de su validez. Incluso hoy día, a pesar de las nuevas teorías que se han desarrollado a lo largo del siglo XX, la mayoría de los científicos seguimos pensando en términos clásicos.

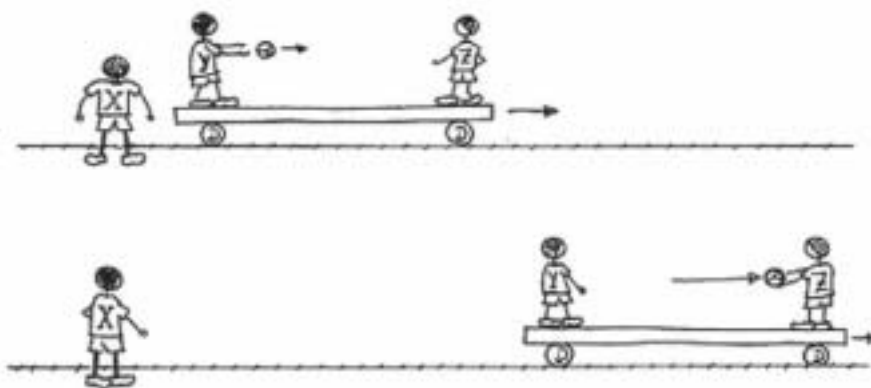


Figura 1

¹ Un ejemplo: I. I. Vorobiov, "La teoría de la relatividad en problemas", Editorial Mir, Moscú, 1990

² Mecánica: Parte de la física que estudia el movimiento de los cuerpos y las fuerzas que lo producen.

Antes de plantear las ideas relativistas, vamos a comenzar con un ejemplo simple que nos permita introducir algunos conceptos básicos. Consideremos la situación representada en la figura 1, en la cual se mueve una vagoneta con una velocidad constante mientras que el observador X, en reposo junto a la vía, la contempla.

Sobre la vagoneta tenemos a dos niños, llamados Y y Z, que juegan con una pelota. Si el niño Y la sostiene en su mano, sin lanzarla, para él la pelota estará en reposo, pero para el observador X la pelota se mueve junto con la vagoneta. Ahora el niño Y impulsa la pelota de manera que se aleje de él en dirección al niño Z (situación representada en la figura 1, arriba). Durante el tiempo que tarda la pelota en llegar al niño Z la vagoneta se ha alejado del observador X. Por tanto, con respecto al observador X, la pelota se ha desplazado la suma de la distancia que se ha alejado la vagoneta y la distancia que se ha movido la pelota dentro de ella (tal como se representa en la figura 1, abajo). La velocidad de desplazamiento de la pelota con respecto a X ha resultado ser la suma de la velocidad de la vagoneta y la que tenía la pelota con respecto al niño Y. La mecánica clásica supone que los tres observadores, X Y y Z, miden igual el espacio y el tiempo. La vía es un sistema de referencia con respecto al cual se puede analizar el movimiento, y la vagoneta es otro sistema de referencia que se mueve a velocidad constante con respecto a la vía. A los sistemas de referencia que se mueven con velocidad constante unos con respecto a otros se les denomina sistemas inerciales.

Si el niño Y del ejemplo anterior le aplica una fuerza constante a la pelota, ve que ésta se acelera, y que la aceleración que adquiere es proporcional a la masa de la pelota y a la fuerza que le ha aplicado. Esto queda bien explicado con las leyes de Newton. Si el observador X pudiera medir la aceleración del mismo objeto, llegaría a la misma conclusión. Este resultado se conoce como "principio de la relatividad de Galileo": si un sistema de referencia se mueve con velocidad constante con respecto a otro, las leyes de la mecánica son igualmente válidas en los dos sistemas.

Podríamos admitir que todos los movimientos son relativos: la pelota se mueve con respecto a la vagoneta, la vagoneta se mueve con respecto a la vía, la vía está fija en la Tierra pero se mueve con ella en su desplazamiento alrededor del Sol, también se desplaza el Sol con respecto a otros astros. Y desde otro punto de vista, el observador X observa que los niños Y y Z se mueven, pero si los niños miran en dirección a X, también observan que el sujeto X se va quedando atrás; por lo tanto, X también se mueve con respecto al sistema de referencia ligado a la vagoneta. Sin embargo, en el marco de la mecánica de Galileo y Newton se admitía la existencia de un espacio y un tiempo absolutos, y se distinguía entre movimiento relativo y movimiento absoluto. Literalmente, en una anotación de los "Principios matemáticos de la Filosofía Natural", Newton define: "I. El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye de una manera ecuable y sin relación alguna con nada externo, y se conoce también con el nombre de duración; el tiempo relativo, aparente y común es una medida sensible y externa de la duración por medio del movimiento, y se utiliza corrientemente en lugar del tiempo verdadero. II. El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece siempre similar e inmóvil. El espacio relativo es una dimensión o medida móvil de los espacios absolutos, que nuestros sentidos determinan de acuerdo con su posición con respecto a los cuerpos y que por lo común se toma como espacio inmóvil...IV.- El movimiento absoluto es la traslación de un cuerpo desde un lugar absoluto a otro, y movimiento relativo, la traslación desde un lugar relativo a otro."

