

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.

La teoría de Einstein de la relatividad general está basada en la sugerencia revolucionaria de que la gravedad no es una fuerza como las demás, sino una consecuencia de que el espacio-tiempo no es plano, a diferencia de lo que se había supuesto hasta entonces. En la relatividad general, el espacio-tiempo está curvado o deformado por la distribución de masa y energía que contiene. Los objetos como la Tierra no se mueven en órbitas curvadas a causa de una fuerza llamada gravedad, sino porque siguen una trayectoria lo más próxima posible a una línea recta en un espacio curvado, a la que se denomina una geodésica. En términos técnicos, una geodésica se define como el camino más corto (o más largo) entre dos puntos dados.

Un plano geométrico es un ejemplo de espacio bidimensional plano, cuyas geodésicas son rectas. La superficie de la Tierra es un espacio curvo bidimensional, cuyas geodésicas son lo que llamamos círculos máximos. El ecuador es un círculo máximo, y también lo es cualquier círculo sobre el globo cuyo centro coincida con el centro de la Tierra. (El término «círculo máximo» hace referencia a que éstos son los mayores círculos que podemos dibujar sobre el globo). Como la geodésica es el camino más corto entre dos aeropuertos, es la ruta que los navegadores de las aerolíneas indican al piloto para volar. Por ejemplo, podríamos viajar de Nueva York a Madrid siguiendo la brújula siempre hacia el este durante 5965 kilómetros a lo largo de su paralelo común. Pero podemos llegar en sólo 5800 kilómetros si volamos en un círculo máximo, apuntando primero hacia el noreste, girando gradualmente hacia el este y, después, hacia el sureste. El aspecto de estas dos trayectorias sobre un mapa, donde la superficie del globo ha sido distorsionada (aplanada), resulta engañoso. Cuando nos movemos «recto» hacia el este de un punto a otro de la superficie del globo no nos estamos moviendo realmente en línea recta, al menos no en el sentido del camino más directo, la geodésica.

En la relatividad general, los cuerpos siempre siguen geodésicas en el espacio-tiempo cuatridimensional. En ausencia de materia, las geodésicas en el espacio-tiempo cuatridimensional corresponden a líneas rectas en el espacio tridimensional. Por el contrario, en presencia de materia, el espacio-tiempo cuatridimensional queda distorsionado, haciendo que las trayectorias de los cuerpos en el espacio tridimensional se curven (de una manera que en la vieja teoría newtoniana de la gravedad era explicada por los efectos de la atracción gravitatoria). Es parecido a observar el vuelo de un avión sobre un terreno accidentado: aunque en el espacio tridimensional el avión se mueva en línea recta, si olvidamos la tercera dimensión (altura) su sombra parece seguir sobre el suelo bidimensional una trayectoria curvada. O bien imaginemos una nave espacial que vuela en línea recta y pasa directamente sobre el Polo Norte. Si proyectamos su trayectoria sobre la superficie bidimensional de la Tierra hallamos que sigue un semicírculo, trazando un meridiano sobre el hemisferio norte. Aunque sea más difícil de representar, la masa del Sol deforma el espacio-tiempo cuatridimensional de tal manera que en él la Tierra sigue un cierto camino curvado, de forma que nos parece que se mueve en una órbita

(aproximadamente) circular en el espacio tridimensional.

En realidad, aunque deducidas de manera diferente, las órbitas planetarias descritas por la relatividad general son casi idénticas a las predichas por la teoría newtoniana de la gravedad. La desviación mayor se halla en la órbita de Mercurio que, al ser el planeta más próximo al Sol, nota efectos gravitatorios más intensos y tiene una órbita elíptica bastante alargada. La relatividad general predice que el eje mayor de dicha elipse debe girar alrededor del Sol con un ritmo de aproximadamente un grado en diez mil años. Por pequeño que este efecto pueda parecer, había sido observado mucho antes de 1915 (véase el capítulo 3) y fue una de las primeras confirmaciones de la teoría de Einstein. Recientemente, se ha logrado medir, mediante radar, incluso las desviaciones aún más pequeñas de las órbitas de los otros planetas con respecto a las predicciones newtonianas y se ha comprobado que concuerdan con las predicciones de la relatividad general.

