

INTRODUCCIÓN A LA RELATIVIDAD GENERAL

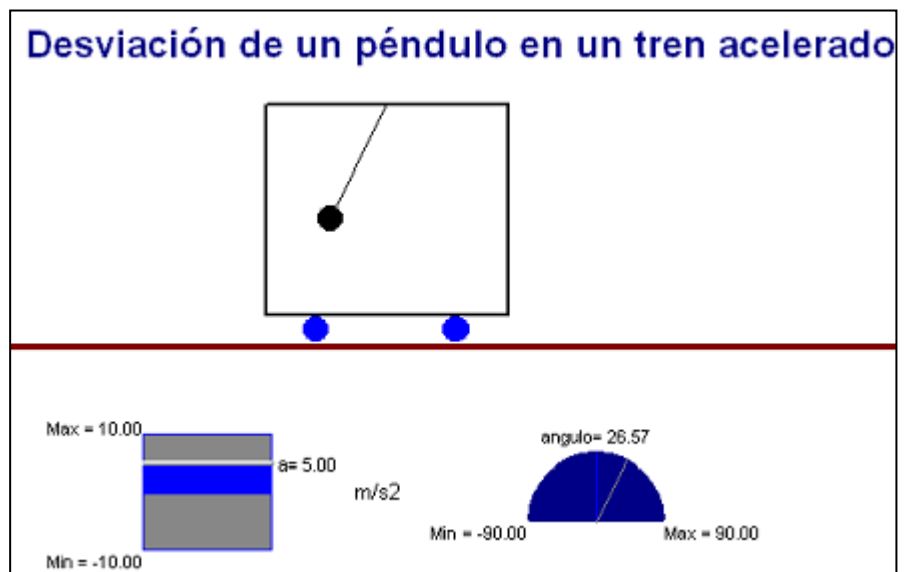
1. Carácter restringido de la relatividad especial

La teoría de la relatividad especial proporcionó un avance impresionante a la ciencia porque consiguió establecer una equivalencia entre los sistemas de referencia inerciales (SRI) para el estudio de las leyes que rigen todos los procesos físicos. Por primera vez en la historia de la física se dio una respuesta explícita al problema de la relatividad de los movimientos. Esta respuesta se formalizó operativamente a través de unas nuevas leyes de transformación de las magnitudes al pasar de un SRI. Utilizando estas leyes de transformación, las leyes fundamentales del electromagnetismo y las de la mecánica relativista se escriben igual en todos los SRI. En consecuencia, en cualquier SRI se pueden aplicar ambas teorías para estudiar cada proceso físico.

Sin embargo, después de apreciar esta gran aportación de la teoría de la relatividad especial, resulta casi inevitable plantear una seria objeción a la misma. Paradójicamente esta objeción está relacionada con el reto fundamental de la relatividad, es decir, con el reto de extender la aplicabilidad de todas las leyes de la física a todos los sistemas de referencia. Porque, efectivamente, la relatividad especial consiguió que todas las leyes físicas se puedan aplicar en los SRI (los mismos sistemas de referencia en los que ya se podían aplicar las leyes de la mecánica de Newton). Pero, ¿qué ocurre en sistemas de referencia que no sean inerciales, sino acelerados? Por otro lado, ¿existe en el Universo algún SRI?

Cuando se analizan las experiencias que tenemos a diario en vehículos acelerados, se observa que en ellos es posible efectuar pruebas que pongan de relieve su aceleración. Por ejemplo, un pasajero de un tren nota la fuerza que le hace el suelo mientras el tren arranca, cuando frena o al trazar una curva.

Además, puede diseñar experimentos calcular la aceleración del vagón en el que viaja. Así, por ejemplo, puede colgar un péndulo del techo. Mientras el vagón tenga un movimiento rectilíneo y uniforme el péndulo se mantiene en posición vertical, pero si el tren acelera, el péndulo se desvía y el viajero, después de medir el ángulo de dicha desviación, puede calcular la aceleración de su vagón (con respecto al suelo) utilizando las leyes de la mecánica de Newton.



Así resulta que los sistemas de referencia no inerciales (como el ligado al tren acelerado) son perfectamente identificables, distinguibles de los inerciales y, por lo tanto, del reposo. Como consecuencia de ello, dichos sistemas de referencia acelerados no cumplen el primer postulado de la relatividad especial, sino que, en el marco de esta teoría, las leyes de la física no se mantienen igual al trasladarlas a este tipo de sistemas de referencia. Este hecho no resulta nada satisfactorio para una mentalidad relativista. Con esta mentalidad inquieta que dentro de un vehículo que cambia su velocidad, por ejemplo de 5 km/s a 7 km/s, no se puedan detectar ni los 5 km/s ni los 7 km/s y sí, en cambio, el incremento de 2 km/s cada segundo. Dicho de otro modo, resulta insatisfactorio que algo tan fundamental como el principio de relatividad parezca que sólo se pueda aplicar a un tipo de movimiento, el movimiento uniforme. ¿No sería más lógico y deseable plantear que todos los movimientos deberían ser, o bien absolutos, o bien relativos?

Estas inquietudes inducen hacia un replanteamiento del reto relativista, con el objetivo de **extender la aplicabilidad del principio de relatividad a cualquier sistema de referencia** en lugar de que la teoría quede restringida a los SRI. Con más razón, si tenemos en cuenta que cualquier sistema de referencia que se adopte en el Universo se ha de ligar a algún objeto del cosmos, y, por tanto, será acelerado, ya que todos los cuerpos celestes tienen movimientos acelerados debido a que se ejercen entre sí fuerzas gravitatorias.

2. El reto de la relatividad general y la clave gravitatoria

Einstein fue siempre consciente del carácter restringido de su teoría de la relatividad especial, es decir, de la limitación de la misma a un tipo particular de sistemas de referencia (los SRI). Quizá podría haber adoptado una actitud conformista o autocomplaciente y defender dicha teoría, arguyendo, por ejemplo, que esta limitación no le resta belleza, ni tampoco demasiada utilidad, ya que, desde un punto de vista práctico, las aceleraciones de los sistemas de referencia reales son, bastantes veces, poco significativas y en muchos casos quizá se podrían tratar como agentes que desvían los resultados que predice la teoría.



Sin embargo, para el creador de la relatividad estas posibilidades de eludir el problema ni siquiera fueron tenidas en cuenta. Ante el hecho innegable de que la aceleración de los sistemas de referencia afecta al comportamiento mecánico de los objetos respecto de ellos, no siguió el camino más evidente, que habría sido excluir a estos sistemas de referencia acelerados de su principio de relatividad. Él se propuso conseguir justamente lo contrario: quiso replantear las leyes de la física con el propósito de que la relatividad se pudiera extender también a los sistemas de referencia no inerciales. Avanzar hacia este objetivo le llevó a Einstein unos diez años de arduo trabajo, aproximadamente desde el 1905 hasta el 1915, en los cuales pasó por momentos verdaderamente difíciles ante la posibilidad de no conseguir el éxito deseado. En el año 1912, con la relatividad general todavía sin acabar, escribió a un amigo:

En mi vida había trabajado tan duramente [...] Comparada con este problema, la teoría original de la relatividad [se refiere a la relatividad especial] es un juego de niños.

Afortunadamente el resultado de este gran esfuerzo fue la invención de una teoría relativista nueva, la relatividad general, que superó brillantemente el reto al que nos estamos refiriendo.

En el tema dedicado a la ley de gravitación se estudia la equivalencia entre la masa inercial y la masa gravitatoria, que explica la siguiente propiedad exclusiva del campo gravitatorio: Todos los objetos tienen, si están sometidos únicamente a campos gravitatorios, la misma aceleración [Por ejemplo, todos los objetos, en ausencia de rozamiento, caen libremente con una aceleración aproximadamente igual a $9,8 \text{ m/s}^2$ en las proximidades de la superficie terrestre].

Pues bien, esta peculiaridad del campo gravitatorio dio a Einstein una clave fundamental para generalizar la relatividad. Llegó a intuir esta clave gravitatoria después de reflexionar profundamente sobre estos dos hechos: 1) En los sistemas de referencia acelerados no se puede aplicar el primer postulado de la relatividad especial. (2) Los sistemas de referencia reales (como, por ejemplo, un planeta o una estrella), están acelerados, precisamente debido a que se ejercen sobre ellos fuerzas gravitatorias. En el libro *La evolución de la física*, que escribió con el científico Leopold Infeld (1898-1968), reveló así esta intuición:

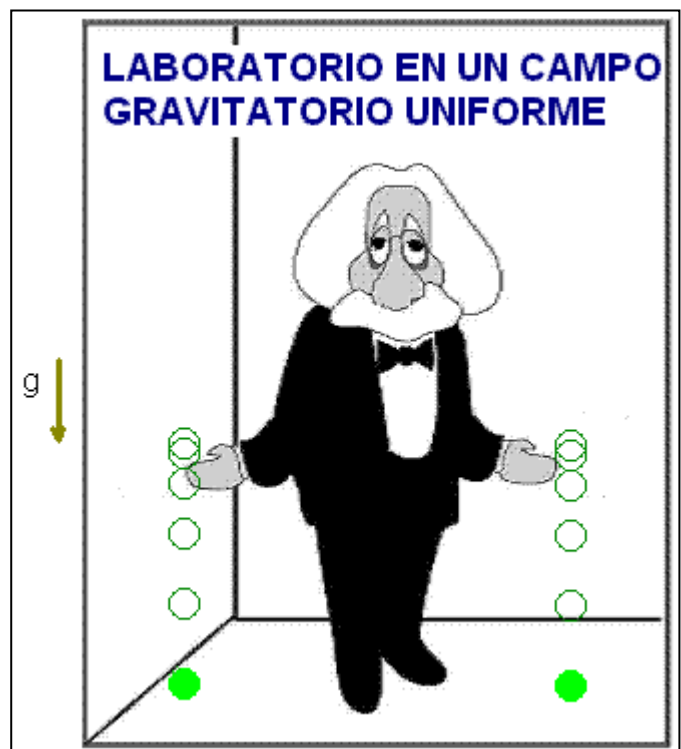
Esta ley [la de los cuerpos que caen], que puede formularse también como la ley de equivalencia de las masas inercial y gravitatoria, hizo que me diera cuenta cabal de toda su significación. Me asombré en grado sumo de su existencia e intuí que en ella debía estar la clave de una comprensión más profunda de la inercia y de la gravitación.

