

## Capítulo 2

### ESPACIO Y TIEMPO

Nuestras ideas actuales acerca del movimiento de los cuerpos se remontan a Galileo y Newton. Antes de ellos, se creía en las ideas de Aristóteles, quien decía que el estado natural de un cuerpo era estar en reposo y que éste sólo se movía si era empujado por una fuerza o un impulso. De ello se deducía que un cuerpo pesado debía caer más rápido que uno ligero, porque sufría una atracción mayor hacia la tierra.

La tradición aristotélica también mantenía que se podrían deducir todas las leyes que gobiernan el universo por medio del pensamiento puro: no era necesario comprobarlas por medio de la observación. Así, nadie antes de Galileo se preocupó de ver si los cuerpos con pesos diferentes caían con velocidades diferentes. Se dice que Galileo demostró que las anteriores ideas de Aristóteles eran falsas dejando caer diferentes pesos desde la torre inclinada de Pisa. Es casi seguro que esta historia no es cierta, aunque lo que sí hizo Galileo fue algo equivalente: dejó caer bolas de distintos pesos a lo largo de un plano inclinado. La situación es muy similar a la de los cuerpos pesados que caen verticalmente, pero es más fácil de observar porque las velocidades son menores. Las mediciones de Galileo indicaron que cada cuerpo aumentaba su velocidad al mismo ritmo, independientemente de su peso. Por ejemplo, si se suelta una bola en una pendiente que desciende un metro por cada diez metros de recorrido, la bola caerá por la pendiente con una velocidad de un metro por segundo después de un segundo, de dos metros por segundo después de dos segundos, y así sucesivamente, sin importar lo pesada que sea la bola. Por supuesto que una bola de plomo caerá más rápida que una pluma, pero ello se debe únicamente a que la pluma es frenada por la resistencia del aire. Si uno soltara dos cuerpos que no presentasen demasiada resistencia al aire, tales como dos pesos diferentes de plomo, caerían con la misma rapidez.

Las mediciones de Galileo sirvieron de base a Newton para la obtención de sus leyes del movimiento. En los experimentos de Galileo, cuando un cuerpo caía rodando, siempre actuaba sobre él la misma fuerza (su peso) y el efecto que se producía consistía en acelerarlo de forma constante. Esto demostraba que el efecto real de una fuerza era el de cambiar la velocidad del cuerpo, en vez de simplemente ponerlo en movimiento, como se pensaba anteriormente. Ello también significaba que siempre que sobre un cuerpo no actuara ninguna fuerza, éste se mantendría moviéndose en una línea recta con la misma velocidad. Esta idea fue formulada

explícitamente por primera vez en los *Principia Mathematica* de Newton, publicados en 1687, y se conoce como primera ley de Newton. Lo que le sucede a un cuerpo cuando sobre él actúa una fuerza está recogido en la segunda ley de Newton. Ésta afirma que el cuerpo se acelerará, o cambiará su velocidad, a un ritmo proporcional a la fuerza. (Por ejemplo, la aceleración se duplicará cuando la fuerza aplicada sea doble.) Al mismo tiempo, la aceleración disminuirá cuando aumente la masa (o la cantidad de materia) del cuerpo. (La misma fuerza actuando sobre un cuerpo de doble masa que otro, producirá la mitad de aceleración en el primero que en el segundo.) Un ejemplo familiar lo tenemos en un coche: cuanto más potente sea su motor mayor aceleración poseerá, pero cuanto más pesado sea el coche menor aceleración tendrá con el mismo motor.

Además de las leyes del movimiento, Newton descubrió una ley que describía la fuerza de la gravedad, una ley que nos dice que todo cuerpo atrae a todos los demás cuerpos con una fuerza proporcional a la masa de cada uno de ellos. Así, la fuerza entre dos cuerpos se duplicará si uno de ellos (digamos, el cuerpo A) dobla su masa. Esto es lo que razonablemente se podría esperar, ya que uno puede suponer al nuevo cuerpo A formado por dos cuerpos, cada uno de ellos con la masa original. Cada uno de estos cuerpos atraerá al cuerpo B con la fuerza original. Por lo tanto, la fuerza total entre A y B será justo el doble que la fuerza original. Y si, por ejemplo, uno de los cuerpos tuviera una masa doble de la original y el otro cuerpo una masa tres veces mayor que al principio, la fuerza entre ellos sería seis veces más intensa que la original. Se puede ver ahora por qué todos los cuerpos caen con la misma rapidez: un cuerpo que tenga doble peso sufrirá una fuerza gravitatoria doble, pero al mismo tiempo tendrá una masa doble. De acuerdo con la segunda ley de Newton, estos dos efectos se cancelarán exactamente y la aceleración será la misma en ambos casos.

La ley de la gravedad de Newton nos dice también que cuanto más separados estén los cuerpos menor será la fuerza gravitatoria entre ellos. La ley de la gravedad de Newton establece que la atracción gravitatoria producida por una estrella a una cierta distancia es exactamente la cuarta parte de la que produciría una estrella similar a la mitad de distancia. Esta ley predice con gran precisión las órbitas de la Tierra, la Luna y los planetas. Si la ley fuera que la atracción gravitatoria de una estrella decayera más rápidamente con la distancia, las órbitas de los planetas no serían elípticas, sino que éstos irían cayendo en espiral hacia el Sol. Si, por el contrario, la atracción gravitatoria decayera más lentamente, las fuerzas gravitatorias debidas a las estrellas lejanas dominarían frente a la atracción de la Tierra.

La diferencia fundamental entre las ideas de Aristóteles y las de Galileo y Newton estriba en que Aristóteles creía en un estado preferente de reposo, en el que todas

las cosas subyacerían, a menos que fueran empujadas por una fuerza o impulso. En particular, él creyó que la Tierra estaba en reposo. Por el contrario, de las leyes de Newton se desprende que no existe un único estándar de reposo. Se puede suponer igualmente o que el cuerpo A está en reposo y el cuerpo B se mueve a velocidad constante con respecto de A, o que el B está en reposo y es el cuerpo A el que se mueve. Por ejemplo, si uno se olvida de momento de la rotación de la Tierra y de su órbita alrededor del Sol, se puede decir que la Tierra está en reposo y que un tren sobre ella está viajando hacia el norte a ciento cuarenta kilómetros por hora, o se puede decir igualmente que el tren está en reposo y que la Tierra se mueve hacia el sur a ciento cuarenta kilómetros por hora. Si se realizaran experimentos en el tren con objetos que se movieran, comprobaríamos que todas las leyes de Newton seguirían siendo válidas. Por ejemplo, al jugar al ping-pong en el tren, uno encontraría que la pelota obedece las leyes de Newton exactamente igual a como lo haría en una mesa situada junto a la vía. Por lo tanto, no hay forma de distinguir si es el tren o es la Tierra lo que se mueve.

La falta de un estándar absoluto de reposo significaba que no se podía determinar si dos acontecimientos que ocurrieran en tiempos diferentes habían tenido lugar en la misma posición espacial. Por ejemplo, supongamos que en el tren nuestra bola de ping-pong está botando, moviéndose verticalmente hacia arriba y hacia abajo y golpeando la mesa dos veces en el mismo lugar con un intervalo de un segundo. Para un observador situado junto a la vía, los dos botes parecerán tener lugar con una separación de unos cuarenta metros, ya que el tren habrá recorrido esa distancia entre los dos botes. Así pues la no existencia de un reposo absoluto significa que no se puede asociar una posición absoluta en el espacio con un suceso, como Aristóteles había creído. Las posiciones de los sucesos y la distancia entre ellos serán diferentes para una persona en el tren y para otra que esté al lado de la vía, y no existe razón para preferir el punto de vista de una de las personas frente al de la otra.

