

Relatividad especial

▶ Augusto Holguin

Profesor Universidad
Metropolitana,
Departamento de Física



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 el reposo absoluto, el reposo depende del sistema de referencia desde el cual se observen los eventos. Por ejemplo, al jugar al ping-pong dentro de un tren en movimiento, uno encuentra 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 significa que no se puede determinar si dos acontecimientos que ocurren en tiempos diferentes han tenido lugar en la misma posición espacial. Por ejemplo, supongamos que en el tren la bola de ping-pong está botando, moviéndose verticalmente hacia arriba y hacia abajo y golpeando la mesa en el mismo lugar con un intervalo de un segundo (Fig. 1).

Para un observador situado junto a la vía, los dos botes parecerán tener lugar con una separación de varios 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 para ningún suceso. 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.

Sin embargo, tanto Aristóteles como Newton creían en el tiempo absoluto. Es decir, ambos pensaban que se podía medir el intervalo de tiempo entre

dos sucesos sin ambigüedad, y que dicho intervalo sería el mismo para todos los que lo midieran, ya sea que estuvieran dentro del tren o fuera de él, con tal que usaran un buen reloj. El tiempo era independiente del espacio y estaba totalmente separado de él. Esto es, de hecho, lo que la mayoría de la gente consideraría como de sentido común. Sin embargo, nuestras nociones de lo que parece ser el sentido común funcionan bien cuando se usan en el estudio del movimiento de cosas tales como: manzanas, automóviles, trenes o planetas, que viajan relativamente lentas. Pero, 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 y en 1865 el físico británico James Clerk Maxwell consiguió una verdadera teoría de la propagación de la luz, al 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 la existencia de perturbaciones de carácter ondulatorio del campo electromagnético combinado, algo así como, las olas producidas por una lancha, y que éstas perturbaciones u ondas que constituyen la luz, viajarían a velocidad constante $c = 300000 \text{ Km/s}$.

Como la teoría de Newton se había desprendido de un sistema de referencia absoluto, 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^a que estaba presente en todas partes, incluso en el espacio vacío^a.

Las ondas de luz debían viajar a través del éter al igual que las ondas de sonido lo hacen a través del

aire, y su velocidad debería ser, por lo tanto, relativa 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. Aclaremos esta idea.

El movimiento es relativo

La rapidez es una cantidad relativa. Su valor depende del sitio, o marco de referencia desde el cual lo observamos y medimos. Por lo tanto, la rapidez de un objeto puede ser distinta respecto a distintos marcos de referencia. Por ejemplo: supongamos que un picher siempre lanza la pelota de béisbol con la misma rapidez de 60 Km/h. Despreciando la resistencia del aire y otros pequeños efectos, la pelota se desplazará a 60 km/h al momento de atraparla. Pero, si el picher lanza la pelota desde la plataforma de un camión que se dirige hacia el receptor a 40 km/h. ¿Qué rapidez tiene la pelota cuando es atrapada?

Se necesitaría un guante porque la rapidez de la pelota será de 100 km/h (60 km/h respecto al camión más 40 km/h del camión respecto al suelo). Ahora supongamos que el camión se aleja del receptor a 40 km/h. Esta vez no es necesario el guante, pues la pelota llega con una rapidez de 20 km/h (ya que 60 km/h menos 40 km/h es igual a 20 km/h). Esto no es ninguna sorpresa, es de esperarse que la pelota se desplace más aprisa cuando el camión se dirige hacia el receptor y más lentamente cuando se aleja de él.

Para el caso de la luz, dado que la Tierra se movía a través del éter en su órbita alrededor del Sol, la velocidad de la luz medida cuando el rayo se movía en el mismo sentido del movimiento de la Tierra a través del éter (el receptor alejándose de la luz) debería ser menor que la velocidad medida cuando se movía en sentido opuesto al movimiento de la Tierra