3. Principio de equivalencia

Reproducimos seguidamente algunos aspectos del razonamiento original que permitió a Einstein avanzar hacia la generalización de la relatividad. Lo sugirió en 1907, volvió a él en 1911, y, a partir de entonces, lo utilizó como un principio básico.

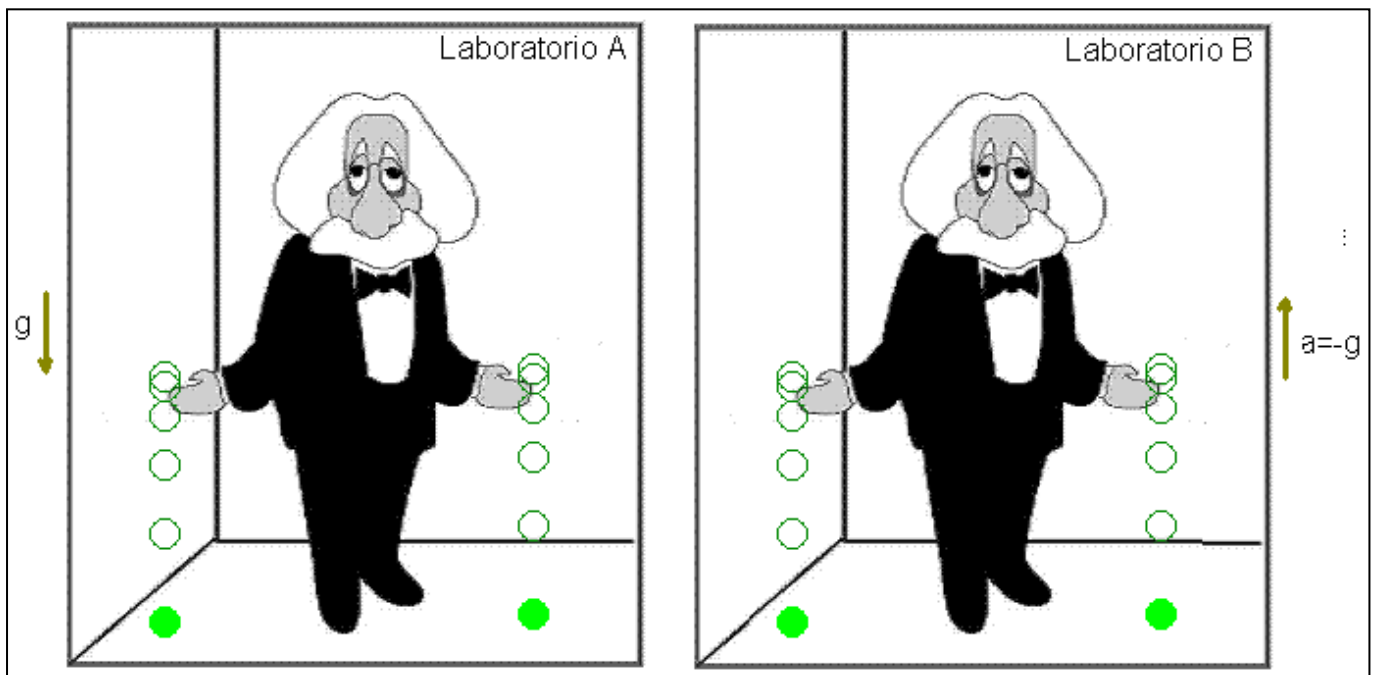
El razonamiento comienza considerando un laboratorio, A, en reposo en un campo gravitatorio uniforme y otro laboratorio ideal, B, supuestamente aislado y, en consecuencia, no sometido a fuerzas gravitatorias. Se pretende comparar el comportamiento mecánico de los objetos en ambos laboratorios. Como ejemplo de una situación mecánica que permite realizar esta comparación, se considera el movimiento de dos esferas que se dejan libres en ellos.

El dibujo adjunto muestra el resultado de este experimento mental en el laboratorio A, sometido a la acción del campo gravitatorio uniforme de intensidad g . Debido a la equivalencia entre masa inercial y masa gravitatoria, las dos esferas caen ahí con la misma aceleración $a=g$.



Pensemos ahora en el laboratorio ideal, B, no sometido a ningún campo gravitatorio. En estas condiciones ideales ese laboratorio es un sistema de referencia inercial (SRI). Por lo tanto, se le puede aplicar el primer postulado de la relatividad especial. Esto significa que los objetos que se suelten ahí han de compartir cualquier movimiento rectilíneo y uniforme que el laboratorio pueda tener. Dicho de otro modo, mientras el laboratorio ideal tenga un movimiento rectilíneo y uniforme, las esferas permanecerán en reposo dentro de él. Entonces, ¿cómo se puede conseguir en ese laboratorio ideal que las dos esferas tengan el mismo comportamiento mecánico que tienen en el laboratorio terrestre?, es decir, ¿cómo se puede hacer que caigan en su interior con una aceleración igual a g ? Sencillamente, pensó Einstein, dotando al laboratorio ideal de esa misma aceleración, $a=g$, pero dirigida en sentido contrario ("hacia arriba").

El dibujo adjunto (debajo) muestra el resultado de este experimento mental de Einstein en los dos laboratorios. A los ojos del observador ubicado dentro de cada uno de ellos, dicho resultado es idéntico, con lo que, siguiendo este razonamiento, no podrá saber si su laboratorio está sometido a un campo gravitatorio o si, en ausencia de él, está acelerado.



La generalización de este razonamiento conduce a una consecuencia muy importante en relación con el problema de la relatividad: no se puede distinguir por medio de experimentos mecánicos un sistema de referencia sometido a un campo gravitatorio uniforme de intensidad, g , de otro sistema de referencia que, no sometido a ningún campo gravitatorio, tenga una aceleración constante, de sentido contrario e igual a g . Si esta conclusión fuera cierta, no únicamente en relación con experimentos mecánicos, sino para cualquier tipo de pruebas, resultaría que cualquier aceleración constante se podría sustituir, a todos los efectos, por un campo gravitatorio uniforme y viceversa. Einstein se dio cuenta de la importancia de esta posibilidad y, en el camino hacia la construcción de la teoría de la relatividad general, elevó esta hipótesis a la categoría de principio fundamental. El resultado se denomina principio de equivalencia y se puede expresar así:

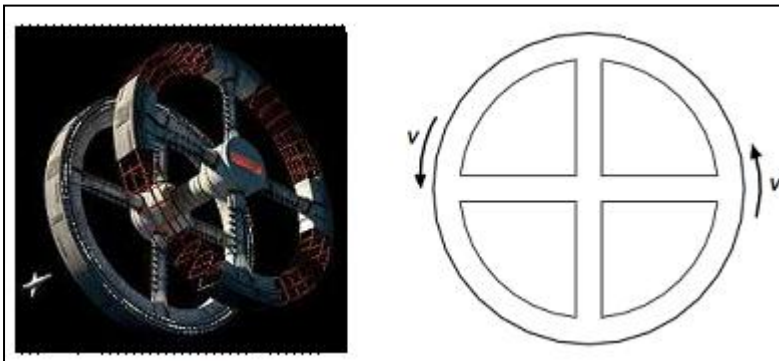
Principio de equivalencia: *Sean dos sistemas de referencia: un sistema de referencia K , no acelerado o inercial, en el que actúa un campo gravitatorio uniforme; otro sistema de referencia K' , que acelera uniformemente con respecto a K , pero en el que no actúa campo gravitatorio alguno. Estos dos sistemas de referencia son equivalentes, es decir, los experimentos que se lleven a cabo bajo condiciones idénticas en estos dos sistemas de referencia darán lugar a resultados idénticos.*

El principio de equivalencia relaciona la aceleración uniforme con la gravedad uniforme. Ahora bien, los campos gravitatorios reales producidos por los objetos del cosmos (estrellas, planetas, galaxias, etc.), no son, ni mucho menos, uniformes. Por ejemplo, el campo gravitatorio creado por la Tierra no tiene el mismo valor en todos los puntos de su superficie, debido a la forma achatada y densidad no uniforme de nuestro planeta. Además varía muy apreciablemente con la distancia al centro del planeta y sus líneas de fuerza no son paralelas, sino que forman un haz dirigido hacia dicho centro de la Tierra. Además, cada punto de la superficie terrestre no está fijo, sino animado de un movimiento de rotación. Como consecuencia de todo esto, el campo gravitatorio terrestre (e igualmente el creado por cualquier otro objeto del Universo) no puede ser imitado simplemente tomando un enorme laboratorio y acelerándolo. Sin embargo, si se limita el procedimiento a pequeños laboratorios sin rotación y durante pequeños intervalos de tiempo, sí se puede reproducir localmente dicho campo gravitatorio. Esto se hace tanto mejor cuanto más pequeños sean los laboratorios y cuando menor sea el intervalo de tiempo adoptado. Desde un punto de vista formal esto significa que, estrictamente, **la equivalencia en el mundo real entre un laboratorio sometido al campo gravitatorio y otro laboratorio ideal acelerado convenientemente, sólo se puede establecer a nivel local, es decir, cuando se adopta un intervalo infinitesimal del espacio-tiempo.**

3. Gravedad artificial

Una aplicación inmediata del principio de equivalencia es la posibilidad de generar gravedad artificial en lugares donde ésta es muy pequeña o prácticamente nula, como, por ejemplo, dentro de una nave que esté viajando en el espacio alejada de otros cuerpos celestes. En su libro 2001, una odisea del espacio, Arthur C. Clarke (1917-2006) mostró una estación espacial con un diseño adecuado para conseguir este propósito.