3. La crisis de la Mecánica Clásica

A finales del siglo XIX, James Clerk Maxwell recogió las leyes de los fenómenos eléctricos y magnéticos elaboradas por Coulomb, Faraday y Ampère en un sistema de ecuaciones del que se deducía una simetría entre las ecuaciones de la electricidad y del magnetismo y se predecía la existencia de las ondas electromagnéticas³. Se admitía que estas ondas se propagaban con la velocidad de la luz, que es un caso particular de onda electromagnética, como vibraciones en el éter⁴, que debía entonces comportarse como un medio extremadamente rígido. Con la publicación de las ecuaciones de Maxwell en 1873, y la detección experimental de las ondas electromagnéticas por parte del alemán Heinrich Rudolph Hertz en 1888, se disponía ya de una teoría coherente, completa y confirmada, capaz de explicar los fenómenos electromagnéticos, cuya validez se sigue admitiendo en la actualidad salvo en la necesidad de disponer de un soporte material para la transmisión de las ondas.

Sin embargo, las ecuaciones de Maxwell le planteaban un problema serio a la mecánica: la forma de la ecuación de propagación de las ondas electromagnéticas se modifica si se pasa de un sistema de referencia a otro que se mueve a velocidad constante con respecto al primero, es decir, no sería la misma si la observa nuestro individuo X o si la miden los niños Y y Z de la figura 1. Las leyes del electromagnetismo no parecen obedecer, pues, al principio de relatividad de Galileo. Se produjo, pues, una de esas situaciones asimétricas que tanto disgustan a los físicos: la relatividad galileana era aplicable a la mecánica, para cuyas leyes todos los sistemas inerciales resultaban equivalentes, pero el electromagnetismo tenía un sistema de referencia privilegiado: aquel en el que el éter estaba en reposo.

Para ilustrar los problemas que suscitaba el éter podemos recurrir a una analogía con las ondas de sonido. Cuando vibran nuestras cuerdas vocales, la lámina de un tambor o de un altavoz, esa vibración se propaga al aire circundante y se transmite en forma de ondas de presión, esto es, como una sucesión de compresiones y enrarecimientos del aire. Esas ondas de presión llegan a nuestros tímpanos y excitan la señal nerviosa que nuestro cerebro interpreta como sonido. Podríamos plantearnos dos situaciones: en la primera de ellas producimos un sonido en el interior de un autobús con las ventanillas cerradas y en la segunda suponemos que viajamos en la parte trasera de un vehículo descapotable y le hablamos al conductor. En el primer caso, el aire del interior es arrastrado por el autobús y el sonido se transmite a través de ese aire estacionario con una velocidad de 340 metros por segundo, medida en el sistema de referencia que viaja con el autobús. En la segunda situación, el sonido se propaga también a través del aire, pero éste no es arrastrado por el vehículo sino que se va quedando atrás, como podemos comprobar por el viento que recibe nuestra cara. El sonido también se moverá a 340 metros por segundo, pero no con respecto al descapotable, sino con respecto a cualquier objeto fijo situado fuera de él, por ejemplo, con respecto a un

³ Véase el artículo "La naturaleza de la luz en la época del doctor Cerdá y Rico", *Contraluz*, n° 1, pp. 119-133, 2004

⁴ Las ondas electromagnéticas se denominan de diversas formas según su frecuencia de vibración: ondas de radio, microondas, rayos infrarrojos, luz, rayos X, etc. Los físicos del siglo XIX postularon la existencia del éter, que debía llenar todo el espacio, pues no admitían la propagación de ondas sin la existencia de un sustrato material que vibrara. Hoy se admite que las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío.

árbol situado al lado de la carretera. Como el vehículo va avanzando a velocidad muy inferior a 340 metros por segundo (que equivalen a 1224 kilómetros por hora), el sonido le llegará al conductor, pero con una velocidad menor, pues habrá que restar a los 340 metros por segundo la velocidad que lleva el coche.