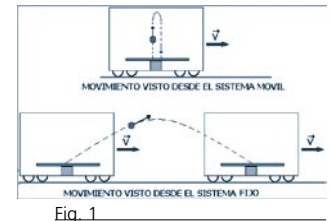


Fig. 1

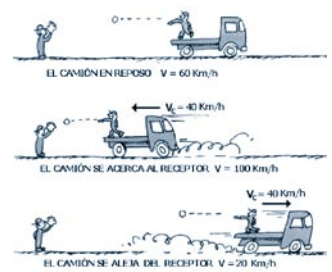


Fig. 2

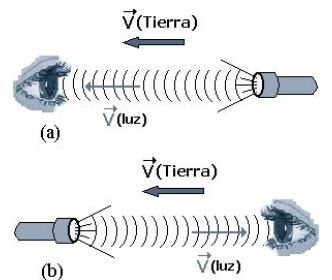


Fig. 3

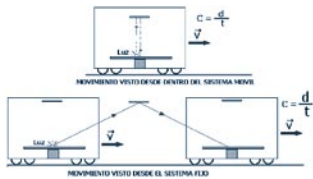


Fig. 4

(el receptor saldría al encuentro del rayo), o cuando se movía en dirección perpendicular al movimiento de la Tierra.

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 ingenioso experimento. Ellos compararon la velocidad de la luz en la dirección del movimiento de la Tierra, tanto en un sentido como en otro, con la velocidad de la luz en la dirección perpendicular a dicho movimiento. Para su sorpresa, ¡encontraron que las velocidades eran exactamente iguales!

Las pelotas de béisbol no se comportan de esta manera. ¡Pero resulta que la luz sí! Toda medición de la rapidez de la luz en el espacio vacío arroja el mismo valor de 300000 km/s sin importar la rapidez de la fuente ni la del receptor. Normalmente no notamos este efecto debido a lo increíblemente aprisa que viaja la luz. La luz proveniente de una fuente que se acerca llega al observador con la misma rapidez que la luz que proviene de una fuente que se aleja. Y la rapidez de la luz es la misma ya sea que nos acerquemos o nos alejemos de la fuente de luz.

¿Cómo tomó este descubrimiento la comunidad física? Se quedaron tan perplejos como se quedarían todos los observadores si la pelota de béisbol del ejemplo anterior llegara siempre con la misma rapidez sin importar cómo se movieran el picher o el receptor.

Los experimentos se repitieron una y otra vez, siempre con el mismo resultado. Nada podía alterar la rapidez de la luz. Se propusieron diversas interpretaciones, pero ninguna de ellas resultaba satisfactoria, El edificio de la física se tambaleaba.

Entre 1887 y 1905, hubo diversos intentos, de explicar el resultado del experimento de Michelson-Morley. Sin embargo, en 1905, (18 años después) 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. Albert Einstein consideró la rapidez de la luz en términos de la definición de rapidez. ¿Qué es la rapidez? Pues es la cantidad de espacio que se recorre durante cierto tiempo. Einstein se percató de que los conceptos clásicos de espacio y de tiempo eran dudosos y que un cambio en el espacio (un desplazamiento) afecta el transcurrir del tiempo. Para la luz el cociente del espacio entre el tiempo, es el mismo para todos aquellos que lo miden, en consecuencia al variar el desplazamiento debe también, variar el intervalo de tiempo. Concluyó que el espacio y el tiempo eran parte de una entidad única: el *espacio tiempo*. El hecho de que la velocidad de la luz sea constante, se dijo Einstein, unifica el *espacio tiempo*.

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 uniforme*, 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 ni la dirección con la que se estuvieran moviendo. Esta idea tan simple tiene algunas consecuencias extraordinarias.

Dilatación del tiempo

Regresemos al ejemplo de la pelota de ping-pong que está botando dentro del tren fantásticamente rápido. Pero, en lugar de la pelota usamos un pulso de luz emitido verticalmente desde la mesa y que se refleje en un espejo colocado sobre la misma, como la velocidad de la luz debe ser la misma para el observador dentro del tren, que mide un despla-

zamiento pequeño, como para el que miden un desplazamiento mucho mayor fuera del mismo (Fig. 4), el tiempo transcurrido entre rebotes dentro del tren debe ser más corto que el medido fuera del mismo, el haz, visto desde afuera, debe tardar más al hacer un viaje más largo; es decir, el intervalo de ida y vuelta entre la emisión y el reflejo medido desde el sistema en reposo será mayor. En consecuencia, el tiempo dentro del tren transcurre más lentamente.

La dilatación del tiempo no es un fenómeno exclusivo de este simple reloj de luz. Es el tiempo mismo en el marco de referencia en movimiento, visto desde nuestro marco de referencia, el que transcurre más lentamente. Los corazones de los ocupantes del tren, o más apropiadamente, los tripulantes de alguna nave espacial que se mueva a gran velocidad, latirán con menor frecuencia, un reloj de pulsera, un péndulo, un ciclo de fertilidad, una célula que se divide. Veremos que todo ocurre más lentamente en el interior de la nave. ¡Es el tiempo mismo el que se dilata!