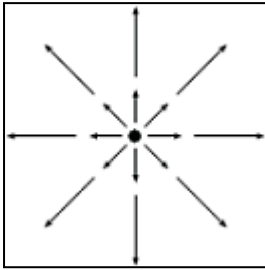
Quienes hayan visto la película de Kubrick (se basó en el libro de Clarke, quien también participó en la



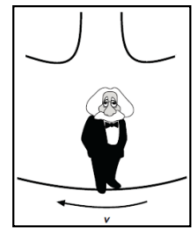
película como guionista) recordarán que la nave rotaba uniformemente sobre su eje, lo que le dota, en cada punto, de una aceleración centrípeta o normal, a_n , dirigida hacia el centro. Para aplicar el principio de equivalencia en estas condiciones hay que adoptar a lo largo de la nave unos mini-laboratorios (estrictamente tendrían que ser

infinitesimales para que en su interior se pueda considerar uniforme la aceleración normal), que roten con ella.

Entonces, cada uno de estos mini-laboratorios acelerados es equivalente a un sistema de referencia no sometido a aceleración alguna y en cuyo interior se ejerce un campo gravitatorio de la misma intensidad y de sentido opuesto. Es decir, dicho campo gravitatorio se dirige hacia fuera y su intensidad es mayor cuanto más lejos esté del centro de la nave el punto donde se adopta [recuérdese que la aceleración normal es: $a_n = w^2 \cdot R$, siendo w la velocidad angular, igual en todos los puntos de la nave, y R el radio]. Tal como indica el dibujo adjunto, globalmente el conjunto de estos sistemas de referencia equivale a un campo gravitatorio, cuyas líneas de fuerza se dirigen radialmente hacia fuera a partir del eje y cuya intensidad aumenta con la distancia a dicho eje.



Este campo gravitatorio ha de producir los mismos efectos que provocaba en la película la estación espacial. Quienes la vieron recordarán esta mítica escena en la que un astronauta, mientras corre y hace ejercicios de gimnasia sobre el que tendría que ser su suelo según este razonamiento, experimenta sensaciones idénticas a las que tendría apoyado sobre el suelo terrestre.



Aunque los retos de ingeniería para crear una nave en rotación son comparativamente modestos a cualquier otra propuesta (se ha planteado conseguir el mismo objetivo aplicando a la nave una aceleración lineal constante en línea recta, y también aplicando un campo magnético muy intenso), la posibilidad real de crear en el interior de una nave un ambiente semejante está todavía muy lejana.

De momento, la única misión espacial realizada en la que se produjo gravedad de este modo fue la misión Gemini 11 en 1966, en donde se generó una cantidad de gravedad artificial muy pequeña (sobre



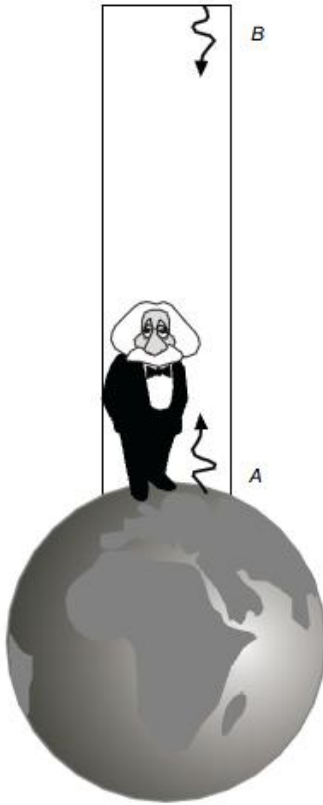
0,00015 g), encendiendo sus propulsores laterales. Obviamente, este valor de g es demasiado pequeño para ser sentido por ningún astronauta, pero sí se observaron otros objetos moviéndose en el "suelo" de la cápsula. Posteriormente se han planteado, pero no ejecutado, bastantes propuestas que han incorporado la gravedad artificial en sus diseños. La imagen adjunta es la recreación de una nave de estas características rotando en Marte. Diseño de la NASA en 1989.

4. Dilatación temporal de origen gravitatorio

Uno de los conceptos que mostró el desarrollo de la relatividad general se refiere a la influencia que tiene el campo gravitatorio sobre el tiempo: Si se colocan dos relojes idénticos en sendos lugares del espacio-tiempo, se ve marchar más lentamente al reloj colocado en el lugar donde el campo gravitatorio es más intenso y más rápidamente al reloj colocado donde el campo gravitatorio es más débil. Este hecho se denomina **dilatación temporal de origen gravitatorio**.

La dilatación temporal de origen gravitatorio se puede deducir en términos cualitativos aplicando el principio de equivalencia. Para hacerlo, empezamos por imaginar una situación en la que hay sendos

relojes idénticos en un punto A, situado en la superficie de la Tierra, y en otro punto B, situado a una considerable altura de dicha superficie. Imaginamos también que en cada uno de esos lugares (A y B) hay una fuente luminosa que emite un destello de luz cada tic-tac del reloj colocado ahí y que esos destellos emitidos en A y en B, viajan hacia el otro lugar (B o A).



Es ahora cuando usamos el principio de equivalencia, en virtud del cual consideramos en los lugares A y B, sendos sistemas de referencia (SR) ideales equivalentes a los laboratorios reales sobre los que se ejerce la acción del campo gravitatorio de la Tierra. Estos sistemas de referencia no están sometidos a ningún campo gravitatorio, sino que tienen una aceleración ascendente e igual al valor de la gravedad en cada lugar ($a=-g$). Ahora bien, como el campo gravitatorio se orienta en el sentido de B hacia A, el SR adoptado en B se acelera, alejándose de los destellos de luz que proceden de A. Por ello, esos destellos procedentes de A llegan a B a un ritmo más lento que el tic-tac del reloj situado en B. De donde se deduce que, según el punto de vista de observador situado en B, el reloj de la Tierra, A, marcha más lento que el suyo (B).

¿Qué conclusión se obtiene analizando el comportamiento de los destellos que se emiten en B según el punto de vista de un observador situado en A? La misma, puesto que, según este punto de vista, los destellos procedentes de B se dirigen a un SRI equivalente en el suelo (A) que se aproxima hacia ellos cada vez más deprisa. Por lo tanto, A también deduce que el reloj situado en B marcha más deprisa que el suyo (A).

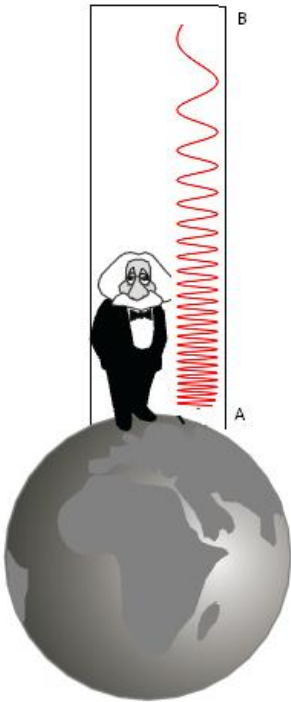
En resumen, con ambos puntos de vista se obtiene la misma conclusión, de que el tiempo transcurre más lentamente en el lugar donde la gravedad es mayor (A) y más rápidamente en lugar donde la gravedad es menor (B).

Este efecto gravitatorio sobre la marcha de los relojes A y B no es el mismo que obtiene la teoría de la relatividad especial acerca de la relatividad de los intervalos de tiempo, ni tampoco presenta la reciprocidad que allí se manifiesta. Por lo tanto, cuando se comparan intervalos de tiempo medidos por dos sistemas de referencia, es preciso tener en cuenta ambos hechos, la dilatación temporal de origen gravitatorio y la relatividad de los intervalos de tiempo medidos en dos referenciales con una determinada velocidad relativa.

Para poner en evidencia la dilatación temporal de origen gravitatorio, Einstein imaginó átomos incandescentes como relojes, cuyos ritmos son determinados por la frecuencia de la luz que emiten. Esto le permitió extraer una conclusión acerca de dicha frecuencia y de la correspondiente longitud de onda.

En efecto, para aplicar las conclusiones que se acaban de obtener sobre la dilatación temporal de origen gravitatorio al caso particular de posibles relojes atómicos, podemos suponer que cada tic-tac de uno de estos relojes corresponde a una oscilación de la onda lumínica o del pulso de luz que dichos relojes

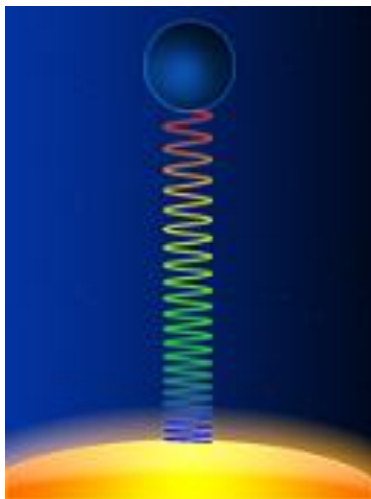
emiten o absorben cuando ocurre en ellos una transición entre dos de sus niveles atómicos. Ahora bien, para que tenga lugar la dilatación temporal gravitatoria cada pulso recibido (cada tic-tac) en un lugar elevado, B, donde el campo gravitatorio es más débil, tiene que corresponder a varios tic-tac (varios pulsos) del reloj atómico que lo emitió en un punto de la superficie de la Tierra, A, donde el campo gravitatorio es más intenso. Tal como se indica el dibujo adjunto, esto implica que la luz procedente de átomos situados en el suelo terrestre A se reciba en un punto situado a una altura elevada, B, con longitud de onda mayor (menor frecuencia).