La mecánica clásica se hacía un planteamiento igual al de nuestro ejemplo del sonido con respecto a la propagación de las ondas electromagnéticas en el éter. Puesto que había evidencias experimentales de que el éter no era arrastrado por la Tierra al moverse ésta en su órbita alrededor del Sol, y además ese éter no arrastrado era el sistema de referencia privilegiado para las ondas electromagnéticas, deberíamos ser capaces de apreciar el "viento de éter", similar al que notaríamos en nuestra cara en el vehículo descapotable. Para ello se propuso el siguiente experimento: se puede medir la velocidad de la luz en el sentido de avance de la Tierra en su órbita y compararla con la velocidad medida si se lanza el haz de luz en sentido perpendicular al de avance de la Tierra. En el segundo caso la velocidad de la luz apenas debería verse afectada por el movimiento de la Tierra, pero sí debería hacerlo en el primer caso, ya que cuando el rayo de luz avanza en el mismo sentido de la Tierra, el éter se va quedando atrás con respecto al receptor, y la velocidad de avance de la luz con respecto a la Tierra resulta ser menor. En cambio, si el rayo se mueve en sentido contrario al de la Tierra, el receptor se va acercando al rayo y la velocidad resultante es mayor. Comparando los tiempos de llegada de un haz de luz que se mueva en la dirección de avance de la Tierra en su órbita y de otro haz que se propague en dirección perpendicular a la de avance, se debería apreciar una diferencia, y de esa diferencia se debería poder deducir la velocidad absoluta de la Tierra con respecto al éter. Este fue el objetivo principal del cuidadoso experimento de Michelson y Morley, llevado a cabo en 1887, pero su resultado fue negativo: no se consiguió medir ninguna diferencia entre los tiempos de llegada de los dos rayos, el que avanza en la misma dirección que la Tierra y el que avanza perpendicularmente a ella. Todo mostraba que la velocidad de la luz era independiente de la dirección, y por tanto era independiente del estado de movimiento del sistema de referencia.

En un intento de salvaguardar los principios de la mecánica clásica, el prestigioso físico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) había sugerido la siguiente explicación para el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley: como las fuerzas de cohesión que unen a los átomos que componen los cuerpos materiales también es previsible que se propaguen a través del éter, no pueden permanecer ajenas al desplazamiento de éste. Por esa razón, cuando la Tierra avanza con respecto al éter, y con ella lo hace el instrumento de medida, las distancias entre los átomos se reducen y las longitudes de los cuerpos se contraen. Según Lorentz, la velocidad relativa de la luz al avanzar la Tierra sí que disminuye, tal como predice la mecánica clásica, pero también disminuye la longitud de la regla que se usa para medir las distancias en esa dirección. Por esa razón, al reducirse la distancia de la misma manera que lo hace la velocidad, no se aprecian diferencias en el tiempo de llegada de la luz. A esa reducción de las longitudes de los cuerpos materiales en la dirección de su movimiento, propuesta en 1895, diez años antes del famoso artículo de Einstein, se le conoce como contracción de Lorentz-Fitzgerald.

Pero, en conjunto y a pesar de esas explicaciones, el aparentemente compacto y bien construido edificio de la Física del siglo XIX estaba comenzando a agrietarse. Lo que en principio parecían "sólo unos pocos detalles por resolver", estaban empezando a plantear

problemas que atacaban a los propios fundamentos. Esta situación fue planteada de forma brillante por el matemático, físico, astrónomo y filósofo francés Jules Henri Poincaré (1854-1912) en una conferencia pronunciada en el Congreso Internacional de las Artes y las Ciencias de la Exposición Internacional de San Luis, en 1904. Poincaré comenzaba preguntándose lo siguiente: *"el objetivo y los métodos de la Física Matemática ¿se presentarán dentro de diez años ante nuestros sucesores inmediatos bajo la misma luz con que los vemos nosotros o, por el contrario, estamos llamados a ser testigos de una profunda transformación?"*. Poincaré planteaba lo insatisfactoria que le resultaba la idea de un éter estacionario, considerado como un sistema de referencia privilegiado con respecto al cual se podrían medir desplazamientos considerados en cierta manera como absolutos. Afirmaba que, con la hipótesis de un éter estacionario, el principio de la relatividad, *"que no sólo viene confirmado por nuestra experiencia cotidiana, sino que viene impuesto de modo irresistible sobre nuestro sano juicio, sin embargo, sale apaleado"*. No obstante, *"todos los intentos de medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter han llevado a resultados negativos. En esta ocasión la física experimental ha sido más leal al principio que la física matemática"*. Después de recorrer los distintos aspectos insatisfactorios que observaba en la Física, como los problemas que planteaba la propagación de las interacciones electromagnéticas a través del éter sobre el principio de acción y reacción de Newton, el cuestionamiento sobre la conservación de las masas, *"un principio que no se puede tocar sin trastornar toda la mecánica"*, concluía con unas afirmaciones casi proféticas: *"¿No deberíamos esforzarnos también por obtener una teoría más satisfactoria de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento? Es allí, en especial, donde se acumulan las dificultades. ... Tomemos, por tanto, la teoría de Lorentz, démosla vueltas en todos los sentidos, modifiquémosla poco a poco y quizá todo se arregle. Así, en lugar de suponer que los cuerpos en movimiento experimentan una contracción en el sentido del movimiento y que esta contracción es la misma independientemente de la naturaleza del cuerpo y de las fuerzas a que, por lo demás, están sometidos, ¿no podríamos hacer una hipótesis más simple y más natural?. Cabría imaginar, por ejemplo, que es el éter lo que se modifica al hallarse en movimiento con respecto al medio material que penetra, y que, una vez modificado, no transmite ya las perturbaciones con la misma velocidad en todas direcciones. ... O quizá debamos construir toda una nueva mecánica que hasta ahora sólo hemos logrado entrever y en la que, al aumentar la inercia con la velocidad, la velocidad de la luz se convertiría en un límite infranqueable. La mecánica ordinaria, más simple, persistiría en calidad de primera aproximación, pues seguiría siendo cierta para velocidades no demasiado grandes, de suerte que bajo la nueva dinámica seguimos encontrando la antigua"*.