También los rayos de luz deben seguir las geodésicas del espacio-tiempo. De nuevo, el hecho de que el espacio sea curvado significa que la luz ya no parece viajar en línea recta. Así pues, la relatividad general predice que los campos gravitatorios deberían curvar la trayectoria de la luz. Por ejemplo, la teoría predice que la trayectoria de los rayos de luz en las proximidades del Sol debería curvarse ligeramente hacia dentro, debido a la masa de éste. Ello significa que la luz de una estrella lejana que pase cerca del Sol será desviada un pequeño ángulo, haciendo que para un observador situado en la Tierra la estrella parezca hallarse en una posición diferente. Evidentemente, si la luz de la estrella siempre pasara cerca del Sol, no podríamos decir si la luz está siendo desviada o si simplemente la estrella está donde parece estar. Sin embargo, a medida que la Tierra gira alrededor del Sol diferentes estrellas pasan detrás de éste y su luz es desviada, por lo que cambia su posición aparente con respecto a otras estrellas.

Normalmente es muy difícil observar este efecto, porque la luz del Sol impide observar estrellas en sus alrededores. Sin embargo, es posible hacerlo durante un eclipse de Sol, cuando la Luna bloquea la luz solar. La predicción de Einstein sobre la curvatura de la luz no pudo ser comprobada inmediatamente en 1915, debido a la primera guerra mundial. En 1919, una expedición británica, que observaba un eclipse desde África occidental, demostró que la luz era efectivamente curvada por el Sol, tal como predecía la teoría. Esta comprobación de una teoría alemana por científicos británicos fue saludada como un canto de reconciliación entre ambos países después de la guerra. Resulta irónico, pues, que exámenes posteriores de las fotografías tomadas en dicha expedición mostraran que los errores eran tan grandes como los efectos que estaban intentando medir. Su medida había sido simple buena suerte, o bien un caso de interpretación sesgada, pues se sabía el resultado que se quería obtener, una situación no demasiado infrecuente en la ciencia. La desviación de la luz, sin embargo, ha sido confirmada con precisión en diversas observaciones posteriores.

Otra predicción de la relatividad general es que el tiempo debería parecer ralentizarse en las proximidades de cuerpos con una gran masa. Einstein llegó a esta conclusión por primera vez en 1907, cinco años antes de advertir que la gravedad también alteraba la forma del espacio y ocho años antes de completar esta teoría. Dedujo el efecto mediante su principio de equivalencia, que desempeña en la relatividad general el papel que sigue el postulado fundamental en la teoría de la relatividad especial.

Recordemos que el postulado fundamental de la relatividad especial establece que las leyes de la ciencia deberían ser las mismas para todos los observadores que se mueven libremente, sea cual sea su velocidad. A grandes rasgos, el principio de equivalencia extiende esta idea a los observadores que no se mueven libremente, sino bajo la influencia de un campo gravitatorio. Una formulación precisa del principio requiere algunas precisiones técnicas, como el hecho de que si el campo gravitatorio no es uniforme debemos aplicar el principio por separado a una serie de pequeños retazos espaciales solapados, pero no nos preocuparemos por esto aquí. Para nuestros propósitos, podemos enunciar el principio de la manera siguiente: en regiones suficientemente pequeñas del espacio, es imposible afirmar si estamos en reposo en un campo gravitatorio o uniformemente acelerados en el espacio vacío.

Imaginemos que estamos en un ascensor en un espacio vacío, sin gravedad. No hay «arriba» ni «abajo»; estamos flotando libremente. De repente, el ascensor se empieza a mover con una aceleración constante. Súbitamente notamos peso, es decir, ¡nos sentimos atraídos hacia un extremo del ascensor, que de repente parece haberse convertido en el suelo! Si soltamos una manzana, cae hacia él. De hecho, ahora que nos estamos acelerando, todo lo que ocurre en el interior del ascensor sucede exactamente igual que si éste no se moviera, como si estuviera en reposo en un campo gravitatorio. Einstein se dio cuenta de que, así como en el interior de un tren no podemos decir si nos estamos moviendo uniformemente o no nos movemos, tampoco podemos decir, en el interior de un ascensor, si estamos acelerando uniformemente o si permanecemos en reposo en un campo gravitatorio uniforme. El resultado fue su principio de equivalencia.