Una luz visible de frecuencia más baja es una luz de longitud de onda mayor y, por lo tanto, desplazada hacia el color rojo del espectro. Por eso, a este hecho se le denomina **desplazamiento gravitacional hacia el rojo** (esta expresión se ha de entender como un desplazamiento del espectro completo, ya que, obviamente, se aplica a todas las radiaciones, tanto visibles como invisibles). Como se acaba de ver, el desplazamiento hacia el rojo se debe a lo que les sucede a las señales luminosas cuando atraviesan el espacio-tiempo en presencia de la gravedad. Podemos interpretar que ésta hace perder energía a los fotones cuando ascienden en sentido opuesto a la orientación del campo gravitatorio.

5. Confirmación experimental del desplazamiento hacia el rojo y de la dilatación temporal.

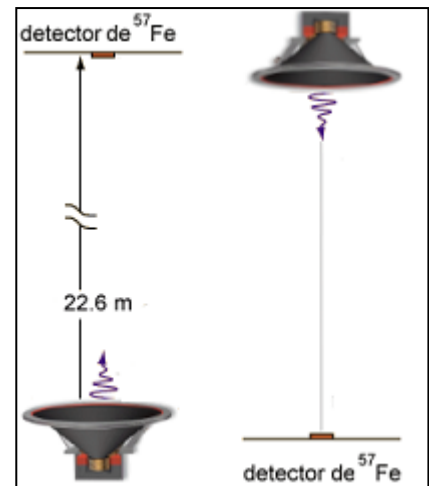
Los primeros intentos de verificar experimentalmente la desviación gravitatoria hacia el rojo se hicieron con la luz emitida por el Sol. Como nuestro astro tiene una masa notablemente mayor que la de Tierra,



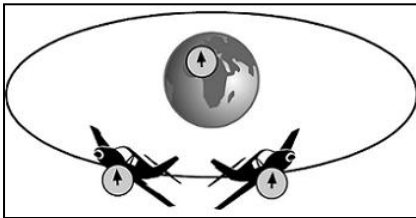
la radiación solar se ha de recibir en nuestro planeta con una frecuencia más baja (aproximadamente en una unidad de cada medio millón). Verificar este hecho no resultó sencillo debido a que el efecto se superpone a otros fenómenos similares de mucha mayor intensidad, como son la desviación también hacia el rojo causada por efecto *Doppler* asociado a la rotación del Sol y al movimiento de traslación de la Tierra, efectos causados por la turbulencia de la superficie solar y efectos debidos al propio movimiento térmico de átomos emisores, correspondiente a una temperatura aproximada de 3.000 K. A pesar de todo esto, esta predicción acerca del desplazamiento hacia el rojo de origen gravitatorio para átomos radiantes se ha podido verificar con buena fiabilidad.

Como ejemplo de observaciones sobre la luz solar realizadas con este propósito, se puede empezar citando un trabajo de Brault (1932-2008) que en el año 1963 midió el desplazamiento de la raya espectral D1 del sodio y obtuvo un desplazamiento hacia el rojo cercano al teórico.

Otro experimento muy destacado sobre este fenómeno fue realizado por el investigador estadounidense Pound, junto con sus alumnos Rebka (1931-2015) en 1960 y Snider en 1965. Detectaron un desplazamiento hacia el rojo muy pequeño (aproximadamente de 2,45 partes en 10⁵) entre la cima y la base de una torre de 22,6 metros de altura de la Universidad de Harvard, desplazamiento que coincidía en un 99,9% con la predicción teórica. Para ello diseñaron un ingenioso experimento que, básicamente, consistió en hacer que un rayo γ emitido por una fuente de cobalto, ^{57}Co , recorriera esa altura, y luego fuera absorbido por un blanco de hierro, ^{57}Fe . Se considera que este experimento introdujo una era de pruebas de precisión de la relatividad general.



Además de estos experimentos, se han realizado otros destinados a medir directamente la dilatación temporal correspondiente. Probablemente el más famoso de ellos es el experimento de Hafele y Keating. Como se explica en el tema dedicado a la relatividad especial, en este experimento se comparó el tiempo medido por dos relojes atómicos de cesio, que dieron la vuelta al mundo en dos aviones comerciales (uno en dirección hacia el Este y el otro hacia el Oeste) con el tiempo marcado por un tercer reloj que permaneció en Tierra.

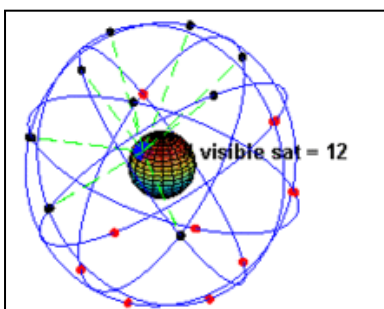


Los resultados del experimento se analizaron teniendo en cuenta la dilatación temporal de origen cinemático, que predice la relatividad especial y también la dilatación temporal de origen gravitatorio, que predice la relatividad general. Los resultados se resumen en la tabla adjunta.

	Diferencia de tiempos entre los relojes en vuelo y terrestre	
	Vuelo hacia el oeste	Vuelo hacia el este ¹
Resultado observado	$(273 \pm 7) \cdot 10^{-9} \text{s}$	$-(59 \pm 10) \cdot 10^{-9} \text{s}$
Predicción teórica:		
Efecto cinemático	$(96 \pm 10) \cdot 10^{-9} \text{s}$	$-(184 \pm 18) \cdot 10^{-9} \text{s}$
Efecto gravitatorio	$(179 \pm 18) \cdot 10^{-9} \text{s}$	$(144 \pm 14) \cdot 10^{-9} \text{s}$
Total predicción	$(275 \pm 21) \cdot 10^{-9} \text{s}$	$-(40 \pm 23) \cdot 10^{-9} \text{s}$

¹ El signo negativo indica que finalizado el vuelo y cuando se comparan los relojes, el tiempo indicado por el del avión era menor que el del reloj de la estación de tierra.

El mundo actual de las telecomunicaciones tiene muy en cuenta estos efectos relativistas en la medida del tiempo. Por ejemplo, el Global Positioning System o GPS es un sistema de posicionamiento espacial que, a través de radio-señales emitidas por satélites, permite obtener información sobre la posición, la velocidad y la medida del tiempo a un receptor que se encuentre sobre o cerca de la superficie terrestre. A bordo de cada satélite hay relojes de alta precisión que son osciladores atómicos de cesio y de rubidio. Desde la Tierra se puede calcular, utilizando otro reloj atómico, cuánto tiempo ha estado viajando la señal, por lo que se puede saber la distancia a la que se encuentra el satélite. Finalmente, la recepción de varias señales procedentes de otros satélites permite determinar mediante cálculos geométricos la posición del receptor. Los satélites están situados a unos 20.000 km del receptor y, por tanto, están sometidos a un campo gravitatorio mucho menor. A su vez, están



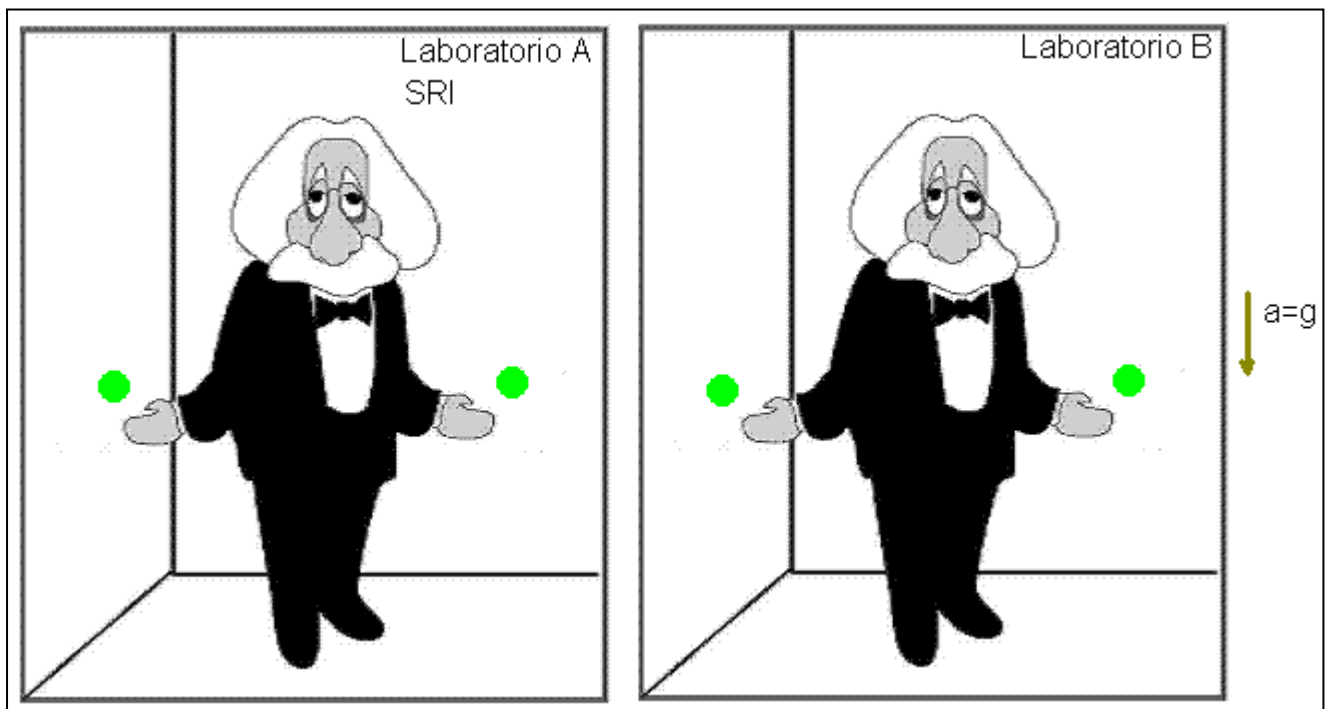
en movimiento respecto del reloj instalado en el receptor. Como consecuencia de todo ello, los relojes de los satélites se adelantan unos 40.000 nanosegundos cada día y, para conseguir una precisión en la posición de pocos metros en la superficie terrestre, se requiere una precisión en el tiempo de unos 10 nanosegundos. Por ello, las correcciones que introduce en estos cálculos la relatividad son imprescindibles.