Newton estuvo muy preocupado por esta falta de una posición absoluta, o espacio absoluto, como se le llamaba, porque no concordaba con su idea de un Dios absoluto. De hecho, rehusó aceptar la no existencia de un espacio absoluto, a pesar incluso de que estaba implicada por sus propias leyes. Fue duramente criticado por mucha gente debido a esta creencia irracional, destacando sobre todo la crítica del obispo Berkeley, un filósofo que creía que todos los objetos materiales, junto con el espacio y el tiempo, eran una ilusión. Cuando el famoso Dr. Johnson se enteró de la opinión de Berkeley gritó «¡Lo rebato así!» y golpeó con la punta del pie una gran piedra.

Tanto Aristóteles como Newton creían en el tiempo absoluto. Es decir, ambos pensaban que se podía afirmar inequívocamente la posibilidad de medir el intervalo de tiempo entre dos sucesos sin ambigüedad, y que dicho intervalo sería el mismo para todos los que lo midieran, con tal que usaran un buen reloj. El tiempo estaba totalmente separado y era independiente del espacio. Esto es, de hecho, lo que la mayoría de la gente consideraría como de sentido común. Sin embargo, hemos tenido que cambiar nuestras ideas acerca del espacio y del tiempo. Aunque nuestras nociones de lo que parece ser el sentido común funcionan bien cuando se usan en el estudio del movimiento de las cosas, tales como manzanas o planetas, que viajan relativamente lentas, no funcionan, en absoluto, cuando se aplican a cosas que se mueven con o cerca de la velocidad de la luz.

El hecho de que la luz viaja a una velocidad finita, aunque muy elevada, fue descubierto en 1676 por el astrónomo danés Ole Christensen Roemer. Él observó que los tiempos en los que las lunas de Júpiter parecían pasar por detrás de éste no estaban regularmente espaciados, como sería de esperar si las lunas giraran alrededor de Júpiter con un ritmo constante. Dado que la Tierra y Júpiter giran alrededor del Sol, la distancia entre ambos varía. Roemer notó que los eclipses de las lunas de Júpiter parecen ocurrir tanto más tarde cuanto más distantes de Júpiter estamos. Argumentó que se debía a que la luz proveniente de las lunas tardaba más en llegar a nosotros cuanto más lejos estábamos de ellas. Sus medidas sobre las variaciones de las distancias de la Tierra a Júpiter no eran, sin embargo, demasiado buenas, y así estimó un valor para la velocidad de la luz de 225.000 kilómetros por segundo, comparado con el valor moderno de 300.000 kilómetros por segundo. No obstante, no sólo el logro de Roemer de probar que la luz viaja a una velocidad finita, sino también de medir esa velocidad, fue notable, sobre todo teniendo en cuenta que esto ocurría once años antes de que Newton publicara los *Principia Mathematica*.

Una verdadera teoría de la propagación de la luz no surgió hasta 1865, en que el físico británico James Clerk Maxwell consiguió unificar con éxito las teorías parciales que hasta entonces se habían usado para definir las fuerzas de la electricidad y el magnetismo. Las ecuaciones de Maxwell predecían que podían existir perturbaciones de carácter ondulatorio del campo electromagnético combinado, y que éstas viajarían a velocidad constante, como las olas de una balsa. Si tales ondas poseen una longitud de onda (la distancia entre una cresta de onda y la siguiente) de un metro o más, constituyen lo que hoy en día llamamos ondas de radio. Aquellas con longitudes de onda menores se llaman microondas (unos pocos centímetros) o infrarrojas (más de una diezmilésima de centímetro). La luz visible tiene sólo una longitud de onda de entre cuarenta y ochenta millonésimas de centímetro. Las ondas con todavía menores longitudes se conocen como radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

La teoría de Maxwell predecía que tanto las ondas de radio como las luminosas deberían viajar a una velocidad fija determinada. La teoría de Newton se había desprendido, sin embargo, de un sistema de referencia absoluto, de tal forma que si se suponía que la luz viajaba a una cierta velocidad fija, había que especificar con respecto a qué sistema de referencia se medía dicha velocidad. Para que esto tuviera sentido, se sugirió la existencia de una sustancia llamada «éter» que estaba presente en todas partes, incluso en el espacio «vacío». Las ondas de luz debían viajar a través del éter al igual que las ondas de sonido lo hacen a través del aire, y sus velocidades deberían ser, por lo tanto, relativas al éter. Diferentes observadores, que se movieran con relación al éter, verían acercarse la luz con velocidades distintas, pero la velocidad de la luz con respecto al éter permanecería fija. En particular, dado que la Tierra se movía a través del éter en su órbita alrededor del Sol, la velocidad de la luz medida en la dirección del movimiento de la Tierra a través del éter (cuando nos estuviéramos moviendo hacia la fuente luminosa) debería ser mayor que la velocidad de la luz en la dirección perpendicular a ese movimiento (cuando no nos estuviéramos moviendo hacia la fuente). En 1887, Albert Michelson (quien más tarde fue el primer norteamericano que recibió el premio Nobel de física) y Edward Morley llevaron a cabo un' muy esmerado experimento en la Case School of Applied Science, de Cleveland. Ellos compararon la velocidad de la luz en la dirección del movimiento de la Tierra, con la velocidad de la luz en la dirección perpendicular a dicho movimiento. Para su sorpresa ¡encontraron que ambas velocidades eran exactamente iguales!

Entre 1887 y 1905, hubo diversos intentos, los más importantes debidos al físico holandés Hendrik Lorentz, de explicar el resultado del experimento de Michelson-Morley en términos de contracción de los objetos o de retardo de los relojes cuando éstos se mueven a través del éter. Sin embargo, en 1905, en un famoso artículo Albert Einstein, hasta entonces un desconocido empleado de la oficina de patentes de Suiza, señaló que la idea del éter era totalmente innecesaria, con tal que se estuviera dispuesto a abandonar la idea de un tiempo absoluto. Una proposición similar fue realizada unas semanas después por un destacado matemático francés, Henri Poincaré. Los argumentos de Einstein tenían un carácter más físico que los de Poincaré, que había estudiado el problema desde un punto de vista puramente matemático. A Einstein se le reconoce como el creador de la nueva teoría, mientras que a Poincaré se le recuerda por haber dado su nombre a una parte importante de la teoría.

El postulado fundamental de la teoría de la relatividad, nombre de esta nueva teoría, era que las leyes de la ciencia deberían ser las mismas para todos los observadores en movimiento libre, independientemente de cual fuera su velocidad. Esto ya era

cierto para las leyes de Newton, pero ahora se extendía la idea para incluir también la teoría de Maxwell y la velocidad de la luz: todos los observadores deberían medir la misma velocidad de la luz sin importar la rapidez con la que se estuvieran moviendo. Esta idea tan simple tiene algunas consecuencias extraordinarias. Quizás las más conocidas sean la equivalencia entre masa y energía, resumida en la famosa ecuación de Einstein  $E=mc^2$  (en donde E es la energía, m, la masa y c, la velocidad de la luz), y la ley de que ningún objeto puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz. Debido a la equivalencia entre energía y masa, la energía que un objeto adquiere debido a su movimiento se añadirá a su masa, incrementándola. En otras palabras, cuanto mayor sea la velocidad de un objeto más difícil será aumentar su velocidad. Este efecto sólo es realmente significativo para objetos que se muevan a velocidades cercanas a la de la luz. Por ejemplo, a una velocidad de un 10 por 100 de la de la luz la masa de un objeto es sólo un 0,5 por 100 mayor de la normal, mientras que a un 90 por 100 de la velocidad de la luz la masa sería de más del doble de la normal. Cuando la velocidad de un objeto se aproxima a la velocidad de la luz, su masa aumenta cada vez más rápidamente, de forma que cuesta cada vez más y más energía acelerar el objeto un poco más. De hecho no puede alcanzar nunca la velocidad de la luz, porque entonces su masa habría llegado a ser infinita, y por la equivalencia entre masa y energía, habría costado una cantidad infinita de energía el poner al objeto en ese estado. Por esta razón, cualquier objeto normal está confinado por la relatividad a moverse siempre a velocidades menores que la de la luz. Sólo la luz, u otras ondas que no posean masa intrínseca, puede moverse a la velocidad de la luz.