La perspicacia de Poincaré fue tal que algunos autores han sugerido que la teoría de la relatividad de Einstein debería llamarse *"teoría de la relatividad de Poincaré"*, aunque fue realmente Einstein quien concretó esas propuestas. En 1904, Poincaré planteaba *"¿No deberíamos esforzarnos también por obtener una teoría más satisfactoria de la electrodinámica⁵ de los cuerpos en movimiento?"*, y en 1905 Albert Einstein publicaba su más conocido artículo precisamente con ese título: *"Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles"*. Describimos las ideas fundamentales de ese artículo en la siguiente sección.

⁵ La electrodinámica es la parte del electromagnetismo que se ocupa de los efectos de las cargas eléctricas en movimiento en general, y de los efectos de las corrientes eléctricas en particular.



Figura 2.- Albert Einstein en 1905.

4. Teoría de la Relatividad Especial

En el artículo citado, según las propias palabras de Albert Einstein, *"existen diversos hechos experimentales que obligan a sospechar que ni los fenómenos de la electrodinámica ni los de la mecánica poseen propiedades que se correspondan con las de reposo absoluto. Indican más bien que las mismas leyes de la electrodinámica y de la óptica son válidas en todos los sistemas de referencia para los que son ciertas las ecuaciones de la mecánica. Elevemos esta conjetura, cuyo contenido llamaremos de ahora en adelante Principio de la Relatividad, a la categoría de postulado, e introduzcamos además otro, cuya incompatibilidad con el primero es sólo aparente, a saber: que la luz se propaga siempre en el vacío con una velocidad independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor. Estos dos postulados bastan para obtener una teoría simple y coherente de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento basada en la teoría de Maxwell para los cuerpos estacionarios. La introducción de un éter luminífero resultará superflua en tanto en cuanto la concepción que aquí vamos a desarrollar no requiere un espacio absolutamente estacionario provisto de propiedades especiales"*.

Por tanto, la teoría de Einstein se basó en estos dos postulados: a) la validez de las leyes físicas en todos los sistemas de referencia que se encuentran en movimiento de traslación uniforme unos con respecto a otros, y b) la constancia de la velocidad de la luz en todos los sistemas de referencia. La velocidad de la luz es aproximadamente de 300000 kilómetros por segundo, de manera que tarda aproximadamente un segundo en recorrer la distancia que nos separa de la Luna y unos ocho minutos en llegarnos desde el Sol. A partir de estos dos postulados, Einstein deduce las siguientes consecuencias:

1) La contracción de longitudes: la longitud de una regla de medida que se encuentra en movimiento en un sistema de referencia es menor que la longitud de esa misma vara en un sistema que se mueva con ella.

Aunque la reducción de la longitud en el sistema móvil es justo la misma que predice la expresión de la contracción de Lorentz-Fitzgerald, conviene aclarar que Einstein no supone que se contrae la materia porque se acerquen sus átomos al modificarse las fuerzas entre ellos, sino que es la distancia geométrica la que cambia. Aunque el resultado matemático de ambas hipótesis sea el mismo, las hipótesis en sí son diferentes, como expresó en un agudo artículo nuestro filósofo José Ortega y Gasset⁶: *"Lorentz y Einstein, situados ante el mismo experimento, toman resoluciones opuestas. Lorentz, representando en este punto el viejo racionalismo, cree forzoso admitir que es la materia quien cede y se contrae... Einstein adopta la solución contraria. La geometría debe ceder; el espacio puro tiene que inclinarse ante la observación. Suponiendo una perfecta congruencia en el carácter, llevado Lorentz a la política, diría: perezcan las naciones y que se salven los principios. Einstein, en cambio, sostendría: es preciso buscar principios para que se salven las naciones, porque para eso están los principios."*

2) Dilatación del tiempo: el tiempo transcurrido entre dos sucesos que tienen lugar en un sistema en movimiento es mayor que el tiempo que transcurre entre los mismos sucesos si se mide con un reloj que se mueve con el sistema.

