

**E**l hecho de que la luz viaje a velocidad finita, aunque muy elevada, fue descubierto por vez primera en 1676 por el astrónomo danés Ole Christensen Roemer. Si observamos las lunas de Júpiter advertiremos que de vez en cuando desaparecen de nuestra vista porque pasan por detrás del planeta gigante. Estos eclipses de las lunas de Júpiter deberían producirse a intervalos regulares, pero Roemer observó que no estaban espaciados con la regularidad esperable. ¿Se aceleraban y frenaban las lunas en sus órbitas? Roemer proponía otra explicación.

Si la luz viajara con velocidad infinita, en la Tierra veríamos los eclipses a intervalos regulares, exactamente en el mismo momento en que se producen, como los tics de un reloj cósmico. Como la luz recorrería instantáneamente cualquier distancia, esta situación no cambiaría si Júpiter se acercara o alejara de la Tierra.

Imaginemos, en cambio, que la luz viaja con velocidad finita. Entonces veremos cada eclipse un cierto tiempo después de haberse producido. Este retraso depende de la velocidad de la luz y de la distancia de Júpiter respecto a la Tierra. Si ésta no variara, el retraso sería el mismo para todos los eclipses. Sin embargo, a veces Júpiter se acerca a la Tierra: en este caso, la «señal» de cada eclipse sucesivo tendrá cada vez menos distancia que recorrer, y llegará a la Tierra progresivamente antes que si Júpiter hubiera permanecido a una distancia constante. Por la misma razón, cuando Júpiter se esté alejando de la Tierra, veremos que los eclipses se van retrasando progresivamente respecto de lo que se esperaba. El grado de avance o retraso de esta llegada depende del valor de la velocidad de la luz y, por ello, nos permite medirla. Esto es lo que hizo Roemer: observó que los eclipses de las lunas de Júpiter se avanzaban en las épocas del año en que la Tierra se estaba acercando a la órbita de Júpiter, y se retrasaban cuando la Tierra se estaba separando de ella, y utilizó esta diferencia para calcular la velocidad de la luz. Sus mediciones de la distancia entre la Tierra y Júpiter, sin embargo, no fueron demasiado precisas, de manera que su valor para la velocidad de la luz fue de 225 000 kilómetros por segundo, en lugar del moderno valor de 300 000 kilómetros por segundo. Sin embargo, la hazaña de Roemer, no sólo al demostrar que la luz viaja a velocidad finita, sino también al medir esta velocidad, fue notable, habiéndose producido, como se produjo, once años antes de la publicación de los *Principia Mathematica* de Newton.

Hasta 1865 no se dispuso de una teoría apropiada de la velocidad de la luz; ese año el físico británico James Clerk Maxwell logró unificar las teorías parciales que habían sido utilizadas hasta entonces para describir las fuerzas de la electricidad y el magnetismo. Las ecuaciones de Maxwell predecían la existencia de perturbaciones de tipo ondulatorio de lo que denominó campo electromagnético, y que éstas viajarían con una velocidad fija, como ondas en un estanque. Cuando calculó esta velocidad, ¡halló que coincidía exactamente con la velocidad de la luz! Actualmente sabemos que las ondas de Maxwell son visibles al ojo humano siempre y cuando tengan una longitud de onda comprendida entre cuatrocientas y ochocientas millonésimas de milímetro (la longitud de onda es la distancia entre crestas sucesivas de la onda).

Ondas con longitud de onda menores que la luz visible son conocidas ahora como ultravioletas, rayos X y rayos gamma. Ondas con longitudes de onda mayores son las llamadas radioondas (de un metro o más), microondas (unos pocos centímetros), o infrarrojos (menores de una diezmilésima de centímetro, pero mayores que el dominio visible).