El principio de equivalencia, y el ejemplo que acabamos de dar, sólo puede ser verdad si la masa inercial (la masa que aparece en la segunda ley de Newton, y que determina el valor de la aceleración en presencia de una fuerza) y la masa gravitatoria (la masa que aparece en la ley de la gravedad de Newton, y que determina el valor de la fuerza gravitatoria) son las mismas (véase el capítulo 4). En efecto, si ambos tipos de masa son iguales, todos los objetos situados en un campo gravitatorio caerán con el mismo ritmo, independientemente del valor de su masa. Si esta equivalencia no fuera cierta, algunos objetos caerían más rápido que otros bajo la influencia de la gravedad, y por lo tanto podríamos distinguir la fuerza de la gravedad de una aceleración uniforme, en la que todo cae con la misma aceleración. El uso que hizo Einstein de la equivalencia entre masa inercial y masa gravitatoria para deducir su

principio de equivalencia y, a la larga, toda la relatividad general, supone un avance implacable de razonamiento lógico sin precedentes en la historia del pensamiento humano.

Ahora que conocemos el principio de equivalencia, podemos seguir algunos aspectos de la lógica de Einstein en otro experimento mental, que demuestra por qué el tiempo debe verse afectado por la gravedad. Imaginemos una nave en el espacio y supongamos, porque así nos conviene, que es tan larga que la luz tarda un segundo en recorrerla de arriba abajo. Imaginemos, además, que hay un observador en el techo de la nave y otro en el suelo, cada uno con relojes idénticos que marcan cada segundo.

Supongamos que el observador situado en el techo espera una pulsación del reloj e inmediatamente envía una señal luminosa hacia el observador situado en el suelo. El observador del techo repite esta operación a cada pulsación de su reloj. Según este procedimiento, cada señal viaja durante un segundo, tras el cual es recibida por el observador del suelo. Así, si el observador del techo envía dos señales separadas un segundo, el observador del suelo recibe dos señales separadas también un segundo.

¿Cómo cambiaría esta situación si la nave estuviera en reposo en la Tierra, bajo la influencia de la gravedad, en lugar de flotar libremente en el espacio? Según la teoría newtoniana de la gravedad, ésta no tendría efecto alguno sobre el tiempo. Si el observador del techo envía señales cada segundo, el del suelo también las recibirá cada segundo. Pero el principio de equivalencia hace una predicción diferente. Podemos ver lo que ocurre, según este principio, si en lugar del efecto de la gravedad consideramos el efecto de una aceleración uniforme. Este es un ejemplo de la manera en que Einstein utilizó el principio de equivalencia para crear su nueva teoría de la gravedad.

Supongamos, así pues, que la nave espacial está acelerando. (Imaginaremos que suavemente, de modo que no se acerque a la velocidad de la luz). Como la nave espacial se está acelerando hacia arriba, la primera señal deberá recorrer menos distancia que en la situación examinada anteriormente, y por lo tanto llegará al suelo en menos de un segundo. Si el cohete se estuviera moviendo a velocidad constante, la segunda señal tardaría exactamente el mismo tiempo en llegar que la primera, y por lo tanto el intervalo entre ambas señales seguiría siendo un segundo. Pero debido a la aceleración, la nave se mueve más rápido cuando es enviada la segunda señal que cuando fue enviada la primera, de manera que la segunda señal deberá recorrer menos espacio que la primera, por lo que tardará menos tiempo en llegar al suelo. El observador situado en el suelo, por tanto, medirá un intervalo inferior a un segundo entre ambas señales, y discrepará del observador del techo, que afirma que las ha enviado con exactamente un segundo de diferencia.

Quizás esto no resulte sorprendente en el caso de la nave espacial acelerada; al fin y al cabo, ¡acabamos de dar una explicación! Pero recordemos que el principio de equivalencia afirma que esto también se aplica a una nave en reposo en un campo gravitatorio. Ello significa que, aunque el cohete no esté acelerando sino quieto, por

ejemplo en una plataforma de lanzamiento en la superficie de la Tierra, si el observador del techo envía señales hacia el suelo a intervalos de un segundo (según su reloj), el observador del suelo recibirá las señales a intervalos más cortos (según su reloj). ¡Y esto sí resulta sorprendente!