Otra consecuencia igualmente notable de la relatividad es el modo en que ha revolucionado nuestras ideas acerca del espacio y del tiempo. En la teoría de Newton, si un pulso de luz es enviado de un lugar a otro, observadores diferentes estarían de acuerdo en el tiempo que duró el viaje (ya que el tiempo es un concepto absoluto), pero no siempre estarían de acuerdo en la distancia recorrida por la luz (ya que el espacio no es un concepto absoluto). Dado que la velocidad de la luz es simplemente la distancia recorrida dividida por el tiempo empleado, observadores diferentes medirán velocidades de la luz diferentes. En relatividad, por el contrario, todos los observadores deben estar de acuerdo en lo rápido que viaja la luz. Ellos continuarán, no obstante, sin estar de acuerdo en la distancia recorrida por la luz, por lo que ahora ellos también deberán discrepar en el tiempo empleado. (El tiempo empleado es, después de todo, igual al espacio recorrido, sobre el que los observadores no están de acuerdo, dividido por la velocidad de la luz, sobre la que los observadores sí están de acuerdo.) En otras palabras, ¡la teoría de la relatividad acabó con la idea de un tiempo absoluto! Cada observador debe tener su propia medida del tiempo, que es la que registraría un reloj que se mueve junto a él, y

relojes idénticos moviéndose con observadores diferentes no tendrían por qué coincidir.

Cada observador podría usar un radar para así saber dónde y cuándo ocurrió cualquier suceso, mediante el envío de un pulso de luz o de ondas de radio. Parte del pulso se reflejará de vuelta en el suceso y el observador medirá el tiempo que transcurre hasta recibir el eco. Se dice que el tiempo del suceso es el tiempo medio entre el instante de emisión del pulso y el de recibimiento del eco. La distancia del suceso es igual a la mitad del tiempo transcurrido en el viaje completo de ida y vuelta, multiplicado por la velocidad de la luz. (Un suceso, en este sentido, es algo que tiene lugar en un punto específico del espacio y en un determinado instante de tiempo.) Esta idea se muestra en la figura 2.1, que representa un ejemplo de un diagrama espacio-tiempo. Usando el procedimiento anterior, observadores en movimiento relativo entre sí asignarán tiempos y posiciones diferentes a un mismo suceso. Ninguna medida de cualquier observador particular es más correcta que la de cualquier otro observador, sino que todas son equivalentes y además están relacionadas entre sí. Cualquier observador puede calcular de forma precisa la posición y el tiempo que cualquier otro observador asignará a un determinado proceso, con tal de que sepa la velocidad relativa del otro observador.

Hoy en día, se usa este método para medir distancias con precisión, debido a que podemos medir con más exactitud tiempos que distancias. De hecho, el metro se define como la distancia recorrida por la luz en 0,00000003335640952 segundos, medidos por un reloj de cesio. (La razón por la que se elige este número en particular es porque corresponde a la definición histórica del metro, en términos de dos marcas existentes en una barra de platino concreta que se guarda en París.) Igualmente, podemos usar una nueva y más conveniente unidad de longitud llamada segundo-luz. Esta se define simplemente como la distancia que recorre la luz en un segundo. En la teoría de la relatividad, se definen hoy en día las distancias en función de tiempos y de la velocidad de la luz, de manera que se desprende que cualquier observador medirá la misma velocidad de la luz (por definición, 1 metro por 0,00000003335640952 segundos). No hay necesidad de introducir la idea de un éter, cuya presencia de cualquier manera no puede ser detectada, como mostró el experimento de Michelson-Morley. La teoría de la relatividad nos fuerza, por el contrario, a cambiar nuestros conceptos de espacio y tiempo. Debemos aceptar que el tiempo no está completamente separado e independiente del espacio, sino que por el contrario se combina con él para formar un objeto llamado espacio-tiempo.

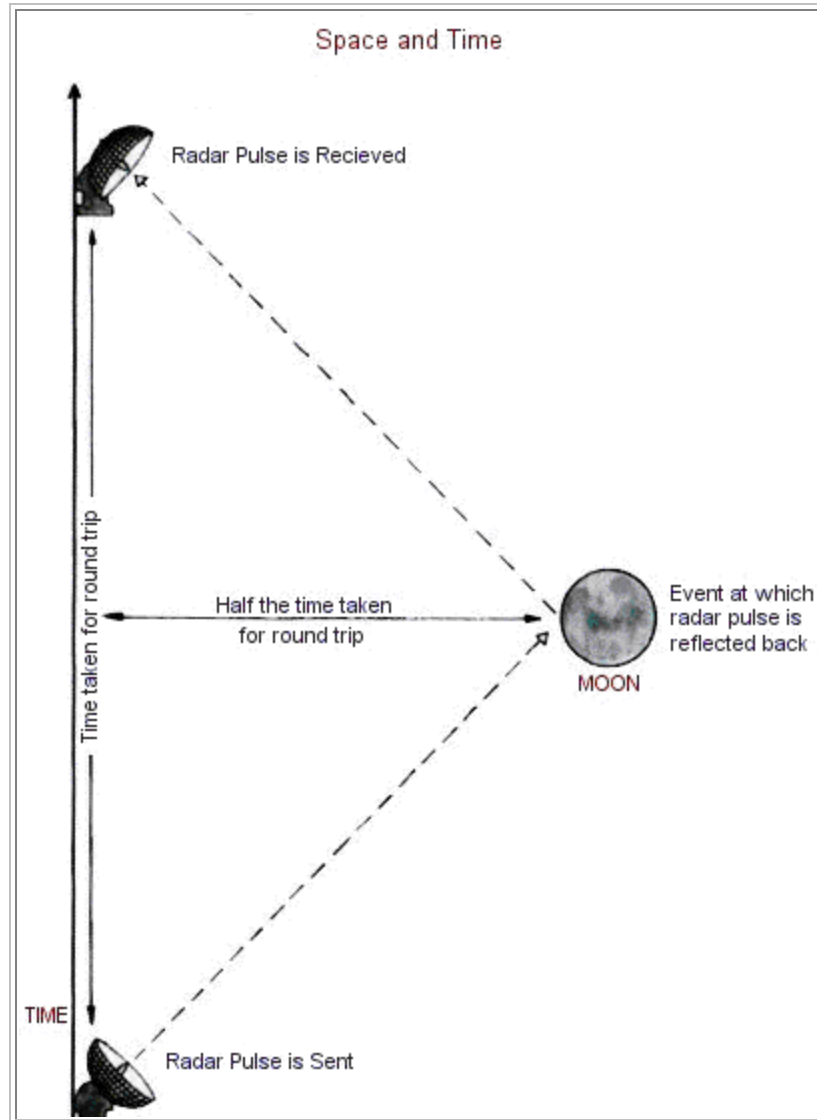


Figura 2:1: El tiempo se mide verticalmente y la distancia desde el observador se mide horizontalmente. El camino del observador a través del espacio y del tiempo corresponde a la línea vertical de la izquierda. Los caminos de los rayos de luz enviados y reflejados son las líneas diagonales

Por la experiencia ordinaria sabemos que se puede describir la posición de un punto en el espacio por tres números o coordenadas. Por ejemplo, uno puede decir que un punto dentro de una habitación está a tres metros de una pared, a un metro de la otra y a un metro y medio sobre el suelo. o uno podría especificar que un punto está a una cierta latitud y longitud y a una cierta altura sobre el nivel del mar. Uno tiene libertad para usar cualquier conjunto válido de coordenadas, aunque su utilidad pueda ser muy limitada. Nadie especificaría la posición de la Luna en función de los kilómetros que diste al norte y al oeste de Piccadilly Circus y del número de metros que esté sobre el nivel del mar. En vez de eso, uno podría describir la posición de la Luna en función de su distancia respecto al Sol, respecto al plano que contiene a las órbitas de los planetas y al ángulo formado entre la línea que une a la Luna y al Sol, y



la línea que une al Sol y a alguna estrella cercana, tal como Alfa Centauro. Ni siquiera estas coordenadas serían de gran utilidad para describir la posición del Sol en nuestra galaxia, o la de nuestra galaxia en el grupo local de galaxias. De hecho, se puede describir el universo entero en términos de una colección de pedazos solapados. En cada pedazo, se puede usar un conjunto diferente de tres coordenadas para especificar la posición de cualquier punto.