¿Cómo ven los ocupantes de la nave su propio tiempo? ¿Se ven a sí mismos moviéndose en cámara lenta? ¿Experimentan intervalos de tiempo mayores como consecuencia de la dilatación temporal? Resulta que ellos no notan ninguno de estos efectos. El tiempo para ellos es igual que cuando nos parece que no se mueven. ¿Cómo ven nuestro tiempo los ocupantes de la nave? ¿Acaso ven que nuestro tiempo transcurre más aprisa? La respuesta es no: el movimiento es relativo, y desde su marco de referencia les parecerá que somos nosotros quienes nos movemos. Así, ven que nuestro tiempo transcurre más lentamente, del mismo modo en que nosotros vemos que su tiempo transcurre más lentamente. En conformidad con el *primer postulado de la relatividad especial*.

Esto no es pura hipótesis, décadas de experimentación han confirmado la realidad de la dilatación

del tiempo con todo detalle. En 1938, H. E. Ives, de los laboratorios de la Bell Telephone, fue el primero en corroborar el retardo temporal relativista. Utilizó el ritmo oscilante de átomos de hidrógeno radiantes como reloj natural. Cuanto más rápido se movían los átomos, más lenta era su vibración, en exacta concordancia con la predicción de la relatividad especial.

Otro ejemplo muy interesante de la dilatación del tiempo con el movimiento, es suministrado por los mesones "mu" (muones), que son partículas que se desintegran espontáneamente después de un tiempo de vida medio de $2,2 \times 10^{-6}$ seg. Llegan a la tierra en los rayos cósmicos, y algunos se desintegran en medio del aire, pero el resto se desintegra solamente después de haber encontrado un pedazo de material y haberse detenido. Está claro que en una vida tan corta el muón no puede viajar mucho más de 600 metros, incluso a la velocidad de la luz. Pero a pesar de que los muones se forman en la parte superior de la atmósfera, a unos 10 Kilómetros de altura se los encuentra en el laboratorio con los rayos cósmicos. ¿Cómo puede ser esto? La contestación es que los diferentes muones se mueven con varias velocidades, algunas de las cuales son muy cercanas a la velocidad de la luz. Mientras que desde su propio punto de vista viven solamente 2,2 micro segundos, desde nuestro punto de vista viven considerablemente más, lo suficiente para que puedan llegar a tierra.

También, los piones en reposo viven un promedio de alrededor de 0,026 millonésimas de segundo antes de desintegrarse. Grandes máquinas, como el ciclotrón, pueden acelerar con facilidad tales partículas hasta, digamos, 75% de la velocidad de la luz, después de lo cual deberían sobrevivir el tiempo suficiente para desplazarse unos 5,9 m. En cambio, sus recorridos promedio son de unos 8,8 m, lo que

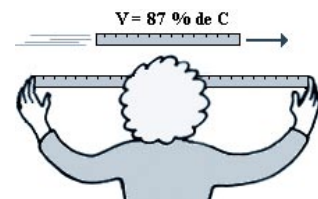


Fig. 5

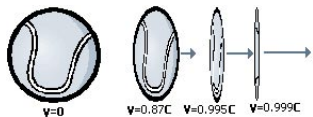


Fig. 6

significa que viven más tiempo del que deberían^a. Si calculamos el tiempo “visto” por el pión, mediante la ecuación de la dilatación del tiempo, su tiempo de vida vuelve a ser 0,026 millonésimas de segundo, los piones han vivido lo mismo. Pero para el investigador en reposo han vivido mucho más.

Contracción de la longitud

Como se vio para el reloj de luz, tanto el espacio como el tiempo sufren cambios para un objeto en movimiento, y otra consecuencia de la teoría de la Relatividad Especial, es que para un observador externo, un objeto que se mueve parece contraerse en la dirección del movimiento. La magnitud de la contracción está relacionada con la magnitud de la dilatación del tiempo.

La contracción correspondiente a las velocidades de la vida diaria es tan pequeña que resulta indetectable, pero a velocidades relativistas la contracción se hace notable.