Para terminar este apartado, diremos que la dilatación temporal de origen gravitatorio también ha inspirado al cine de ciencia ficción. Un buen ejemplo de ello fue la película *Interstellar*, en la que el director Christopher Nolan fue asesorado científicamente por Kip Thorne (1940-) uno de los mayores expertos mundiales en las aplicaciones a la astrofísica de la Teoría de la Relatividad General. Los espectadores recordarán que en esta película hay un escena en la que el protagonista baja a un planeta sometido a una fuerte gravedad por encontrarse cerca de un agujero negro rotativo. Cuando regresa a la nave nodriza para él ha transcurrido algo más de una hora, pero se encuentra a un compañero para el que han pasado 23 años.



7. Adopción de sistemas de referencia inerciales.

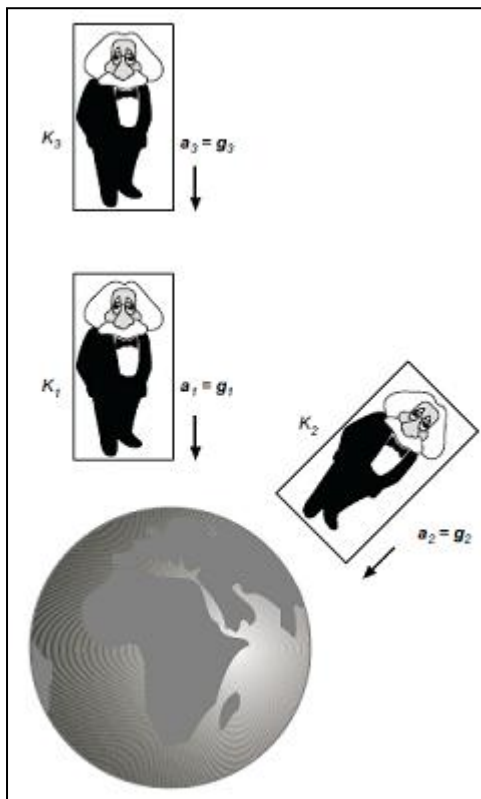
El principio de equivalencia permite adoptar en cualquier lugar del espacio un «pequeño laboratorio» en el que todo ocurra igual que en un sistema de referencia inercial (SRI). En efecto, como todos los objetos caen hacia el centro de la Tierra con la misma aceleración, se pueden "desconectar" a la vez los efectos de la gravedad y de la aceleración en el interior de un posible sistema de referencia (SR) ubicado cerca de la superficie terrestre, ligando dicho sistema de referencia a un objeto en caída libre. Cualquier otro objeto que se abandone dentro de ese SR cae con la misma aceleración y la situación relativa entre ese objeto y el sistema de referencia es localmente equivalente a la que existiría en un verdadero SRI.



La generalización de este razonamiento a cualquier punto del espacio-tiempo afectado por la presencia del campo gravitatorio permite dar la vuelta al principio de equivalencia y reformularlo del siguiente modo:

Principio de equivalencia (reformulado): *Un sistema de referencia acelerado, sometido a un campo gravitatorio y cayendo libremente en él, es «localmente» equivalente a un SRI.*

Ya hemos visto que una diferencia fundamental entre un verdadero SRI y un sistema de referencia que se adopte cayendo libremente en un campo gravitatorio real es el carácter local del segundo, es decir, el hecho de que sólo se puede asimilar a un verdadero SRI en un intervalo infinitesimal del espacio-tiempo.



Otra diferencia importante que conviene tener en cuenta procede del hecho de que, aunque dentro de cada sistema de referencia acelerado adecuadamente en el campo gravitatorio, el comportamiento mecánico de los objetos es similar al que tendrían en un verdadero SRI, este comportamiento es distinto por lo que se refiere a las mediciones comparativas entre objetos estudiados en dos de estos referenciales ideales locales. Esto se debe a que varios sistemas de referencia de este tipo son entre sí acelerados porque en cada punto del espacio-tiempo tienen una aceleración distinta, igual a la intensidad que en ese punto tenga el campo gravitatorio. En consecuencia, dos objetos en reposo relativo respectivamente en dos de estos sistemas de referencia, aceleran uno respecto del otro.

Así por ejemplo, en los casos que se muestran en la figura adjunta, los sistemas de referencia K_1 y K_2 se aproximan entre sí cada vez más, y a que sus aceleraciones de caída respectivas son iguales ($a_1 = a_2$). En cambio, K_1 y K_3 se separan cada vez más pues $a_1 > a_3$.

8. Programa de trabajo de la relatividad general

El concepto de equivalencia entre la aceleración y el campo gravitatorio uniforme aportó una vía de solución al problema de la relatividad general, porque proporciona un mecanismo para adoptar SRI locales en cada punto del espacio-tiempo afectado por campos gravitatorios, en los que sí se puede aplicar la relatividad especial. Fue teniendo esto en cuenta y poniendo el énfasis en elaborar una teoría física que se pueda aplicar en todos los sistemas de referencia, como Einstein construyó su teoría de la relatividad general.

Los siguientes epígrafes resumen esquemáticamente las etapas que, teniendo en cuenta estos conceptos, se plantea la relatividad general para el tratamiento de los problemas:

- En primer lugar, los campos gravitatorios existentes en una determinada región del espacio-tiempo se pueden transformar o imitar, en virtud del principio de equivalencia. Esto se hace adoptando en cada punto del campo un sistema de referencia acelerado y equivalente a un sistema de referencia inercial (SRI), que reemplaza al campo local. En esos SRI locales se aplica la teoría de la relatividad especial.

- El segundo paso consiste en trasladar la descripción que se obtiene de los fenómenos en esos referenciales locales a los sistemas de referencia reales, en donde no fue posible tratar inicialmente el problema (por ejemplo, un sistema de referencia ligado a un cuerpo celeste). Realizar este traslado exige tener en consideración los efectos de la gravedad sobre el espacio-tiempo. Como veremos, estos efectos se pueden ilustrar diciendo que los campos gravitatorios o, lo que es lo mismo, las masas del universo, distorsionan o curvan el espacio-tiempo, tanto más, cuanto más cerca nos encontremos de dichas masas y cuanto mayor sea la magnitud de las mismas.
- En este proceso, se postula que las leyes de la física se escriben igual en todos los sistemas de referencia (inerciales o no) y se pueden trasladar de unos a otros mediante unas leyes de transformación de las magnitudes, haciendo que todos los observadores sean equivalentes. Esto exige construir una nueva teoría de la gravitación, que concuerde con los otros requisitos, y, según la cual los efectos gravitatorios se deberían propagar a la velocidad de la luz.

En los apartados siguientes se muestran otras predicciones de la teoría de la relatividad general que se deducen aplicando esta forma de trabajar.

9. Deflexión de la luz por la gravedad

Un hecho notable que puso en evidencia la teoría relatividad general es la influencia que ejerce el campo gravitatorio sobre el movimiento de la luz en el espacio-tiempo real. Esta influencia se puede deducir cualitativamente como una consecuencia del principio de equivalencia.

Para hacerlo, podemos considerar una pequeña región del espacio afectada por un campo gravitatorio uniforme y "vertical" (como, podría ser, por ejemplo, una zona de dimensiones reducidas en las proximidades de la superficie de la Tierra). Imaginamos que alguien enciende en ese lugar una linterna, la cual envía un rayo luminoso en dirección horizontal. La pregunta es: ¿Qué trayectoria tiene la luz ahí? Para responderla, hay que adoptar un sistema de referencia que caiga libremente en ese lugar con una aceleración $a=g$. De acuerdo con el principio de equivalencia, este sistema de referencia acelerado es localmente equivalente a un sistema de referencia inercial (SRI) y en él se aplica la relatividad especial, según la cual la luz tiene ahí un movimiento rectilíneo, horizontal y uniforme a la velocidad c (dibujo de la derecha). Entonces, dicho sistema de referencia está cayendo, se deduce que con respecto a otro referencial ligado al suelo (sometido al campo gravitatorio), el rayo de luz ha de tener una trayectoria curva (dibujo de la izquierda). Se llega, por tanto, a la conclusión de que la acción del campo gravitatorio provoca una **deflexión de la luz**.