Un suceso es algo que ocurre en un punto particular del espacio y en un instante específico de tiempo. Por ello, se puede describir por medio de cuatro números o coordenadas. La elección del sistema de coordenadas es de nuevo arbitraria; uno puede usar tres coordenadas espaciales cualesquiera bien definidas y una medida del tiempo. En relatividad, no existe una distinción real entre las coordenadas espaciales y la temporal, exactamente igual a como no hay ninguna diferencia real entre dos coordenadas espaciales cualesquiera. Se podría elegir un nuevo conjunto de coordenadas en el que, digamos, la primera coordenada espacial sea una combinación de la primera y la segunda coordenadas antiguas. Por ejemplo, en vez de medir la posición de un punto sobre la Tierra en kilómetros al norte de Piccadilly, y kilómetros al oeste de Piccadilly, se podría usar kilómetros al noreste de Piccadilly y kilómetros al noroeste de Piccadilly. Similarmente, en relatividad, podría emplearse una nueva coordenada temporal que fuera igual a la coordenada temporal antigua (en segundos) más la distancia (en segundos luz) al norte de Piccadilly.

A menudo resulta útil pensar que las cuatro coordenadas de un suceso especifican su posición en un espacio cuatridimensional llamado espacio-tiempo. Es imposible imaginar un espacio cuatridimensional. ¡Personalmente ya encuentro suficientemente difícil visualizar el espacio tridimensional! Sin embargo, resulta fácil dibujar diagramas de espacios bidimensionales, tales como la superficie de la Tierra. (La superficie terrestre es bidimensional porque la posición de un punto en ella puede ser especificada por medio de dos coordenadas, latitud y longitud.) Generalmente usaré diagramas en los que el tiempo aumenta hacia arriba y una de las dimensiones espaciales se muestra horizontalmente. Las otras dos dimensiones espaciales son ignoradas o, algunas veces, una de ellas se indica en perspectiva. (Estos diagramas, como el que aparece en la figura 2.1, se llaman de espacio-tiempo.) Por ejemplo, en la figura 2.2 el tiempo se mide hacia arriba en años y la distancia (proyectada), a lo largo de la línea que va del Sol a Alfa Centauro, se mide horizontalmente en kilómetros. Los caminos del Sol y de Alfa Centauro, a través del espacio-tiempo, se representan por las líneas verticales a la izquierda y a la derecha del diagrama. Un rayo de luz del Sol sigue la línea diagonal y tarda cuatro años en ir del Sol a Alfa Centauro.

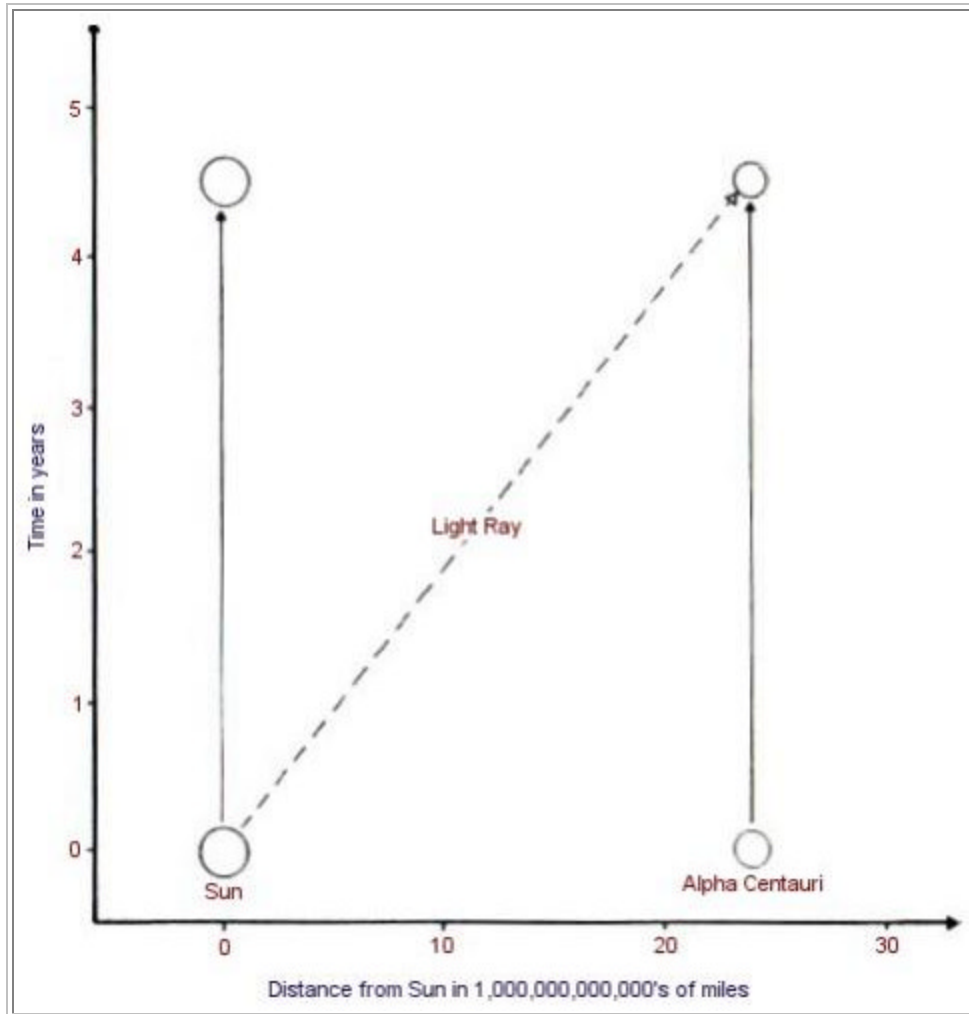


Figura 2:2

Como hemos visto, las ecuaciones de Maxwell predecían que la velocidad de la luz debería de ser la misma cualquiera que fuera la velocidad de la fuente, lo que ha sido confirmado por medidas muy precisas. De ello se desprende que si un pulso de luz es emitido en un instante concreto, en un punto particular del espacio, entonces, conforme va transcurriendo el tiempo, se irá extendiendo como una esfera de luz cuyo tamaño y posición son independientes de la velocidad de la fuente. Después de una millonésima de segundo la luz se habrá esparcido formando una esfera con un radio de 300 metros; después de dos millonésimas de segundo el radio será de 600 metros, y así sucesivamente. Será como las olas que se extienden sobre la superficie de un estanque cuando se lanza una piedra. Las olas se extienden como círculos que van aumentando de tamaño conforme pasa el tiempo. Si uno imagina un modelo tridimensional consistente en la superficie bidimensional del estanque y la dimensión temporal, las olas circulares que se expanden marcarán un cono cuyo vértice estará en el lugar y tiempo en que la piedra golpeó el agua (figura 2.3). De manera similar, la luz, al expandirse desde un suceso

dado, forma un cono tridimensional en el espacio-tiempo cuatridimensional. Dicho cono se conoce como el cono de luz futuro del suceso. De la misma forma, podemos dibujar otro cono, llamado el cono de luz pasado, el cual es el conjunto de sucesos desde los que un pulso de luz es capaz de alcanzar el suceso dado (figura 2.4).