Por ejemplo, una regla de un metro de longitud que pasara junto a nosotros a bordo de una nave espacial que viajara al 87% de la velocidad de la luz, parecería de sólo 0.5 m. de longitud. Si pasara al 99.5% de la velocidad de la luz, su longitud sería solo un décimo de su valor original. Conforme la velocidad relativa se aproxima a la luz, la longitud medida de los objetos se acerca a cero.

¿Se contraen las reglas –y el resto del entorno— desde el punto de vista de las personas que viajan a bordo de la nave? La respuesta es no. Los ocupantes de la nave no detectan nada raro en las longitudes de los objetos que se encuentran en su marco de referencia. De lo contrario se violaría el primer postulado de la relatividad. No olvidemos que todas las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia con movimiento uniforme.

Además, no hay velocidad relativa entre esos

objetos ni entre los acontecimientos que observan en su propio marco de referencia. Entre ellos y nuestro marco de referencia, empero, sí hay velocidad relativa, así que ellos ven que nuestras reglas –y nuestros propios cuerpos— se contraen.

La contracción de los objetos en movimiento es la contracción del espacio mismo. El espacio se contrae sólo en una dirección: la dirección del movimiento. Las longitudes en la dirección perpendicular a la del movimiento son iguales en ambos marcos de referencia. Así pues, si un objeto se desplaza en la dirección horizontal, su longitud vertical no sufre contracción alguna.

Si un objeto está en reposo, es decir, que $v = 0$ entonces, $L = L_0$, su longitud en reposo, como es de esperar. Dijimos antes que si un objeto se mueve al 87% de la rapidez de la luz, su longitud se reduce a la mitad (cuando $v = 0.87c$, $L = 0.5L_0$). Para el valor $v = 0.995c$, $L = 0.1L_0$. Y si el objeto se moviera a c , su longitud se reduciría a cero. Ésta es una de las razones por las cuales la velocidad de la luz es el límite superior para la velocidad de todo objeto material.

Relación entre masa y energía

La revelación más notable de la teoría especial de la relatividad de Einstein es que la masa no es más que una forma de energía. Einstein se percató de que todo objeto con masa tiene “energía de existencia”, aun cuando esté en reposo y no posea energía potencial. La “energía de existencia” se llama energía en reposo y se denota con el símbolo E_0 . (Es importante distinguir entre la energía en reposo E_0 y la energía total E , que puede incluir energías potenciales y cinéticas). La cantidad de energía en reposo E_0 se relaciona con la masa m a través de la ecuación más importante del siglo XX: $E_0 = mc^2$

En la expresión $E_0 = mc^2$ el elevado valor de

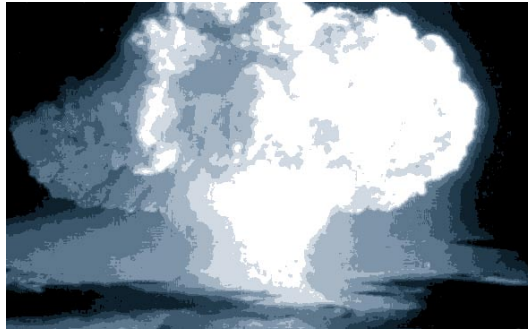


Fig. 7

c nos dice que una masa pequeña corresponde, en nuestras unidades, a una enorme cantidad de energía en reposo. De modo que la masa de un objeto es de hecho la energía que contiene. Debido a la equivalencia entre energía y masa, la energía que un objeto adquiere debido a su movimiento se añadirá a su masa incrementándola. Este efecto es realmente significativo para objetos que se muevan a velocidades cercanas a la de la luz. Por ejemplo, a una velocidad de un 10% de la de la luz la masa de un objeto es sólo un 0,5% mayor de la masa en reposo, mientras que a un 90% de la velocidad de la luz la masa sería de más del doble de la normal. Cuando la velocidad del objeto se acerca a la velocidad de la luz, su masa tiende a infinito. Esto también evita que se pueda alcanzar la velocidad de la luz, ya que se necesitaría suministrar una cantidad infinita de energía al objeto.

La energía en reposo, como cualquier otra forma de energía, puede transformarse en otras formas. Un ejemplo común es la conversión de energía en reposo en energía cinética que se lleva a cabo cuando encendemos un fósforo. Las moléculas de fósforo que contiene la cabeza de la cerilla se combinan con moléculas de oxígeno del aire para formar nuevas moléculas cuya energía cinética es apreciablemente mayor que la que tenían las moléculas de fósforo y oxígeno antes de la reacción, de aquí que la cerilla encendida esté caliente. La masa de las moléculas así producidas es muy ligeramente inferior a la de las moléculas de fósforo y de oxígeno originales. La diferencia es de alrededor de una parte en 10^9 . Todas las reacciones químicas que ceden energía están acompañadas de una disminución correspondiente de la masa.