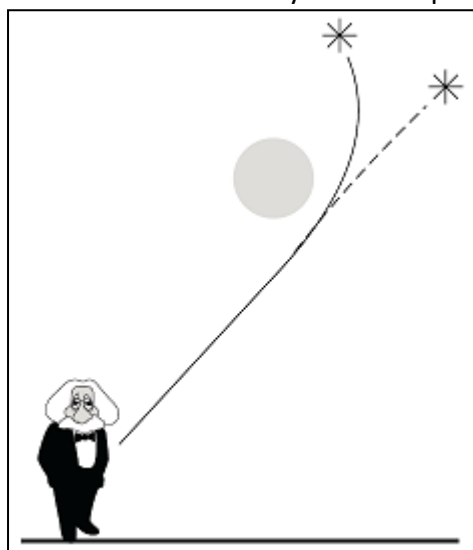
10. Lente gravitatoria y anillos de Einstein

La aplicación rigurosa de la teoría de la relatividad general permite obtener una expresión para calcular exactamente el ángulo Θ , que se debería desviar un rayo de luz al pasar a una cierta distancia de una estrella. Este ángulo viene dado, en primera aproximación (y en radianes), por:

$$\Theta = -G \frac{M}{b \cdot c^2}$$

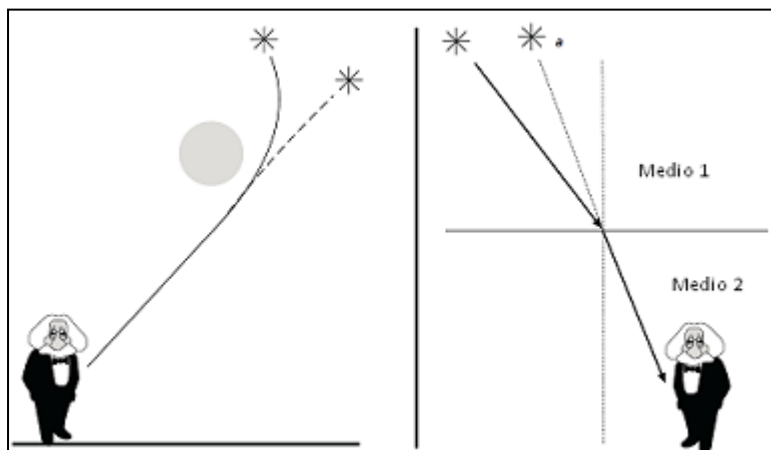
En esta expresión M es la masa de la estrella, c la velocidad de la luz, G la constante de gravitación y b la distancia mínima del rayo al centro de la estrella.

Para el caso de un rayo de luz que pase muy próximo a la superficie del Sol, el ángulo Θ debería ser



aproximadamente de $1,75''$. Este valor es suficiente para apreciar perfectamente esta deflexión en la luz que, procedente de una estrella, llegue a la Tierra pasando próxima al Sol, y notar como consecuencia un desplazamiento aparente de la estrella, es decir, observarla en una posición diferente a la que realmente ocupa (figura adjunta). Sin embargo, las observaciones de este efecto fueron inicialmente difíciles de realizar, porque la luz procedente de estrellas próximas al campo del Sol queda muy ocultada por la propia luz emitida por nuestro astro. Por eso, Einstein propuso que se realizaran observaciones aprovechando eclipses totales del Sol, aunque, incluso, en ese momento, el brillo de la corona solar no permite la observación de luz procedente de estrellas más lejanas que pase a una distancia mínima de dos radios solares.

Siguiendo las indicaciones de Einstein, Dyson (1868-1939) y Eddington (1882-1994) organizaron el año 1919 dos expediciones a las islas Sobral (en Brasil) y Príncipe (en el golfo de Guinea), para observar el eclipse del 29 de mayo. Los resultados que obtuvieron de la deflexión mostraron un acuerdo experimental excelente con la predicción teórica y fueron considerados un éxito sensacional de la teoría de la relatividad general. Con posterioridad se han obtenido resultados mucho más precisos observando las frecuencias de radio en lugar de la luz visible. De este modo no es necesario esperar a un eclipse total de Sol, sino que es suficiente que el limbo solar se aproxime a una fuente celeste de ondas de radio.

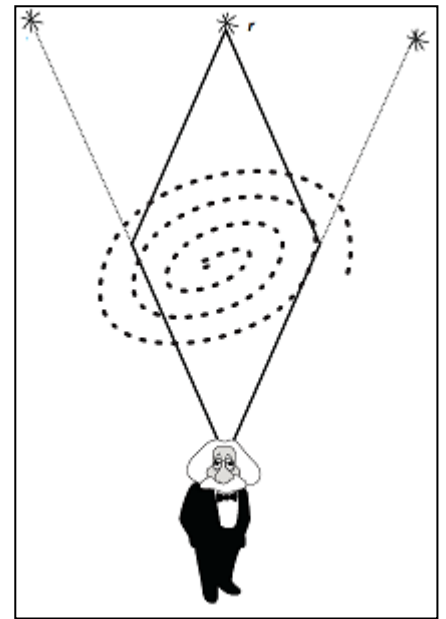


Tal como ilustran los dibujos adjuntos, se puede establecer una analogía entre el fenómeno de la deflexión gravitatoria de la luz (figura más a la izquierda) y el fenómeno óptico de la refracción que ocurre cuando la luz viaja desde un medio 1 donde tiene mayor velocidad hasta otro medio 2 donde tiene menor velocidad (figura más a la derecha). Siguiendo esta analogía, el campo gravitatorio creado por una masa esférica sin rotación produciría

en la luz un efecto equivalente al de tener a lo largo del espacio un medio con un índice de refracción que varía paulatinamente con la distancia al centro de esa masa. Por ello, a este fenómeno relativista se le denomina **efecto de lente gravitatoria**.

Aparte del Sol, el efecto de lente gravitatoria no pudo ser observado en otros objetos o concentraciones de masa del Universo hasta finales de la década de 1970-80. Entonces se aplicó por primera vez la idea de estudiar el efecto de lente gravitatoria que algunas galaxias muy pesadas pueden ejercer sobre la luz emitida por cuásares.

Los cuásares son objetos celestes lejanos y extremadamente brillantes, que emiten su luminosidad desde un espacio reducido. En consecuencia, una galaxia muy masiva, en el camino entre un cuásar lejano y un observador en la Tierra, debería afectar a la imagen del cuásar y éste podría aparecer, por ejemplo, como doble. Esta idea fue propuesta en los años sesenta por los Barnothy, un matrimonio de exiliados húngaros en Estados Unidos. Inicialmente tuvo poca repercusión en la comunidad científica y sólo algunos físicos hicieron algunos cálculos o aportaron consideraciones teóricas sobre estos fenómenos. Pero, en 1979, Malsh, Carswell y Weyman descubrieron, casi por casualidad, la primera imagen doble producida por una lente gravitacional. Observaban en Arizona radiofuentes que habían sido halladas y catalogadas previamente, en Manchester, por un estudiante, y encontraron que dos objetos muy próximos tenían los mismos desplazamientos por efecto *Doppler* hacia el rojo. Esto debía significar que se estarían alejando de la Tierra a la misma velocidad y se encontrarían a la misma distancia del observador. La improbabilidad de que dos cuásares estuvieran físicamente tan cerca uno del otro en su proyección sobre la esfera celeste y tuvieran características tan iguales, sugirió la idea de que podría tratarse, en realidad, de dos imágenes de un único cuásar producidas por una galaxia a medio camino entre nosotros y él. Y así fue. Al cabo de veinte meses de intenso trabajo se encontró la galaxia que hace de lente gravitatoria.

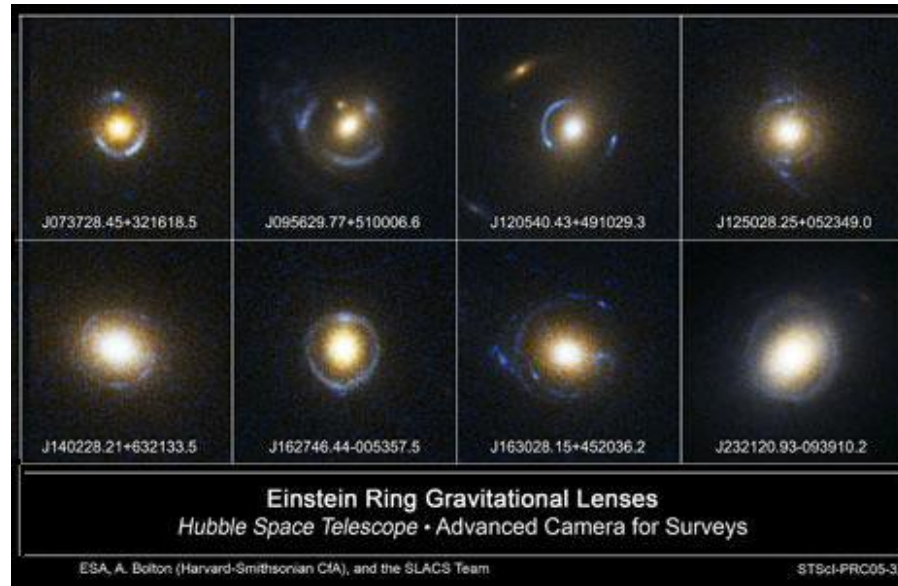


Desde entonces, los astrofísicos se han dedicado con ahínco a la caza de otras galaxias que actúen como lentes gravitatorias de objetos lejanos brillantes, no sólo porque cada vez que se encuentra una se constata esta predicción de la relatividad general, sino también porque su determinación contribuye a mejorar el conocimiento acerca de la estructura de los objetos lejanos y de las galaxias interpuestas. Entre otros hallazgos en este terreno, citamos en primer lugar un cuásar que se observó en el año 1999 (denominado QSO 0957+561), en cuya determinación participaron los científicos españoles Pere Planesas, Jesús Martín Pintado y Luís Colina. En segundo lugar, citamos otra investigación que permitió observar en el año 2001, ¡seis imágenes! de una única galaxia muy lejana, situada a una distancia aproximada de 11.000 millones de años luz de la Tierra. Esta imagen séxtuple se produjo tras pasar la luz emitida por la galaxia lejana, entre un grupo de otras tres galaxias interpuestas a unos 7.000 millones de años luz.