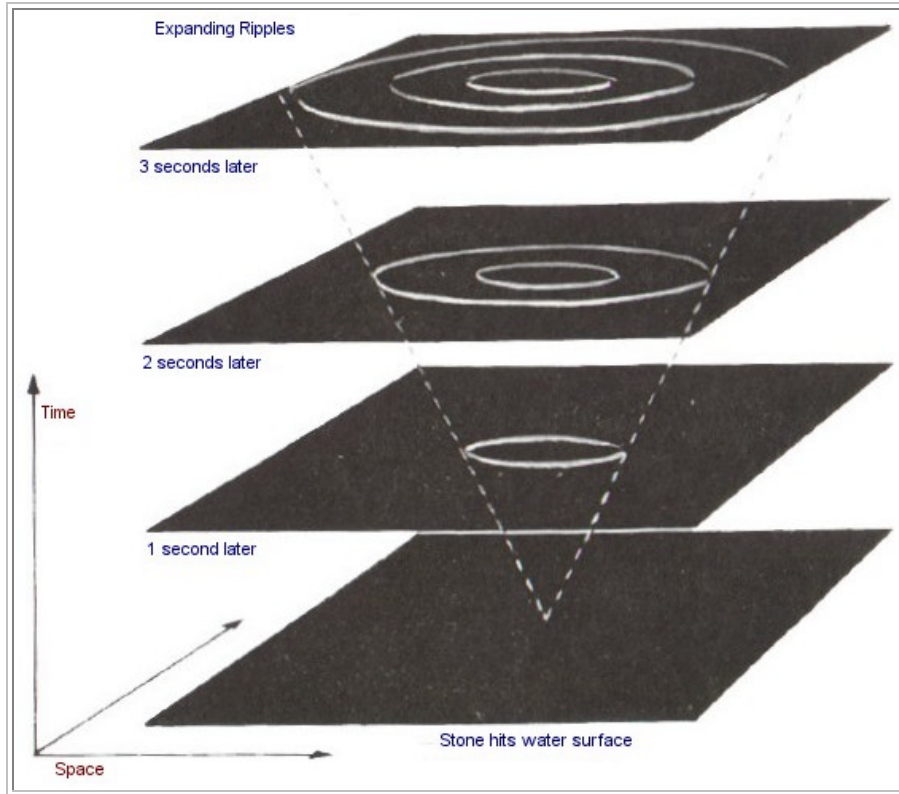


Figura 2:3

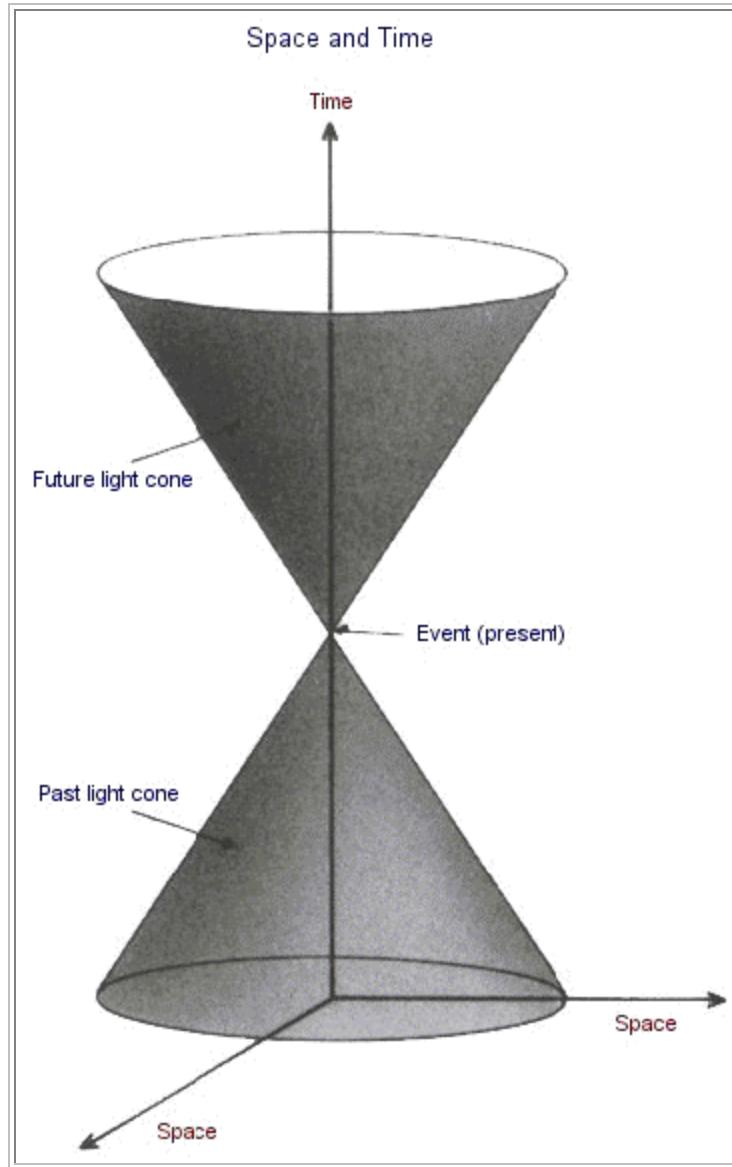


Figura 2:4

Los conos de luz futuro y pasado de un suceso  $P$  dividen al espacio-tiempo en tres regiones (figura 2.5). El futuro absoluto del suceso es la región interior del cono de luz futuro de  $P$ . Es el conjunto de todos los sucesos que pueden en principio ser afectados por lo que sucede en  $P$ . Sucesos fuera del cono de luz de  $P$  no pueden ser alcanzados por señales provenientes de  $P$ , porque ninguna de ellas puede viajar más rápido que la luz. Estos sucesos no pueden, por tanto, ser influidos por lo que sucede en  $P$ . El pasado absoluto de  $P$  es la región interna del cono de luz pasado. Es el conjunto de todos los sucesos desde los que las señales que viajan con velocidades iguales o menores que la de la luz, pueden alcanzar  $P$ . Es, por consiguiente, el conjunto de todos los sucesos que en un principio pueden afectar a lo que sucede en  $P$ . Si se conoce lo que sucede en un instante particular en todos los

lugares de la región del espacio que cae dentro del cono de luz pasado de P, se puede predecir lo que sucederá en P. El «resto» es la región del espacio-tiempo que está fuera de los conos de luz futuro y pasado de P. Sucesos del resto no pueden ni afectar ni ser afectados por sucesos en P. Por ejemplo, si el Sol cesara de alumbrar en este mismo instante, ello no afectaría a las cosas de la Tierra en el tiempo presente porque estaría en la región del resto del suceso correspondiente a apagarse el Sol (figura 2.6). Sólo nos enteraríamos ocho minutos después, que es el tiempo que tarda la luz en alcanzarnos desde el Sol. Únicamente entonces estarían los sucesos de la Tierra en el cono de luz futuro del suceso en el que el Sol se apagó. De modo similar, no sabemos qué está sucediendo lejos de nosotros en el universo, en este instante: la luz que vemos de las galaxias distantes partió de ellas hace millones de años, y en el caso de los objetos más distantes observados, la luz partió hace unos ocho mil millones de años. Así, cuando miramos al universo, lo vemos tal como fue en el pasado.