En las reacciones nucleares, la conversión de energía en reposo en energía cinética es superior que en las reacciones químicas; la disminución de

la masa es de alrededor de una parte en 10^3 . Esta disminución de la masa, que se lleva a cabo en el Sol y en otras estrellas por el proceso de fusión termonuclear, baña de energía radiante al sistema solar y mantiene la vida.

La energía liberada es una milésima parte de la masa inicial del combustible nuclear

La etapa actual de fusión termonuclear del Sol data de hace 5000 millones de años, y su reserva de hidrógeno, que es el combustible de la fusión, durará 5000 millones de años más.

Si se trata de un proceso de fisión nuclear, la masa de los productos de la fisión, también se reduce en alrededor de una parte en mil. O sea, la masa de los productos de la fisión es de alrededor de 0.999 veces la masa de los átomos de uranio originales antes de llevarse a cabo la reacción. En cualquiera de los dos casos una parte de la energía en reposo del combustible, y por tanto de su masa, se convierte en energía cinética de los productos de la reacción.

La masa convertida, ya sea por reacciones químicas o nucleares, corresponde a diminutas cantidades de energía en reposo transformadas en otras formas de energía. Los minúsculos cambios en la energía en reposo o la masa no habían sido detectables sino hasta fechas recientes. Desde los tiempos de Einstein sabemos que la energía en reposo que contiene un gramo de materia es mayor que todas las otras formas de energía que se usan diariamente en las ciudades más grandes del mundo. La ecuación $E_0 = mc^2$ no sólo es válida para las reacciones químicas y nucleares. Todo cambio en la energía en reposo corresponde a un cambio en la masa. La masa del filamento de una bombilla a la que se suministra energía eléctrica

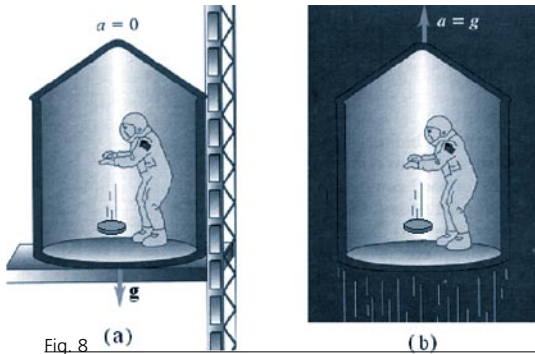


Fig. 8

es mayor que cuando la bombilla está apagada. Una taza de té tiene más masa cuando el líquido está caliente que cuando está frío. La masa del resorte de un reloj al que se ha dado cuerda es mayor que cuando el reloj no tiene cuerda. Pero los cambios de la masa que intervienen en estos ejemplos son muy pequeños; demasiado pequeños para poder ser medidos por los métodos convencionales. ¡No es de extrañar que la relación fundamental entre la masa y la energía no se haya descubierto hasta este siglo! La expresión $E_0 = mc^2$ es más que una fórmula para convertir la masa en energía en reposo, o viceversa. Lo que dice es que la masa no es más que energía concentrada. Si deseamos saber cuánta energía en reposo contiene un sistema, basta con medir su masa. La energía de un objeto en reposo es su masa.

Relatividad general

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 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. 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 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.

Se define masa como una medida de la inercia de un cuerpo. La segunda ley de Newton relaciona la fuerza que actúa sobre un cuerpo con su aceleración y con su *masa inercial*, que es como la llamamos. Podríamos decir que la *masa inercial* representa una resistencia a cualquier fuerza. Pero también la masa es una propiedad relacionada con la fuerza gravitacional, es decir, la masa como una cantidad que determina la intensidad de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos. A ésta la llamamos *masa gravitacional*.

No es obvio en absoluto que la *masa inercial* de un cuerpo sea igual a su *masa gravitacional*. (La fuerza de gravedad podría haber dependido de una propiedad completamente diferente de un cuerpo, así como la fuerza eléctrica depende de una propiedad llamada carga eléctrica.) Los experimentos indican que esos dos tipos de masa son iguales para todo cuerpo, y experimentos modernos lo confirman con una precisión de aproximadamente 1 parte en 10^{12} .