Las consecuencias de la teoría de Maxwell de que las ondas luminosas o las ondas de radio viajaban con una velocidad fija eran difíciles de conciliar con la teoría de Newton, ya que, si no existe un patrón absoluto de reposo, no puede existir un acuerdo universal sobre la velocidad de un objeto. Para entender por qué, imaginemos otra vez que estamos jugando a ping-pong en el tren. Si lanzamos la pelota hacia adelante con una velocidad que, según nuestro oponente, es de 10 kilómetros por hora, esperaríamos que un observador quieto en el andén viera que la pelota se mueve a 100 kilómetros por hora: los 10 kilómetros por hora de la velocidad con respecto al tren, más los 90 kilómetros por hora con que suponemos que éste se mueve respecto al andén. ¿Cuál es la velocidad de la pelota: 10 kilómetros por hora o 100 kilómetros por hora? ¿Cómo la definimos? ¿Con respecto al tren? ¿Con respecto a la Tierra? A falta de un patrón absoluto de reposo, no le podemos asignar una velocidad absoluta. Podría afirmarse igualmente que la misma pelota tiene cualquier velocidad, según el sistema de referencia respecto al que se mida. Según la teoría de Newton, lo mismo debería ocurrir con la luz. Así pues, ¿qué significa en la teoría de Maxwell que las ondas de luz viajan a una cierta velocidad fija?

Para conciliar la teoría de Maxwell con las leyes de Newton, se sugirió la existencia de una sustancia denominada «éter» que estaría presente por doquier, incluso en las extensiones del espacio «vacío». La idea del éter tenía un cierto atractivo adicional para los científicos, que sentían que de todas maneras, así como las ondas del agua necesitan agua o las ondas del sonido necesitan aire, las ondas de la energía electromagnética debían requerir algún medio que las transportara. Según este punto de vista, las ondas de luz viajaban en el éter de igual modo que las ondas del sonido viajan por el aire, y su «velocidad» deducida a partir de las ecuaciones de Maxwell debería ser, pues, medida respecto al éter. Según esto, diferentes observadores verían que la luz se les acerca a diferentes velocidades, pero la velocidad de la luz con respecto al éter se mantendría fija. Esta idea podía ponerse a prueba. Imaginemos la luz emitida por alguna fuente y que, según la teoría del éter, viaja a través de éste con la velocidad de la luz. Si nos desplazamos hacia ella por el éter, la velocidad con que nos acercamos a ella debería ser la suma de su velocidad respecto al éter más nuestra velocidad respecto al éter. La luz se aproximaría más rápido que si, digamos, no nos moviéramos, o nos moviéramos en otra dirección. Aun así, como la velocidad de la luz es tan grande en comparación con las velocidades a las que nos podemos mover, esta diferencia de velocidad sería un efecto muy difícil de medir.

En 1887, Albert Michelson (que sería posteriormente el primer norteamericano en

recibir el premio Nobel de física) y Edward Morley llevaron a cabo un experimento muy cuidadoso y difícil en la escuela Case de ciencias aplicadas de Cleveland. Pensaron que, como la Tierra gira alrededor del Sol a una velocidad de casi cuarenta kilómetros por segundo, su laboratorio se movía a una velocidad relativamente elevada respecto al éter. Naturalmente, nadie sabía en qué dirección ni con qué velocidad, ya que el éter se podría estar moviendo con respecto al Sol. Pero repitiendo el experimento en distintas épocas del año, cuando la Tierra ocupa diferentes posiciones a lo largo de su órbita, podríamos esperar descubrir este factor desconocido. Así, Michelson y Morley idearon un experimento para comparar la velocidad de la luz medida en la dirección del movimiento de la Tierra a través del éter (cuando nos movemos hacia la fuente) con la velocidad de la luz perpendicularmente a dicho movimiento (cuando no nos acercamos ni alejamos de la fuente). Y, para su sorpresa, comprobaron que ¡la velocidad en ambas direcciones era la misma!