Esta segunda consecuencia ha dado mucho juego en la literatura y el cine de ciencia ficción, ya que de ella se deduce, por ejemplo, que si un astronauta viaja a 299000 kilómetros por hora con respecto a la Tierra durante un tiempo que, según nuestros relojes, dura diez años, para el astronauta han transcurrido solamente unos diez meses.

Si el tiempo se mide de forma diferente en los diferentes sistemas de referencia, deducimos que dos sucesos que sean simultáneos en un sistema pueden no serlo en otro, es decir, el concepto de simultaneidad también es relativo. Nos podemos plantear entonces la siguiente pregunta: Si en un sistema de referencia tienen lugar dos sucesos tales que el segundo se produzca después que el primero, ¿es posible que otro observador que se encuentre en movimiento a una velocidad muy alta vea los sucesos en orden inverso en el tiempo, es decir, vea el segundo suceso antes que el primero?. La respuesta que da la teoría de la relatividad es sí. ¿Es posible entonces que si en el primer sistema de referencia un niño tira una piedra y rompe un cristal, el observador móvil vea la rotura del cristal antes que el lanzamiento de la piedra?. La respuesta es no. Si eso fuera posible, invalidaría un principio que nos resulta difícil cuestionar: el principio de causalidad, que afirma que el efecto es siempre posterior a la causa. La teoría de la relatividad permite que el segundo observador vea los sucesos en orden inverso en el tiempo siempre que se cumpla una condición: desde el punto de vista del primer observador, los dos sucesos se han de producir en lugares distintos en el espacio, separados una distancia mayor que la que puede atravesar la luz en el intervalo de tiempo que transcurre entre ellos en ese sistema. Se salvaguarda así el principio de causalidad si se admite que ninguna acción se puede propagar a velocidad mayor

⁶ José Ortega y Gasset, "El sentido histórico de la teoría de Einstein", Revista de Occidente, vol III, pp. 231-242, 1947

que la de la luz. De esa manera, el primer suceso no puede ser causa del segundo. El segundo observador no puede ver el cristal roto antes de que se lance la piedra, porque la piedra no puede viajar a velocidad superior a la de la luz. Para mantener el principio de causalidad, cuya refutación no está dispuesta a admitir nuestra mente, la teoría de la relatividad extiende el límite impuesto por la velocidad de la luz a cualquier tipo de acción.

3) Otra consecuencia que se deduce de las hipótesis de Einstein es el crecimiento de la masa de un cuerpo al aumentar su velocidad. La masa tiende a hacerse infinita cuando la velocidad se acerca a la de la luz, por lo que cualquier cuerpo ofrece una inercia enorme al movimiento a velocidades próximas a ese valor límite. Eso significa que sólo pueden moverse a la velocidad de la luz aquellas partículas cuya masa en reposo es nula. Esas partículas son precisamente los corpúsculos de luz. El principio de conservación de la masa, desde que lo formulara el químico francés Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), estaba bien establecido en la Física prerrelativista. También era bien aceptado el principio de conservación de la energía. La teoría de la relatividad los reduce a uno sólo, que podríamos enunciar como un principio de conservación de la energía extendido, ya que atribuye a la masa un equivalente en energía según la famosa ecuación (la energía equivalente es el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz). Si se aplica una fuerza externa, a medida que el cuerpo gana velocidad, su masa va creciendo y por tanto crece su energía. La mayor energía cinética de un cuerpo que se mueve a mayor velocidad ya era un resultado clásico, pero la teoría de la relatividad plantea un resultado mucho más sorprendente: un cuerpo en reposo tiene una energía equivalente, y es posible la transformación de masa en energía. No se exige que se conserven la masa y la energía por separado, pero sí se ha de conservar la energía total que se calcula incluyendo la energía equivalente a la masa en reposo.