La evidencia experimental de que las masas *gravitacional e inercial* son iguales (o por lo menos proporcionales) es sorprendente. Esta equivalencia entre estas masas fue elevada a un principio de la

naturaleza por Einstein, que lo llamó simplemente *principio de equivalencia*, y lo usó como base para su teoría de la relatividad general (1916).

El *principio de equivalencia*, como lo formuló Einstein, puede ser enunciado de otra manera: no hay ningún experimento que los observadores puedan efectuar para distinguir si una aceleración surge de una fuerza gravitacional o porque su marco de referencia esté siendo acelerado. Por ejemplo, si un astronauta estuviese en el espacio y algún objeto cayese al piso de su nave, podría suponer que una fuerza gravitacional estuviese actuando sobre el objeto, específicamente sobre la *masa gravitacional* del objeto (Fig. 7 (a)).

Por otra parte, también podría ser posible que el cuerpo cayese debido a que su nave espacial estuviese acelerando hacia arriba, y la *masa inercial* del objeto haría que éste tienda a quedarse en reposo (Fig. 7(b)). Los efectos serían indistinguibles de acuerdo con el *principio de equivalencia*, porque las masas *inercial* y *gravitacional* del objeto, que determinan cómo "reacciona" un cuerpo a influencias externas, no son distinguibles una de otra.

El principio de equivalencia, también muestra que la luz debe flexionarse debido a la fuerza gravitacional de un cuerpo masivo. Consideremos un experimento ideal en un elevador en el espacio libre donde no actúe la gravedad. Si se tiene un agujero a un lado en el elevador y un rayo de luz entra por él, el rayo viaja directamente al otro lado del elevador dejando un punto luminoso en el lado opuesto si el elevador está en reposo. Si el elevador está acelerando hacia arriba como en la figura 8, el rayo de luz aún viajará en línea recta al ser observado en el marco de referencia en reposo. Sin embargo, en el elevador acelerando hacia arriba, el rayo es observado como curvándose hacia abajo. ¿Por qué? La razón es que durante el tiempo que

la luz viaja de un lado al otro del elevador, éste se mueve hacia arriba con rapidez creciente.

Ahora, de acuerdo con el principio de equivalencia, un marco de referencia acelerado hacia arriba, es equivalente a un campo gravitacional dirigido hacia abajo. Por consiguiente, podemos considerar que la trayectoria curva de la luz en la figura también puede ser debida al efecto del campo gravitacional. Podemos entonces esperar que la gravedad ejerza una "fuerza" sobre un rayo de luz y lo desvíe sacándolo de una trayectoria en línea recta.

Un rayo de luz en el vacío, viaja a lo largo de la trayectoria más corta o más directa entre dos puntos. Si no lo hiciera así, algún otro objeto podría viajar entre los dos puntos en un tiempo más corto resultando así que se mueve con mayor rapidez que la luz, esto estaría en contradicción con la teoría de la relatividad especial. Si un rayo de luz puede seguir una trayectoria curva (como vimos arriba), entonces esta trayectoria curva debe ser la distancia más corta entre los dos puntos.

Esto sugiere que el espacio mismo está curvado y que es el campo gravitacional lo que causa la curvatura, la cual es mayor cerca de cuerpos muy masivos.

Para visualizar esta curvatura del espacio, podemos pensar que el espacio es una lámina delgada de hule; si una masa pesada se coloca en ella, la curvará como se muestra en la figura 9. En este modelo, el peso corresponde a una masa enorme que ocasiona que el espacio mismo se curve.

Einstein, en su teoría general de la relatividad, predijo justamente que la luz es afectada por los campos gravitacionales. Calculó que la luz de una estrella distante sería reflexionada 1.75" de arco (muy pequeño pero detectable) al pasar cerca del Sol. Las predicciones de Einstein sobre las desviaciones de la luz no pudieron ser comprobadas inmediatamente en 1915 a causa de la primera

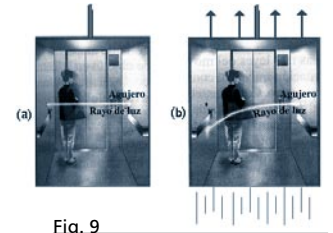


Fig. 9

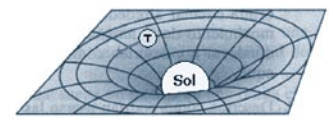


Fig. 11

guerra mundial, y no fue posible hacerlo hasta 1919, en que una expedición británica, observando un eclipse de Sol desde África oriental demostró que la luz era verdaderamente desviada por el Sol, justo como la teoría predecía.