Podríamos preguntarnos también: ¿significa esto que la gravedad modifica el tiempo, o simplemente que estropea los relojes? Supongamos que el observador del suelo trepa hasta el techo, donde él y su colega comparan sus relojes. Como éstos son idénticos, ambos observadores comprobarán, con seguridad, que ahora coinciden en la duración de un segundo. Nada está equivocado en el reloj del observador del suelo: simplemente, mide el flujo local del tiempo, sea éste lo que sea.

De este modo, así como la relatividad especial afirma que el tiempo transcurre a ritmo diferente para observadores en movimiento relativo, la relatividad general nos dice que el tiempo transcurre de forma diferente para observadores en campos gravitatorios diferentes. Según la relatividad general, el observador del suelo mide un intervalo temporal más corto porque el tiempo transcurre más lentamente cerca de la superficie de la Tierra, donde la gravedad es más intensa. Cuanto más intenso el campo gravitatorio, mayor es este efecto. Si las leyes de Newton del movimiento pusieron fin a la idea de una posición absoluta en el espacio, ahora vemos que la teoría de la relatividad elimina la idea de un tiempo absoluto.

Esta predicción fue comprobada en 1962, utilizando un par de relojes muy precisos situados uno en la cumbre y otro en la base de una torre. El reloj de la base, que estaba más próximo a la tierra, resultó que avanzaba más lentamente, en concordancia exacta con la relatividad general. El efecto es minúsculo: un reloj situado en la superficie del Sol sólo ganaría un minuto por año en comparación con uno situado en la superficie de la Tierra. Aun así, la diferencia de ritmo de los relojes situados a diferentes alturas sobre la Tierra reviste actualmente una importancia práctica considerable, debido al advenimiento de sistemas de navegación muy precisos basados en las señales de los satélites. Si se ignorasen las predicciones de la relatividad general, ¡las posiciones que calcularíamos estarían equivocadas en varios kilómetros!

Nuestros relojes biológicos también se ven afectados por estos cambios del flujo del tiempo. Consideremos un par de gemelos, y supongamos que uno de ellos vive en la cumbre de una montaña y el otro al nivel del mar. El primer gemelo envejecería más rápidamente que el segundo, de modo que, cuando se volvieran a encontrar, el primero sería más viejo que el segundo. En este caso, la diferencia de edades sería muy pequeña, pero sería mucho mayor si uno de los gemelos emprendiera un largo viaje en una nave espacial en la cual fuera acelerado casi hasta la velocidad de la luz. Al regresar, este gemelo sería mucho más joven que el que hubiera permanecido en la Tierra. Esto se conoce como paradoja de los gemelos, pero sólo es una paradoja si se piensa en un tiempo absoluto. En la teoría de la relatividad no existe un tiempo absoluto único, sino que cada persona tiene su propia medida individual del tiempo,

que depende de dónde se halla y cómo se mueve.

Antes de 1915, se creía que el espacio y el tiempo constituían un escenario fijo en el que tenían lugar los acontecimientos, pero que no se veía afectado por ellos. Incluso en la teoría especial de la relatividad seguía siendo así. Los cuerpos se movían, las fuerzas atraían y repelían, pero el tiempo y el espacio seguían inmutables. Resultaba natural pensar que el espacio y el tiempo seguían para siempre. La situación, sin embargo, es harto diferente en la teoría general de la relatividad. Espacio y tiempo son ahora magnitudes dinámicas: cuando un cuerpo se mueve o una fuerza actúa, afectan a la curvatura del espacio y el tiempo, y, a su vez, la estructura del espacio-tiempo afecta a la manera en que los cuerpos se mueven y actúan las fuerzas. El espacio y el tiempo no tan sólo afectan, sino que también son afectados por todo lo que ocurre en el universo. Así como no es posible hablar de acontecimientos en el universo sin las nociones de espacio y tiempo, en la relatividad general carece de sentido hablar de espacio y tiempo fuera de los límites del universo. En las décadas siguientes a 1915, esta nueva imagen del espacio y el tiempo debía revolucionar nuestra visión del universo. Como veremos, la vieja idea de un universo esencialmente inmutable que podría haber existido, y podría continuar existiendo, desde siempre y para siempre, fue sustituida por la concepción de un universo dinámico en expansión que parecía haber empezado hace un tiempo finito, y que podría terminar en un tiempo finito en el futuro.