Lavoisier estableció que en toda reacción química la suma de las masas de los reactivos consumidos ha de igualar a la suma de las masas de los productos resultantes. Pero eso no ocurre en las reacciones nucleares: cuando un núcleo de un átomo de uranio se divide en dos núcleos más ligeros (como el bario y el kriptón), la suma de las masas de las partículas resultantes es algo menor que la masa del núcleo inicial, siendo la diferencia aproximadamente igual a la quinta parte de la masa de un protón, esto es, del orden de la milésima parte del núcleo inicial. Pero una pérdida de masa tan pequeña produce una energía enorme, como pudo comprobar experimentalmente el mundo entero el 6 de agosto de 1945: la bomba "Little Boy" lanzada sobre Hiroshima tenía un peso total de cuatro toneladas, del cual sólo una pequeñísima fracción correspondía al uranio. Se estima que liberó una energía equivalente a la explosión de unas 20000 toneladas de dinamita. En realidad, la primera comprobación experimental se había efectuado el 16 de julio de 1945, en una prueba preliminar con una bomba de menor potencia, en un desierto de Nuevo México. El general Thomas Farrell presenció el evento y escribió en su informe⁷: *"Los efectos bien podían ser calificados de inauditos, colosales, hermosos, extraordinarios y aterradores. Nunca antes había ocurrido un fenómeno artificial de tan enorme potencia. Todo el paisaje quedó iluminado por una luz cegadora de intensidad muchas veces superior a la del sol de mediodía. Era dorada, púrpura, violeta, gris y azul. Era aquella belleza con la que los grandes poetas sueñan"*.

⁷ A. McKay, "La construcción de la era atómica", Biblioteca Científica Salvat, Barcelona, 1986.

Resumiendo, el estado de movimiento hace que se alteren las longitudes, los tiempos y las masas. Nos planteamos entonces: ¿cuál es el factor por el cual hay que dividir las longitudes de los cuerpos que se desplazan con respecto al sistema de observación, multiplicar la masa de esos cuerpos y el tiempo de los fenómenos que tienen lugar en ellos? Pues resulta ser el mismo para las tres magnitudes. Habíamos prometido no usar expresiones matemáticas en este artículo, pero confiamos en que los lectores nos permitan escribir al menos ésta. Ese factor es:

$$\sqrt{1-v^2/c^2}$$

(v es la velocidad del sistema de referencia y c es la velocidad de la luz). No obstante, para aquellos lectores que no estén habituados a deducir las consecuencias de una ecuación con sólo observarla, las ilustramos en la tabla de la figura 3. En la primera fila encontramos unos datos de referencia en reposo, y en las demás filas podemos observar la modificación de esas magnitudes a diferentes velocidades.

Velocidad	longitud	tiempo	masa
0	1000 metros	1000 segundos	1000 gramos
13000 Km/ s	999 metros	1001 segundos	1001 gramos
100000 Km/ s	943 metros	1061 segundos	1061 gramos
200000 Km/ s	745 metros	1342 segundos	1342 gramos
250000 Km/ s	553 metros	1809 segundos	1809 gramos
290000 Km/ s	256 metros	3906 segundos	3906 gramos
295000 Km/ s	182 metros	5500 segundos	5500 gramos

Figura 3

De los resultados de la tabla se deduce que es necesaria una velocidad de 13000 kilómetros por segundo para que las distintas magnitudes se modifiquen en una milésima parte. Pero esa velocidad es muy superior a la de todos los objetos que nos rodean. Como ejemplo, el Concorde, que es el avión más rápido construido por el hombre, conseguía una velocidad máxima de 2180 kilómetros por hora, que equivalen a sólo unos 606 metros por segundo; aunque esta velocidad es más del doble de la velocidad del sonido a la altitud a la que solía volar el Concorde, es extremadamente pequeña si se compara con la de la luz, de manera que una longitud como la del propio avión sólo se reduciría en una magnitud comparable al tamaño de un átomo. La velocidad de la Tierra en su órbita alrededor del Sol es bastante mayor, llegando a alcanzar unos 30,3 kilómetros por segundo (unas cincuenta veces mayor que la del Concorde), pero todavía demasiado pequeña para que se noten los efectos relativistas. Una longitud de un kilómetro tan sólo se contraería en unos 5 micrómetros a esa velocidad, esto es, el tamaño de una bacteria, y el diámetro de la Tierra, que es de unos 12700 kilómetros, se contraería en unos seis centímetros. Es evidente que los efectos relativistas se escapan de nuestra intuición y que el mundo que nos rodea puede seguir siendo interpretado mediante la mecánica de Newton. Sin embargo, esos efectos han de ser tenidos en cuenta en el movimiento de las partículas elementales, que sí se consiguen acelerar hasta alcanzar velocidades próximas a la de la luz. De forma indirecta, también observamos los efectos relativistas a través de algunos fenómenos físicos cotidianos como el magnetismo.

Finalmente, completamos nuestra descripción de las consecuencias de la teoría de la relatividad con un comentario sobre las posibles diferencias entre relatividad y relativismo: Al extender el principio de relatividad de Galileo a todas las leyes físicas, Einstein destroza el concepto de espacio y tiempo absolutos. El tiempo y el espacio se miden de forma diferente según el estado de movimiento del observador. Sin embargo, esta relatividad no tiene por qué considerarse como relativismo filosófico. Es cierto que no existen sistemas de referencia privilegiados, pero en cambio surgen conceptos absolutos: las propias leyes físicas. Antes de la teoría de la relatividad algunas leyes físicas tenían que modificarse al cambiar de sistema de referencia. Después de ella, las leyes físicas adquieren una validez universal, aunque para ello deba cambiar la geometría del espacio-tiempo.