Entonces, 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 geodésica.

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.

En relatividad general, los cuerpos siguen siempre líneas rectas en el espacio-tiempo cuadrimensional; sin embargo, nos parece que se mueven a lo largo de trayectorias curvadas en nuestro espacio tridimensional. 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 cuadrimensional, 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.

Otra predicción de la relatividad general es que el tiempo debería transcurrir más lentamente cerca de un cuerpo de gran masa como la Tierra. 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 reloj de la parte inferior del depósito que estaba más cerca de la Tierra, se atrasaba con relación al reloj de la parte superior, exactamente en la proporción predicha por 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 ecuaciones originales de la relatividad general de Einstein predecían que el universo se expandía o se contraía. Por ese motivo, Einstein añadió un término ulterior a las ecuaciones que relacionan la masa y la energía del universo con la curvatura del espacio-tiempo, llamado "término cosmológico" que ejerce un efecto gravitatorio repelente. Así, era posible equilibrar la atracción de la materia con la repulsión del término cosmológico. En otras palabras. De este modo cabía obtener un modelo del universo que persistiera indefinidamente en el mismo estado. De haberse aferrado a sus ecuaciones originales, sin el término cosmológico, Einstein habría llegado a predecir que el universo se expande o se contrae. Pero, a nadie se le ocurrió que el universo cambiaba con el tiempo, hasta que en 1929 Edwin Hubble descubrió que se alejaban de nosotros galaxias remotas. El universo se hallaba en expansión. Einstein

calificó más tarde a su término cosmológico como “el mayor error de mi vida”.

Pero, con o sin el término cosmológico, subsistía el problema de que la materia determinaba la curvatura sobre sí mismo del espacio-tiempo, aunque generalmente no se reconociese como tal, lo que significaba que la materia podía combar sobre sí misma una región hasta el punto de que llegara en realidad a aislarse del resto del universo. La región se convertiría en lo que se denomina un *agujero negro*. Podrían caer objetos en los agujeros negros y nada escaparía de allí. Para salir tendrían que desplazarse a una velocidad superior a la de la luz, lo cual no es posible por la teoría de la relatividad. De este modo, dentro del agujero negro quedaría atrapada la materia, que se contraería hasta un estado desconocido de elevadísima densidad.

Einstein se sintió profundamente inquieto por las referencias de este colapso y se negó a creer lo que sucedía. En 1939 Robert Oppenheimer demostró que una estrella vieja, con una masa de más del doble de la del sol, se contraería inevitablemente tras haber agotado todo su combustible nuclear. Entonces sobrevino la guerra y Oppenheimer se consagró al proyecto de la bomba atómica dejando de ocuparse del colapso gravitatorio. Otros científicos se interesaban más por una física que pudieran estudiar en la Tierra. Desconfiaban de predicciones sobre remotas regiones del universo, porque no creían que pudieran comprobarlas mediante observaciones. El gran progreso en alcance y calidad de las observaciones astronómicas durante la década de los sesenta suscitó un nuevo interés por el colapso gravitatorio y el universo primitivo.

Si la luz no puede escapar de un agujero negro, y si los agujeros negros son tan pequeños como sugiere el ejemplo. ¿cómo podemos saber que tales cosas existen? Si hay gas o polvo cerca de un

agujero negro, tenderá a formar un disco de acrecentamiento que girará en torno del agujero y caerá en él, como en un remolino (Fig. 11).

La fricción dentro del material del disco hace que pierda energía mecánica y caiga en espiral hacia el agujero negro, comprimiéndose al hacerlo. Esto causa un calentamiento del material, como sucede con el aire comprimido en una bomba para bicicleta. Se pueden alcanzar temperaturas por encima de 106 K en el disco de acrecentamiento, de modo que no sólo se emite

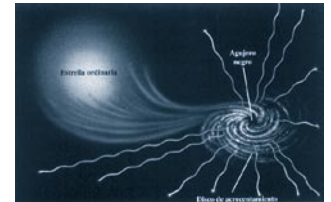


Fig. 12