Entre 1887 y 1905 se sucedieron diversos intentos de salvar la teoría del éter. El más notable fue el del físico holandés Hendrik Lorentz, quien intentó explicar el resultado del experimento de Michelson-Morley en función de objetos que se contraían y relojes que se ralentizaban al moverse respecto al éter. Sin embargo, en un célebre artículo de 1905, un empleado entonces desconocido de la oficina suiza de patentes, Albert Einstein, hizo notar que la idea misma de un éter resultaba innecesaria, siempre y cuando uno estuviera dispuesto a abandonar la idea de un tiempo absoluto (en seguida veremos por qué). Pocas semanas más tarde, un importante matemático francés, Henri Poincaré, hizo una propuesta parecida. Los argumentos de Einstein estaban más próximos a la física que los de Poincaré, quien contemplaba este problema como una cuestión meramente matemática y que, hasta el día de su muerte, rehusó aceptar la interpretación de Einstein de la teoría.

El postulado fundamental de este último de la teoría de la relatividad, como fue llamada, establecía que las leyes de la ciencia deben ser las mismas para todos los observadores que se mueven libremente, sea cual sea su velocidad. Esto era cierto para las leyes de Newton, pero ahora Einstein extendía la idea para incluir la teoría de Maxwell. En otras palabras, como la teoría de Maxwell afirma que la velocidad de la luz tiene un valor dado, cualquier observador en movimiento libre debe medir el mismo valor, sea cual sea la velocidad con que se acerque o se aleje de la fuente. Esta sencilla idea ciertamente explicaba, sin recurrir al éter ni a ningún otro sistema de referencia privilegiado, el significado de la velocidad de la luz en las ecuaciones de Maxwell, pero también tenía algunas consecuencias notables y a menudo contraintuitivas.

Por ejemplo, la exigencia de que todos los observadores deban obtener la misma velocidad de la luz nos obliga a cambiar nuestro concepto de tiempo. En relatividad, los observadores en el tren y en el andén discreparían sobre la distancia que ha recorrido la luz y, como la velocidad es la distancia dividida por el tiempo, la única

manera para que pudieran coincidir en el valor de la velocidad de la luz sería que discreparan en el tiempo transcurrido. En otras palabras, ¡la teoría de la relatividad puso fin a la idea de un tiempo absoluto! Parece que cada observador debe tener su propia medida del tiempo, indicada por un reloj que se moviera consigo, y que relojes idénticos llevados por observadores diferentes no tendrían por qué coincidir.

En relatividad no hay necesidad de introducir la idea de un éter, cuya presencia, de todos modos, no puede ser detectada, como demostró el experimento de Michelson-Morley. En lugar de ello, la teoría de la relatividad nos obliga a cambiar fundamentalmente nuestras ideas de espacio y tiempo. Debemos aceptar que el tiempo no está completamente separado del espacio, ni es independiente de éste, sino que se combina con él para formar una entidad llamada espacio-tiempo. Estas ideas no resultan fáciles de asumir, ni tan siquiera por la comunidad de los físicos, por lo que transcurrieron años hasta que la relatividad fue universalmente aceptada. Esta aceptación constituye el mejor homenaje a la imaginación de Einstein, a su capacidad para concebir estas ideas, y a su confianza en la lógica, que le llevó a examinar implacablemente todas las consecuencias, por extrañas que parecieran las conclusiones hacia las que le conducía.

Todos sabemos, por experiencia, que es posible describir la posición de un punto en el espacio mediante tres números, o coordenadas. Por ejemplo, podemos decir que un punto en una habitación está a dos metros de una pared, un metro de otra y metro y medio del suelo. O bien podríamos especificar que un punto está a una cierta latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar. Tenemos libertad para elegir tres coordenadas cualesquiera que resulten adecuadas, aunque sólo tengan un dominio de validez limitado. No resultaría práctico determinar la posición de la Luna en función de kilómetros al norte y al este de Piccadilly Circus y en metros sobre el nivel del mar: es mejor describirla en función de la distancia al Sol, la distancia al plano de las órbitas de los planetas, y el ángulo formado por la línea que la une con el Sol y la línea que une a éste con una estrella cercana, como Próxima Centauri. Ni siquiera estas coordenadas resultarían útiles para describir la posición del Sol en nuestra galaxia o la posición de ésta en el grupo local de galaxias. De hecho, se puede describir todo el universo en función de una colección de retazos que se solapan, en cada uno de los cuales se puede utilizar un conjunto diferente de tres coordenadas para especificar la posición de los puntos.