Otro fenómeno ligado al efecto de lente gravitatoria es el anillo de Einstein, que consiste en una deformación de la luz procedente de una fuente lumínica lejana en forma de aro luminoso por la desviación gravitacional que produce sobre esa luz una galaxia o un agujero negro que actúa como lente gravitatoria. Para que se produzca este efecto, la fuente, la lente y el observador tienen que estar perfectamente alineados. Einstein consideraba que se trataba de un fenómeno muy sutil y dudaba que

podiese llegar un día en que se observase, por lo que lo consideró una curiosidad más que una herramienta de trabajo.

Sin embargo, gracias al progreso de la observación astronómica, que no pudo ser anticipada por Einstein, hoy se conocen centenares de lentes gravitacionales, muchas de las cuales tienen la forma bien



circular, aunque casi siempre incompleta, de los anillos de Einstein. Además, cuando hay varios objetos en la misma línea de mirada, se producen arcos múltiples, más o menos centrados sobre la lente dependiendo del alineamiento relativo. Muchos de estos anillos de Einstein se detectan bien mediante observaciones en radioastronomía. A modo de ejemplo, la fotografía adjunta recopila las imágenes de varios anillos de Einstein observados por el telescopio espacial Hubble

(NASA. ESA. A Bolton G SLACS team)

En primer lugar, nos referimos a la galaxia rojiza y muy luminosa (LRG 3-757), situada en el centro de la imagen adjunta, que fue obtenida por el telescopio Hubble a finales de 2011. Esta galaxia está situada a unos 4.6 millones de años-luz y actúa como una lente gravitacional que amplifica y distorsiona la imagen de otra galaxia azul, situada a unos 10.9 miles de millones de años-luz. El buen alineamiento de las dos galaxias hace que la luz de la más lejana (azul) forme una especie de "herradura cósmica" en torno a la más cercana (roja). La galaxia lejana, LGR 3-757, había sido detectada primeramente en el Survey Digital de Sloan por un equipo internacional de astrónomos de la Universidad de Cambridge (Reino Unido).



Un asombroso anillo de Einstein (Artículo del Dr. **D. Rafael Bachiller** (12/01/2012) (Disponible en la Web)

En segundo lugar, podemos fijarnos en esta fotografía, que obtuvo en 2015 el radiotelescopio ALMA, y muestra uno de los casos más perfectos y espectaculares de anillo completo de Einstein. En este caso, la galaxia azulada en el centro de la imagen se encuentra a 4 mil millones de años-luz y actúa como una lente gravitacional que amplifica y distorsiona la imagen de otra galaxia rojiza (SDP.81), está situada a unos 12 mil millones de años-luz de distancia. La joven galaxia SDP.81 contiene grandes cantidades de polvo, gas molecular e intensa formación estelar. Su intensa emisión en ondas sub-milimétricas propició que fuese descubierta por el Observatorio Espacial de Infrarrojos Herschel de la ESA e hizo que posteriormente pudiera ser detectada fácilmente por ALMA.

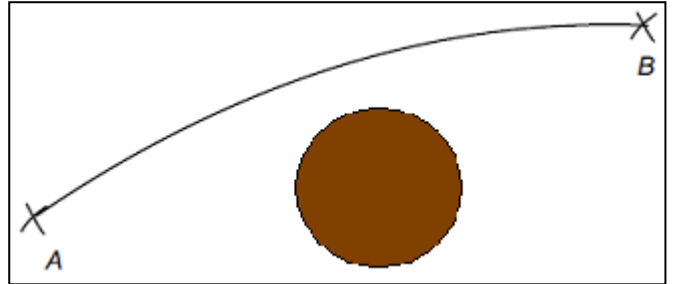


Un sensacional anillo de Einstein captado por ALMA Artículo del Dr. **D. Rafael Bachiller** (07/04/2015) (Disponible en la Web)

Diremos para terminar este apartado que estos hallazgos, además de confirmar reiteradamente predicciones de la relatividad general, permiten estudiar galaxias (y otros objetos brillantes) muy alejadas. Esto contribuye de forma importante al conocimiento de aspectos del Universo, cuando éste tenía apenas 3.000 millones de años de edad (su edad actual es de 13,7 miles de millones de años). y el campo gravitatorio uniforme aportó una vía de solución

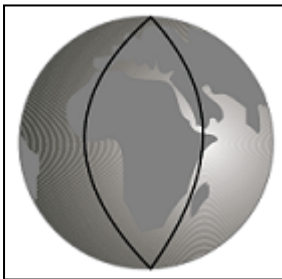
11. Curvatura del espacio-tiempo

Aunque en una proporción muy pequeña en relación a su tamaño, el Universo esta poblado por materia, que se localiza en objetos, como estrellas, planetas, granos de polvo, etc., y en agrupaciones de estos, como galaxias. La presencia de estos cuerpos celestes y /o agrupaciones de materia provoca la deflexión de la luz, es decir, hace que los rayos lumínicos no sigan trayectorias rectilíneas, sino que se desvíen o se curven, y lo hagan tanto más cuanto más cerca pasen esos rayos de cada agrupación de materia y/o cuanto mayor sea la masa de ésta.



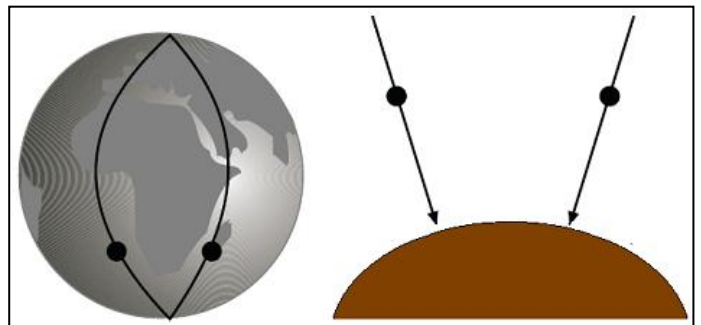
Estas trayectorias curvas que describe la luz en el Universo se llaman líneas geodésicas y, puesto que la luz viaja por ellas a la velocidad límite, señalan la distancia más corta entre sus extremos. Desde un punto de vista geométrico este hecho revela que el espacio-tiempo es curvo y que, por este motivo, en él se ha de aplicar una geometría no euclidiana, que es diferente a la geometría más tradicional a la que estamos acostumbrados.

Un ejemplo sencillo de geometría no euclidiana se tiene analizando lo que ocurre en una superficie esférica. Pensemos en una esfera que tenga trazados meridianos como si fuera un globo terráqueo (figura adjunta). Estos meridianos las líneas geodésicas de la superficie esférica y se corresponden con las líneas rectas paralelas de la geometría tradicional euclidiana. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurriría sobre una superficie plana bidimensional donde sí es aplicable dicha geometría euclidiana, en la superficie esférica la distancia entre dos meridianos no es constante, sino que éstos se aproximan cada vez más al acercarnos a los polos de la esfera y se separan al alejarnos de ellos.



Igualmente tampoco se cumplen en la superficie esférica curva otras leyes de la geometría tradicional euclidiana: La distancia más corta entre dos puntos, en lugar de seguir una línea recta, sigue una línea geodésica; la suma de los tres ángulos de un triángulo no es igual sino mayor que 180° ; el teorema de Pitágoras de los triángulos rectángulos deja de cumplirse, etc.

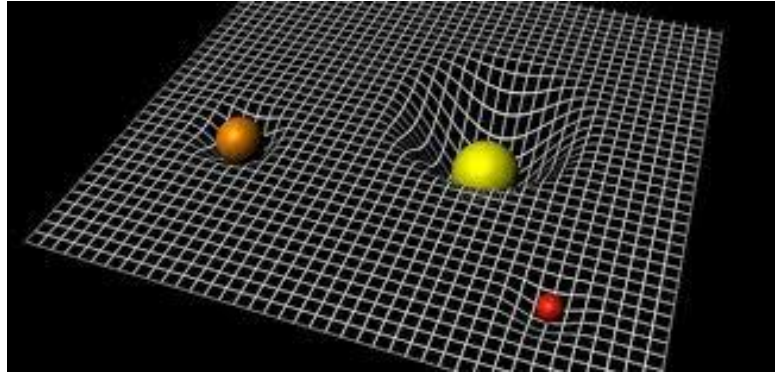
Para completar la analogía entre la superficie esférica y el espacio-tiempo curvado, se puede imaginar a dos cuerpos "abandonados" en el Universo en un lugar próximo a un objeto celeste y compararlos con otros dos cuerpos que se desplacen libremente por dos meridianos de la superficie esférica. Los dos cuerpos del mundo real caen libremente en el campo gravitatorio creado por el objeto celeste, y, por ello, sus



trayectorias se aproximan entre sí cada vez más. Del mismo modo, los dos cuerpos que viajan libremente por los meridianos de la superficie esférica también se aproximan entre sí cada vez más al irse acercando al polo de la esfera.

Así pues, en el marco de la relatividad general se establece esta profunda relación entre la geometría del espacio-tiempo y el campo gravitatorio existente en el Universo: **Dicho campo gravitatorio produce la curvatura del espacio-tiempo.**

Ahora bien, las masas que pueblan el Universo conocido están muy alejadas unas de otras y, aunque algunas de ellas pueden estar relativamente próximas entre sí (por ejemplo, las de un planeta y sus satélites), la intensidad del campo gravitatorio que ejerce todo objeto celeste a su alrededor disminuye muy rápidamente al alejarnos de él. Por esta razón, la curvatura del espacio-tiempo, aunque puede llegar a ser muy importante en la proximidad de algunos objetos celestes, resulta despreciable en la mayor parte del espacio-tiempo.