5. Un ejemplo numérico

Podemos ilustrar las dos primeras consecuencias de la teoría de la relatividad, la contracción de longitudes y la dilatación del tiempo, con un ejemplo sencillo con datos numéricos para satisfacer a aquellos lectores interesados. El ejemplo será similar al de la figura 1, pero con otros actores y en otras circunstancias en las cuales se van a alcanzar velocidades próximas a la de la luz. Aquellos lectores que sólo estén interesados en una visión menos detallada, o que prefieran no "hacer cuentas" en este momento, pueden saltarse este apartado y pasar al siguiente.

Consideremos la situación de la figura 4. Arriba, el observador X ve pasar ante sus ojos una nave que se mueve a 200000 kilómetros por segundo (¡velocidad enorme para nuestra tecnología actual!). En el instante en el que eso sucede, el pasajero Y de la nave lanza un haz de luz, por ejemplo mediante un emisor láser acoplado al vehículo, dirigido a un asteroide situado en la dirección de su movimiento a una distancia que, según X, es de 600000 kilómetros.



Figura 4

El observador X mide el tiempo que tarda el haz de luz en alcanzar el asteroide y obtiene el valor 2 segundos, tal como se espera si se divide la distancia de 600000 kilómetros por la velocidad de la luz. Durante esos dos segundos la nave ha avanzado 400000 kilómetros y se encuentra a 200000 kilómetros del asteroide (figura 4, abajo). Pero desde la nave se tiene otra visión. El pasajero Y ve acercarse al asteroide a una velocidad de 200000 kilómetros por segundo. La distancia entre el asteroide y el observador X es móvil para el pasajero de la nave y no es de 600000 kilómetros sino de 447216 kilómetros, ya que se queda multiplicada por 0,74536 de acuerdo con la contracción de Lorentz-Fitzgerald para la velocidad que estamos considerando (esta cifra ya se ha utilizado en la obtención de los datos mostrados en la tabla de la figura 3). Para el pasajero Y, la luz también se mueve a 300000 kilómetros por segundo, pero como el asteroide se le va acercando, lo alcanzará en un tiempo de 0,894 segundos. En ese tiempo el asteroide se habrá aproximado hasta una distancia de 268327 kilómetros. Pero si el haz láser hace un agujero o destruye el asteroide, ¿en qué instante lo hará?, ¿2 segundos o 0,894 segundos después de salir el rayo de la nave?. Pues resulta que los dos tiempos son correctos, porque el tiempo no transcurre igual de rápido en los dos sistemas de referencia.

Supongamos ahora que el asteroide se comporta como un espejo y refleja el haz de luz hacia la nave. El observador X ve que la nave se va acercando hacia el haz láser reflejado, a medida que éste retrocede. En el instante en el que se reflejó la luz, la nave se encontraba a 200000 kilómetros del asteroide. Cuando el haz de luz impacta con la nave, han transcurrido 0,4 segundos más, los necesarios para que la nave avance 80000 kilómetros y la luz retroceda 120000 kilómetros. Según el observador X, desde que la luz sale del láser hasta que impacta en la nave, después de haberse reflejado, el pasajero Y ha viajado 480000 kilómetros, la luz ha recorrido 720000 kilómetros y han transcurrido 2,4 segundos. Según el pasajero Y de la nave, cuando la luz se refleja en el asteroide, éste se encuentra a 268327 kilómetros de distancia, por lo que el haz láser ha de recorrer otros 268327 kilómetros de regreso. El tiempo total empleado para ello es el doble de 0,894 segundos, esto es, 1,788 segundos. El mismo suceso, a saber, la salida y llegada a la nave del haz de luz, visto por el observador en el que se produce ese suceso (el pasajero B de la nave) dura 1,788 segundos, y visto por el observador A dura 2,4 segundos. En efecto, según la teoría de la relatividad, es esperable que el tiempo del suceso que se produce en el sistema de referencia móvil sea mayor (esté dilatado) si lo mide el observador que se encuentra en el sistema de referencia fijo, y si lo mide el observador ligado a la nave obtendrá un valor menor, precisamente en el factor 0,74536 mencionado anteriormente, que es el que corresponde a la velocidad de desplazamiento de 200000 kilómetros por segundo.

6. Teoría de la Relatividad General

Aunque comenzamos este artículo anticipando que nos íbamos a limitar a la teoría de la relatividad restringida, no podríamos terminarlo sin incluir al menos unas frases sobre la teoría de la relatividad generalizada, a la que dedicó Albert Einstein la mayor parte de sus esfuerzos a partir de 1916.