En el espacio-tiempo de la relatividad, cualquier suceso, es decir, cualquier cosa que ocurra en un punto particular del espacio y en un instante particular del tiempo, puede ser especificado mediante cuatro números o coordenadas. De nuevo, la elección de coordenadas es arbitraria; se puede utilizar cualquier conjunto bien definido de tres coordenadas espaciales y cualquier medida del tiempo. Pero en la relatividad no existe una diferencia real entre coordenadas espaciales y temporales, de igual modo que tampoco existe entre dos coordenadas espaciales cualesquiera. Uno podría escoger un nuevo conjunto de coordenadas en que, digamos, la primera

coordenada espacial fuera una combinación de las dos primeras coordenadas espaciales del sistema antiguo. Así, en lugar de medir la posición de un punto de la Tierra en kilómetros al norte y al este de Piccadilly, podríamos utilizar kilómetros al noreste y al noroeste de Piccadilly. Análogamente, podríamos utilizar una nueva coordenada temporal que fuera la antigua (en segundos) más la distancia (en segundosluz) al norte de Piccadilly.

Otra de las famosas consecuencias de la relatividad es la equivalencia entre masa y energía, que se resume en la célebre ecuación de Einstein  $E = mc^2$  (donde  $E$  es la energía,  $m$  la masa y  $c$  la velocidad de la luz). Debido a la equivalencia entre masa y energía, la energía de un objeto material debida a su movimiento contribuirá así a su masa; en otras palabras, hará más difícil incrementar su velocidad. Este efecto sólo es realmente significativo para objetos que se mueven a velocidad próxima a la de la luz. Por ejemplo, al diez por 100 de la velocidad de la luz, la masa de un objeto sólo es un 0,5 por 100 mayor que en reposo, mientras que al noventa por 100 de la velocidad de la luz sería más del doble de la masa normal en reposo. A medida que un objeto se aproxima a la velocidad de la luz, su masa aumenta más rápidamente, de manera que seguirlo acelerando cada vez cuesta más energía. Según la teoría de la relatividad, un objeto, de hecho, nunca puede alcanzar la velocidad de la luz, porque su masa se haría infinita y, por la equivalencia entre masa y energía, se necesitaría una cantidad infinita de energía para hacerle alcanzar dicha velocidad. Esta es la razón por la cual, según la relatividad, cualquier objeto normal está condenado a moverse para siempre con velocidades inferiores a la de la luz. Sólo la luz, u otras ondas que no tengan masa intrínseca, puede moverse a la velocidad de la luz.

La teoría de la relatividad de Einstein de 1905 es llamada «relatividad especial». En efecto, aunque resultaba muy satisfactoria para explicar que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores y qué ocurre cuando las cosas se mueven a velocidades próximas a la de la luz, devenía contradictoria con la teoría newtoniana de la gravedad. La teoría de Newton establece que, en cada instante, los objetos se atraen entre sí con una fuerza que depende de la distancia entre ellos en ese mismo instante. Ello significa que si desplazáramos uno de los objetos, la fuerza sobre el otro cambiaría instantáneamente. Si, por ejemplo, el Sol desapareciera súbitamente, la teoría de Maxwell nos dice que la Tierra no quedaría a oscuras hasta unos ocho minutos después (ya que éste es el tiempo que tarda la luz del Sol en llegar hasta nosotros), pero, según la teoría de la gravedad de Newton, la Tierra dejaría inmediatamente de notar la atracción del Sol y saldría de su órbita. El efecto gravitatorio de la desaparición del Sol, pues, nos llegaría con velocidad infinita, y no con la velocidad de la luz o alguna velocidad inferior, como lo exigía la teoría especial de la relatividad. Entre 1908 y 1914, Einstein hizo un cierto número de ensayos infructuosos para formular una teoría de la gravedad que resultara coherente con la relatividad especial. Al final, en 1915, propuso una teoría todavía más revolucionaria, que actualmente llamamos la teoría general de la relatividad.