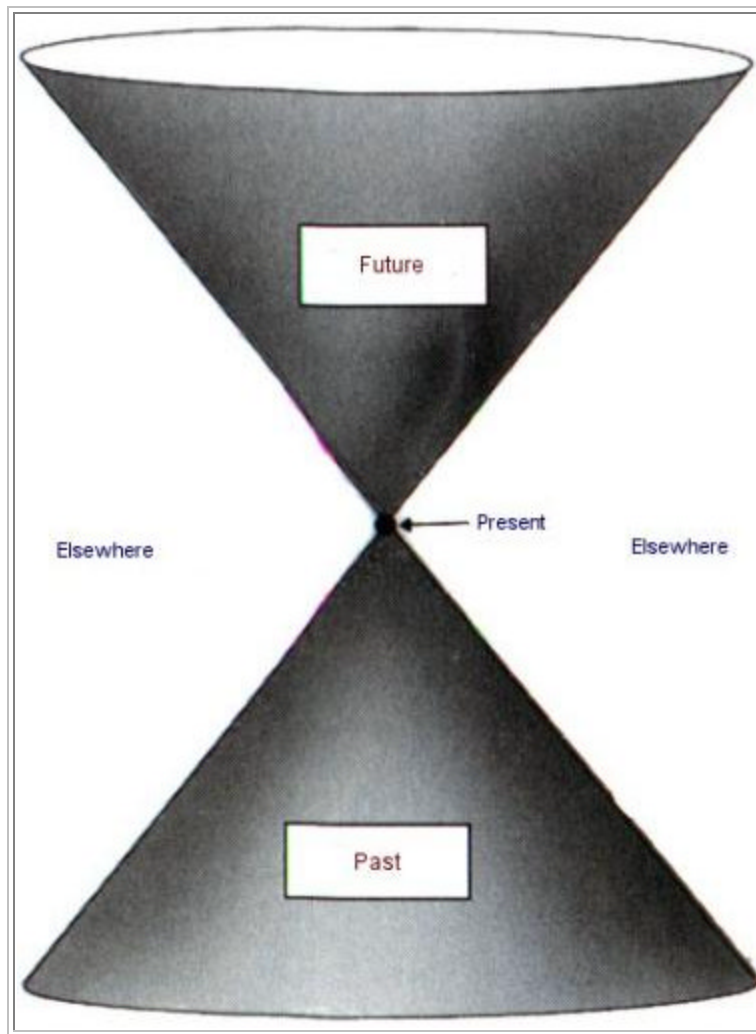


Figura 2:5

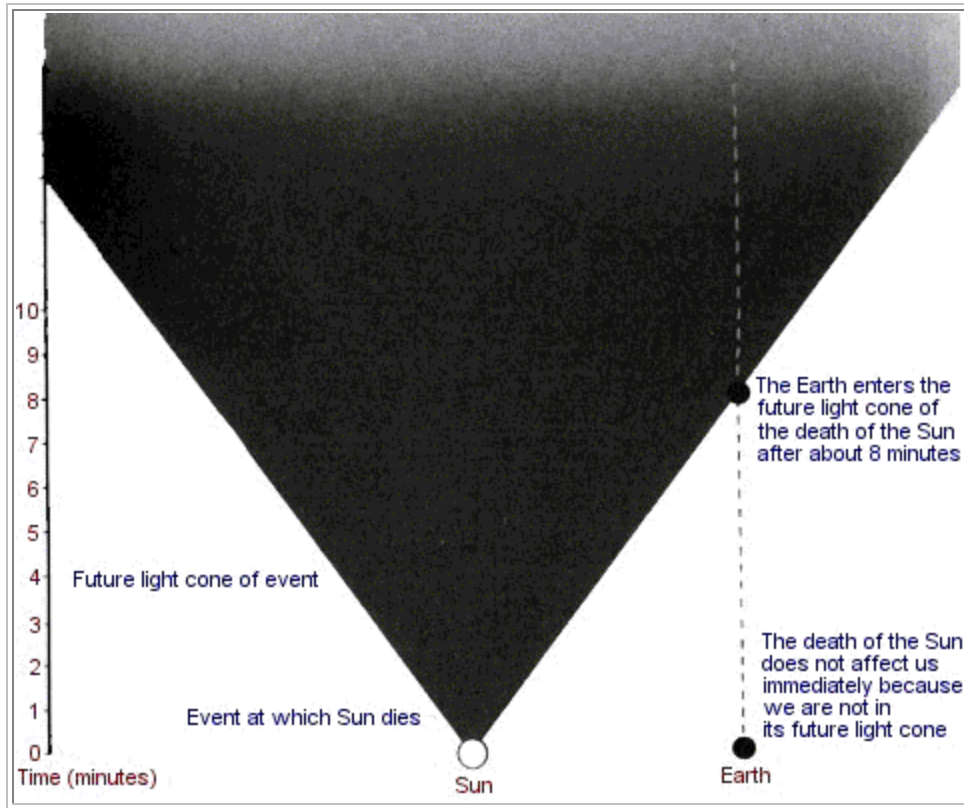
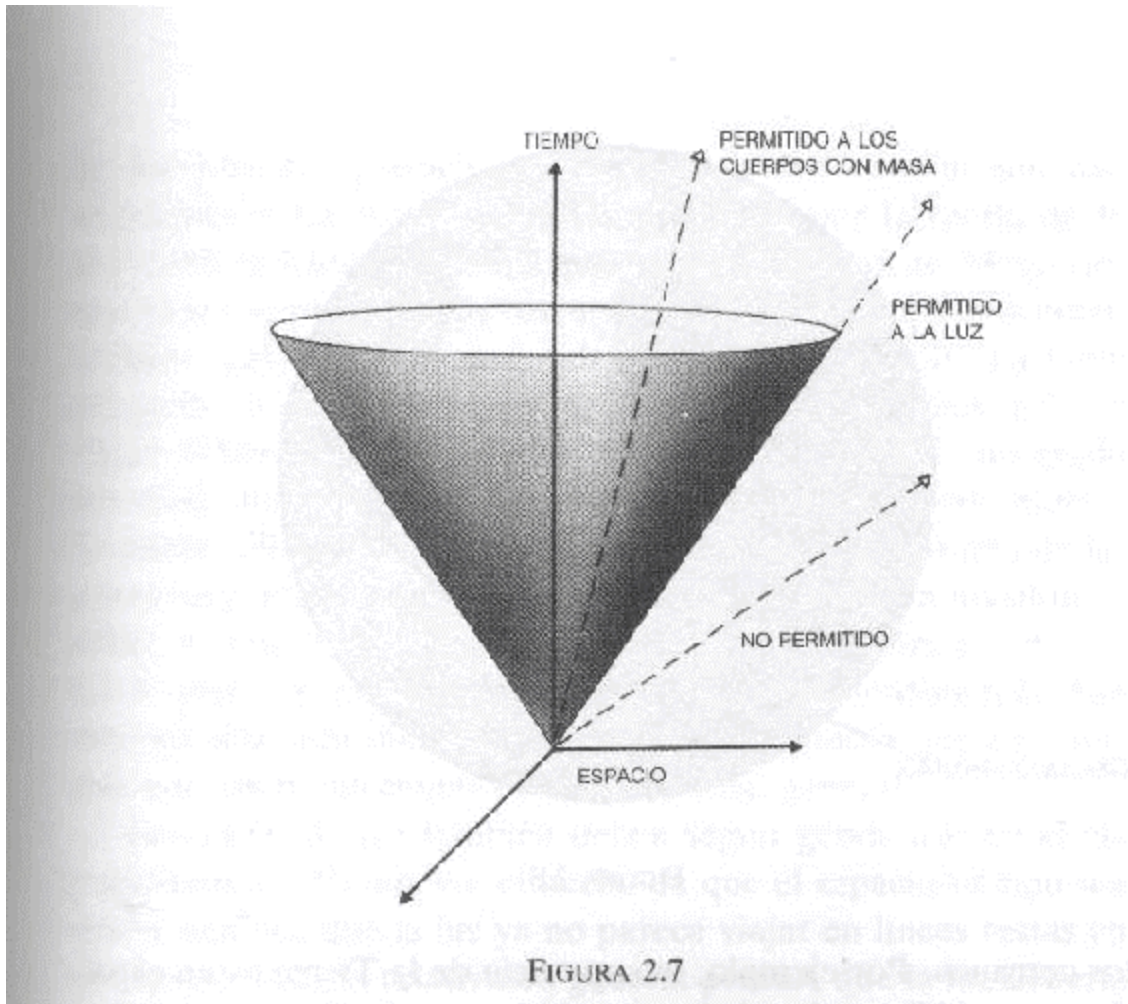


Figura 2:6

Si se ignoran los efectos gravitatorios, tal y como Einstein y Poincaré hicieron en 1905, uno tiene lo que se llama la teoría de la relatividad especial. Para cada suceso en el espacio-tiempo se puede construir un cono de luz (el conjunto de todos los posibles caminos luminosos en el espacio-tiempo emitidos en ese suceso) y dado que la velocidad de la luz es la misma para cada suceso y en cada dirección, todos los conos de luz serán idénticos y estarán orientados en 1 a misma dirección. La teoría también nos dice que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Esto significa que el camino de cualquier objeto a través del espacio y del tiempo debe estar representado por una línea que cae dentro del cono de luz de cualquier suceso en ella (figura 2.7).