Una de las consecuencias de la teoría discutida en la sección anterior es que ninguna acción se puede propagar a mayor velocidad que la luz, y esto ha de incluir a la atracción

gravitatoria. Este resultado plantea serias dificultades a la teoría de la gravitación universal de Newton. Por otra parte, Einstein llamó la atención sobre la igualdad de las masas gravitatoria e inercial: según la teoría de la gravitación universal, la fuerza con la que atrae la Tierra a un cuerpo situado próximo a su superficie es proporcional a la masa del cuerpo. Llamamos "masa gravitatoria" a esta masa. Si se aplica una fuerza a un cuerpo, la aceleración que adquiere es inversamente proporcional a la masa. Llamamos "masa inercial" a esta característica del cuerpo. Experimentalmente se observa que la masa inercial coincide con la masa gravitatoria, por lo que la aceleración de un cuerpo sometido a la acción de la gravedad resulta ser independiente de su masa. Según Einstein, la mecánica clásica no justifica la igualdad de las dos masas de forma satisfactoria. Se hace necesaria una teoría que extienda la relatividad a los sistemas de referencia no inerciales, esto es, los que se desplazan con movimientos acelerados entre sí. Einstein enunció el llamado "principio de equivalencia", según el cual los efectos locales del campo gravitatorio son indistinguibles de los que produciría un campo de inercia. En otras palabras: si nos encontramos en el interior de un ascensor que se eleva con un movimiento uniformemente acelerado, notamos una fuerza que nos empuja hacia el suelo, similar a la que observaríamos si el ascensor estuviera en reposo y aumentara la fuerza de la gravedad. Entonces, ¿cómo podría distinguir un observador situado dentro del ascensor si la fuerza que lo fija al suelo se debe a un campo gravitatorio o a un movimiento uniformemente acelerado del ascensor en una región del espacio en la que no existiera campo gravitatorio?. Para responder a esta pregunta, Einstein e Infeld plantearon el siguiente argumento : Supongamos que en una pared lateral del ascensor existe un pequeño agujero por el que entra un rayo de luz, y que somos capaces de detectar pequeñísimas desviaciones de ese rayo. Podríamos pensar entonces: si el ascensor se eleva con aceleración uniforme, en el tiempo que transcurre desde que entra el rayo por el agujero hasta que alcanza la pared opuesta, el ascensor habrá subido sin arrastrar al rayo de luz, por lo que el punto en el que alcanza la pared opuesta estará un poco más bajo que el agujero por el que ha entrado. Es como si el rayo de luz se hubiera curvado. Sin embargo, si el ascensor estuviera en reposo, como el rayo es imponderable, no se vería afectado por el campo gravitatorio y no se curvaría. De esa manera podría distinguir el observador interior las dos situaciones. Pero el principio de equivalencia afirma que esas dos situaciones son indistinguibles, por lo que algo ha de fallar en este razonamiento. El error radica en suponer que la luz es imponderable: al tener energía tiene masa (aunque no la tendría en reposo, si es que podemos hablar del estado de reposo para la luz). Einstein propuso que la deformación del espacio que producen los cuerpos de gran masa también afecta a las trayectorias de los rayos de luz, que deben curvarse ante la presencia de cuerpos de gran masa como los astros celestes, y sugirió que se comprobara este hecho durante un eclipse de Sol, observando si se desvía la luz procedente de una estrella próxima al pasar junto a él. El físico británico Arthur Stanley Eddington verificó esta predicción el 29 de Mayo de 1919, constituyendo una de las tres más famosas confirmaciones experimentales de la teoría general de la relatividad.

⁸ A. Einstein, L. Infeld, "La Evolución de la Física", Biblioteca Científica Salvat, Barcelona, 1986

Para terminar este artículo, no quisiera haber dejado alguna duda en los lectores sobre la validez de las leyes de Newton de la mecánica clásica y de la gravitación universal. Estas leyes siguen siendo válidas dentro de su campo de aplicación, ya que constituyen un caso particular de la teoría de la relatividad, que se reduce a ellas cuando tratamos con cuerpos que se mueven a velocidades muy inferiores a la de la luz. Las leyes clásicas son matemáticamente más simples que las relativistas, pero las relativistas son más universales por lo que proporcionan una visión más simple de la naturaleza, como bien expresaron Einstein e Infeld: *"aun cuando parezca paradójico, podríamos decir: la física moderna es más simple que la física clásica y parece, sin embargo, más difícil y complicada. Cuanto más simple es nuestra imagen del mundo exterior y cuanto mayor es el número de hechos que abarca, con tanta mayor fuerza refleja en nuestra conciencia la armonía del Universo"*.