La teoría de la relatividad especial tuvo un gran éxito al explicar por qué la velocidad de la luz era la misma para todos los observadores (tal y como había mostrado el experimento de Michelson-Morley) y al describir adecuadamente lo que sucede cuando los objetos se mueven con velocidades cercanas a la de la luz. Sin embargo, la teoría era inconsistente con la teoría de la gravitación de Newton, que decía que los objetos se atraían mutuamente con una fuerza dependiente de la distancia entre ellos. Esto significaba que si uno movía uno de los objetos, la fuerza sobre el otro cambiaría instantáneamente. o en otras palabras, los efectos gravitatorios deberían viajar con velocidad infinita, en vez de con una velocidad igual o menor que la de la luz, como la teoría de la relatividad especial requería. Einstein realizó entre 1908 y 1914 varios intentos, sin éxito, para encontrar una teoría de la gravedad que fuera consistente con la relatividad especial. Finalmente, en 1915, propuso lo que hoy en día se conoce como teoría de la relatividad general.

Einstein hizo la sugerencia revolucionaria de que la gravedad no es una fuerza como las otras, sino que es una consecuencia de que el espacio-tiempo no sea plano,



como previamente se había supuesto: el espacio-tiempo está curvado, o «deformado», por la distribución de masa y energía en él presente. Los cuerpos como la Tierra no están forzados a moverse en órbitas curvas por una fuerza llamada gravedad; en vez de esto, ellos siguen la trayectoria más parecida a una línea recta en un espacio curvo, es decir, lo que se conoce como una geodésico. Una geodésico es el camino más corto (o más largo) entre dos puntos cercanos. Por ejemplo, la superficie de la Tierra es un espacio curvo bidimensional. Las geodésicas en la Tierra se llaman círculos máximos, y son el camino más corto entre dos puntos (figura 2.8). Como la geodésica es el camino más corto entre dos aeropuertos cualesquiera, el navegante de líneas aéreas le dirá al piloto que vuele a lo largo de ella. En relatividad general, los cuerpos siguen siempre líneas rectas en el espacio-tiempo cuatridimensional; sin embargo, nos parece que se mueven a lo largo de trayectorias curvadas en nuestro espacio tridimensional. (Esto es como ver a un avión volando sobre un terreno montañoso. Aunque sigue una línea recta en el espacio tridimensional, su sombra seguirá un camino curvo en el suelo bidimensional.)

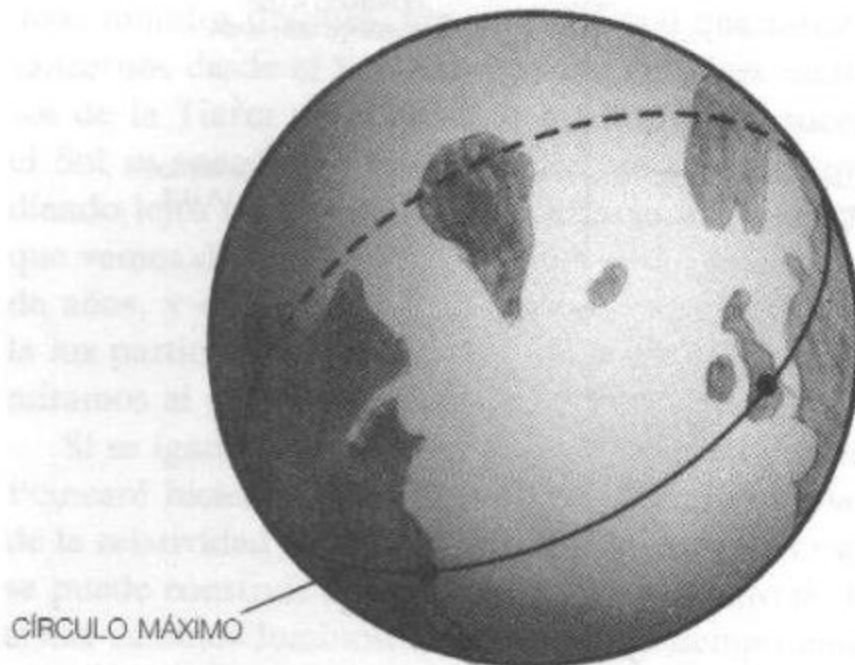


FIGURA 2.8

La masa del Sol curva el espacio-tiempo de tal modo que, a pesar de que la Tierra sigue un camino recto en el espacio-tiempo cuatridimensional, nos parece que se mueve en una órbita circular en el espacio tridimensional. De hecho, las órbitas de los planetas predichas por la relatividad general son casi exactamente las mismas que las predichas por la teoría de la gravedad newtoniana. Sin embargo, en el caso



de Mercurio, que al ser el planeta más cercano al Sol sufre los efectos gravitatorios más fuertes y que, además, tiene una órbita bastante alargada, la relatividad general predice que el eje mayor de su elipse debería rotar alrededor del Sol a un ritmo de un grado por cada diez mil años. A pesar de lo pequeño de este efecto, ya había sido observado antes de 1915 y sirvió como una de las primeras confirmaciones de la teoría de Einstein. En los últimos años, incluso las desviaciones menores de las órbitas de los otros planetas respecto de las predicciones newtonianas han sido medidas por medio del radar, encontrándose que concuerdan con las predicciones de la relatividad general.

Los rayos de luz también deben seguir geodésicas en el espacio-tiempo. De nuevo, el hecho de que el espacio-tiempo sea curvo significa que la luz ya no parece viajar en líneas rectas en el espacio. Así, la relatividad general predice que la luz debería ser desviada por los campos gravitatorios. Por ejemplo, la teoría predice que los conos de luz de puntos cercanos al Sol estarán torcidos hacia dentro, debido a la presencia de la masa del Sol. Esto quiere decir que la luz de una estrella distante, que pase cerca del Sol, será desviada un pequeño ángulo, con lo cual la estrella parecerá estar, para un observador en la Tierra, en una posición diferente a aquella en la que de hecho está (figura 2.9). Desde luego, si la luz de la estrella pasara siempre cerca del Sol, no seríamos capaces de distinguir si la luz era desviada sistemáticamente, o si, por el contrario, la estrella estaba realmente en la posición donde la vemos. Sin embargo, dado que la Tierra gira alrededor del Sol, diferentes estrellas parecen pasar por detrás del Sol y su luz es desviada. Cambian, así pues, su posición aparente con respecto a otras estrellas.

Normalmente es muy difícil apreciar este efecto, porque la luz del Sol hace imposible observar las estrellas que aparecen en el cielo cercanas a él. Sin embargo, es posible observarlo durante un eclipse solar, en el que la Luna se interpone entre la luz del Sol y la Tierra. Las predicciones de Einstein sobre las desviaciones de la luz no pudieron ser comprobadas inmediatamente, en 1915, a causa de la primera guerra mundial, y no fue posible hacerlo hasta 1919, en que una expedición británica, observando un eclipse desde África oriental, demostró que la luz era verdaderamente desviada por el Sol, justo como la teoría predecía. Esta comprobación de una teoría alemana por científicos británicos fue reconocida como un gran acto de reconciliación entre los dos países después de la guerra. Resulta irónico, que un examen posterior de las fotografías tomadas por aquella expedición mostrara que los errores cometidos eran tan grandes como el efecto que se trataba de medir. Sus medidas habían sido o un caso de suerte, o un caso de conocimiento del resultado que se quería obtener, lo que ocurre con relativa frecuencia en la ciencia. La desviación de la luz ha sido, no obstante, confirmada con precisión por numerosas observaciones posteriores.

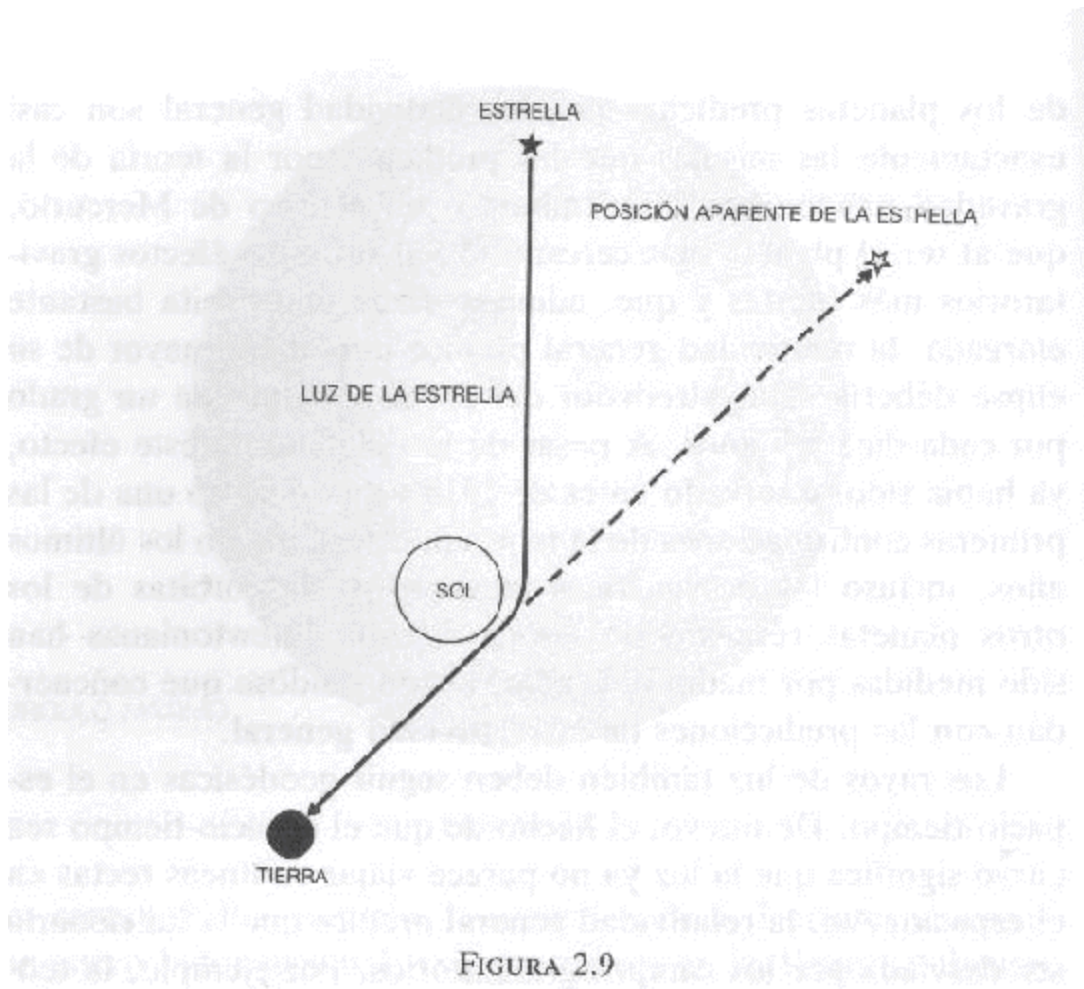


FIGURA 2.9

Otra predicción de la relatividad general es que el tiempo debería transcurrir más lentamente cerca de un cuerpo de gran masa como la Tierra. Ello se debe a que hay una relación entre la energía de la luz y su frecuencia (es decir, el número de ondas de luz por segundo): cuanto mayor es la energía, mayor es la frecuencia. Cuando la luz viaja hacia arriba en el campo gravitatorio terrestre, pierde energía y, por lo tanto, su frecuencia disminuye. (Esto significa que el período de tiempo entre una cresta de la onda y la siguiente aumenta.) A alguien situado arriba le parecería que todo lo que pasara abajo, en la Tierra, transcurriría más lentamente. Esta predicción fue comprobada en 1962, usándose un par de relojes muy precisos instalados en la parte superior e inferior de un depósito de agua. Se encontró que el de abajo, que estaba más cerca de la Tierra, iba más lento, de acuerdo exactamente con la relatividad general. La diferencia entre relojes a diferentes alturas de la Tierra es, hoy en día, de considerable importancia práctica debido al uso de sistemas de navegación muy precisos, basados en señales provenientes de satélites. Si se

ignoraran las predicciones de la relatividad general, ¡la posición que uno calcularía tendría un error de varios kilómetros!

Las leyes de Newton del movimiento acabaron con la idea de una posición absoluta en el espacio. La teoría de la relatividad elimina el concepto de un tiempo absoluto. Consideremos un par de gemelos. Supongamos que uno de ellos se va a vivir a la cima de una montaña, mientras que el otro permanece al nivel del mar. El primer gemelo envejecerá más rápidamente que el segundo. Así, si volvieran a encontrarse, uno sería más viejo que el otro. En este caso, la diferencia de edad sería muy pequeña, pero sería mucho mayor si uno de los gemelos se fuera de viaje en una nave espacial a una velocidad cercana a la de la luz. Cuando volviera, sería mucho más joven que el que se quedó en la Tierra. Esto se conoce como la paradoja de los gemelos, pero es sólo una paradoja si uno tiene siempre metida en la cabeza la idea de un tiempo absoluto. En la teoría de la relatividad no existe un tiempo absoluto único, sino que cada individuo posee su propia medida personal del tiempo, medida que depende de dónde está y de cómo se mueve.

Antes de 1915, se pensaba en el espacio y en el tiempo como si se tratara de un marco fijo en el que los acontecimientos tenían lugar, pero que no estaba afectado por lo que en él sucediera. Esto era cierto incluso en la teoría de la relatividad especial. Los cuerpos se movían, las fuerzas atraían y repelían, pero el tiempo y el espacio simplemente continuaban, sin ser afectados por nada. Era natural pensar que el espacio y el tiempo habían existido desde siempre.

La situación es, sin embargo, totalmente diferente en la teoría de la relatividad general. En ella, el espacio y el tiempo son cantidades dinámicas: cuando un cuerpo se mueve, o una fuerza actúa, afecta a la curvatura del espacio y del tiempo, y, en contrapartida, la estructura del espacio-tiempo afecta al modo en que los cuerpos se mueven y las fuerzas actúan. El espacio y el tiempo no sólo afectan, sino que también son afectados por todo aquello que sucede en el universo. De la misma manera que no se puede hablar acerca de los fenómenos del universo sin las nociones de espacio y tiempo, en relatividad general no tiene sentido hablar del espacio y del tiempo fuera de los límites del universo.

En las décadas siguientes al descubrimiento de la relatividad general, estos nuevos conceptos de espacio y tiempo iban a revolucionar nuestra imagen del universo. La vieja idea de un universo esencialmente inalterable que podría haber existido, y que podría continuar existiendo por siempre, fue reemplazada por el concepto de un universo dinámico, en expansión, que parecía haber comenzado hace cierto tiempo finito, y que podría acabar en un tiempo finito en el futuro. Esa revolución es el objeto del siguiente capítulo. Y años después de haber tenido lugar, sería también el punto

de arranque de mi trabajo en física teórica. Roger Penrose y yo mostramos cómo la teoría de la relatividad general de Einstein implicaba que el universo debía tener un principio y, posiblemente, un final.