Estos hechos están en la base de la relación que se establece entre la teoría de la relatividad general y la de relatividad especial. Del mismo modo que la teoría de la relatividad especial marca unos límites a la aplicabilidad de la mecánica de Newton, la teoría de la relatividad general señala otros a la aplicabilidad de la relatividad especial. De este modo, la relatividad general incluye a la relatividad especial como caso extremo, de forma que las leyes y expresiones de la primera devienen hacia las de la segunda cuando la influencia de las masas tiende a cero, lo que, como acabamos de ver, ocurre en las zonas del espacio-tiempo suficientemente alejadas de esas masas. En estas regiones el entramado espacio-tiempo casi es plano y la aplicación de las leyes de la relatividad especial proporciona unos resultados que apenas se desvían de los que proporciona la aplicación de las leyes de la relatividad general. En cambio, al aproximarnos a cualquier objeto celeste, es imprescindible utilizar la teoría de la relatividad general.

Para terminar este apartado, diremos que, en consonancia con estos conceptos, las ecuaciones fundamentales de la relatividad general relacionan de forma cuantitativa la intensidad del campo gravitatorio con la materia. Dichas ecuaciones toman la forma general:

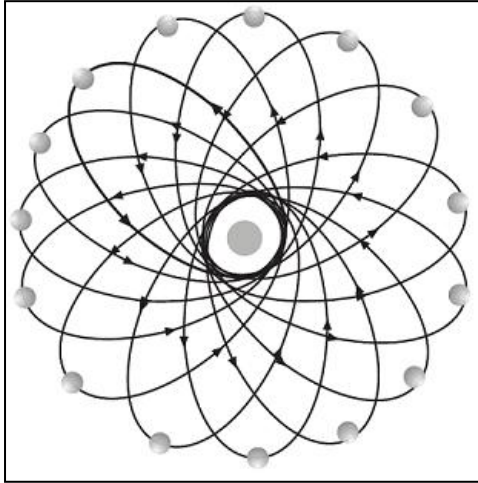
$$R = G \cdot M$$

Donde R es un objeto matemático (formalmente es un tensor) que representa a la curvatura del espacio-tiempo, M es otro objeto matemático que representa a la materia presente y G representa a la constante de gravitación universal. En cada caso particular, las posibles soluciones que pueden proporcionar estas ecuaciones generales dependen de las acotaciones que se hagan a la región de Universo en la que se aplican, de la cantidad y la distribución de masa que se considere o que se conozca en esa región, etc.

"Einstein tenía razón". Artículo del Dr. D. Rafael Bachiller García, director del Observatorio Astronómico Nacional, sobre la confirmación experimental de las distorsiones del espacio-tiempo usando la sonda espacial de la NASA Gravity Probe B (publicado en 2008 en la serie "Cronicas del Cosmos" por el mundo.es) (Disponible en la Web)

12. Precesión de los perihelios

Las teorías anteriores a la relatividad general no pueden hacer predicciones totalmente correctas sobre los procesos físicos porque no tienen en cuenta la influencia de la materia sobre el entramado espacio-tiempo en el que dichos procesos ocurren. Concretamente, las predicciones acerca del movimiento de cualquier objeto del Universo, sea utilizando la mecánica de Newton o sea utilizando la propia teoría de la relatividad especial, producen resultados que se desvían de los hechos empíricos.



El ejemplo más notable de esta desviación de los hechos empíricos sobre el movimiento de objetos celestes respecto de las predicciones de la mecánica de Newton, que resolvió la relatividad general, se refiere a los movimientos de los planetas en sus órbitas elípticas alrededor del Sol. La teoría newtoniana predice un movimiento adicional para el planeta, si añadimos a la interacción del Sol sobre el planeta la atracción gravitatoria de otros objetos (por ejemplo, otros planetas del Sistema Solar) y tenemos en cuenta además que la inclinación de la eclíptica influye en la percepción de la trayectoria descrita por el planeta desde la Tierra. Este movimiento adicional se puede describir diciendo que los perihelios de dichas elipses han de realizar una trayectoria de precesión (figura adjunta).

Ahora bien, resulta que la precesión observada de los perihelios de los planetas no se corresponde estrictamente con la predicha al aplicar la mecánica de Newton. Sobre todo, en algunos casos. El más evidente es el del planeta Mercurio para el que se detecta experimentalmente una precesión residual que no se puede explicar aplicando la mecánica de Newton. En cambio, una aplicación rigurosa de la teoría de la relatividad general sí explica satisfactoriamente esta precisión residual.

En efecto, de acuerdo con la relatividad general, la precesión en radianes por revolución que se añadiría al movimiento de precesión de los perihelios planetarios, se calcula utilizando la expresión siguiente:

$$\varpi = 6\pi \frac{GM_{\text{sol}}}{c^2(1-e)r}$$

En esta expresión M_{sol} es la masa del Sol, r es el semieje mayor de la órbita del planeta, e es la excentricidad de la órbita y $G \cdot M_{\text{sol}}/c^2$ es una cantidad, que es igual para todos los planetas y recibe el nombre de radio gravitacional del Sol. De acuerdo con esta expresión, la precesión es tanto mayor cuanto más cerca del Sol está el planeta (r menor) y cuanto mayor es su excentricidad (e mayor). En el caso de Mercurio, que hace una revolución cada 88 días, al sustituir los valores ($G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, $M_{\text{sol}}=1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $e=0,2056$, $r=5,834 \cdot 10^{10} \text{ m}$) se obtiene una precesión residual de 42,9" cada siglo.

Como este valor de la precesión residual es muy pequeño, para poder analizar la concordancia de los datos experimentales con esta predicción de la relatividad general, fue necesario recoger medidas ópticas durante bastantes años, con objeto de que el efecto acumulado fuera observable. Sin embargo, esta situación cambió con el descubrimiento en el año 1975 por parte de Hulse y Taylor de un púlsar en un sistema binario. Como se comenta en este apartado del tema dedicado al campo gravitatorio, este sistema está constituido por dos estrellas muy compactas y densas que orbitan una alrededor de la otra a una velocidad elevada (del orden de $10^{-3}c$), describen una trayectoria de excentricidad también

elevada (e es 0,617) y producen un campo gravitatorio muy intenso ($G \cdot M/c^2$ del orden de 10^{-6}). En consecuencia, el periastro debería tener una velocidad de precesión del orden de $4,2^\circ$ al año. Este valor es suficiente para que sea relativamente accesible su observación precisa y, de hecho, todos los datos que se han obtenido de la observación de este sistema binario se han mostrado consistentes con la relatividad general.

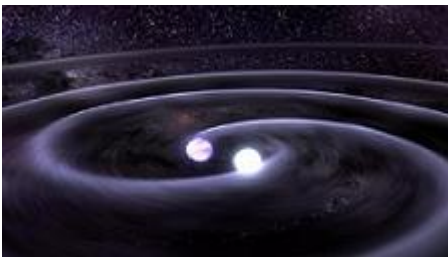
13. Ondas gravitacionales

Otra predicción de la teoría general de la relatividad son las **ondas gravitacionales**, cuya existencia también planteó Einstein. Para entender lo que son es útil compararlas con las ondas electromagnéticas. A tal efecto, cabe recordar que toda carga eléctrica produce en torno a ella un campo electromagnético. Cuando la carga tiene un movimiento acelerado el campo electromagnético que produce es variable y su oscilación se propaga por el espacio a la velocidad de la luz conformando una onda electromagnética. Del mismo modo, toda masa produce en torno a ella una curvatura del espacio-tiempo. Si la masa tiene un movimiento acelerado, la ondulación del tejido espacio-temporal también se propaga a la velocidad de la luz conformando una onda gravitacional.

La primera evidencia indirecta de las ondas gravitacionales se tuvo en 1974. Taylor (1941-) y su alumno de tesis Hulse buscaban púlsares en nuestra Galaxia, para estudiar aspectos de la evolución estelar y de la evolución galáctica, y se fijaron especialmente en uno binario (los componentes de un sistema binario siguen trayectorias curvas, por tanto, aceleradas). Después de medir las pulsaciones y el movimiento del pulsar, comprobaron que su período orbital disminuía paulatinamente y lo interpretaron como una indicación de la existencia de ondas gravitacionales emitidas por el pulsar. Por este trabajo se les concedió en 1993 el Premio Nobel de Física. Desde entonces se han encontrado bastantes púlsares semejantes, pero el de Taylor y Hulse siguió siendo el mejor para hacer mediciones relativistas. Una de las razones es que hace falta mucho tiempo de observación para acumular los datos necesarios para detectar el efecto relativista y la mayoría de los púlsares se han descubierto recientemente.



"Probamos la existencia de ondas gravitacionales" (Entrevista a J.H. Taylor en Barcelona, El País 21/12/2005) (Disponible en la Web)



En 2012, se obtuvieron en el Gran Telescopio Canarias resultados experimentales análogos, referidos ahora a un sistema binario de enanas blancas (las enanas blancas son remanentes de estrellas como el Sol que ya han agotado su combustible nuclear). Estos resultados confirmaron que las dos estrellas, probablemente a causa las ondas gravitacionales que emiten, orbitan cada vez más rápido y se están acercando entre sí.

Las ondas gravitacionales de dos enanas blancas avalan las teorías de Einstein (Abc.es, EFE, 29/08/2012) (Disponible en la Web)

Aunque este tipo de investigaciones permitieron detectar de forma indirecta la existencia de las ondas gravitacionales, su detección directa siguió siendo un reto que la física no ha podido superar hasta hace muy poco tiempo.

14. El proyecto LIGO

El efecto de una onda gravitacional es deformar el espacio en el plano perpendicular al de su dirección de propagación, expandiéndolo y contrayéndolo alternativamente a lo largo y a lo ancho. En consecuencia, al paso de la onda, la distancia entre dos puntos dados ha de oscilar alrededor de su

longitud original, L , en un rango de magnitud, dL (es decir, oscilará entre $L+dL$ y $L-dL$). Sabiendo esto, los proyectos para la detección directa de ondas gravitacionales se orientaron a detectar y analizar esa oscilación.

En el lenguaje técnico, a la cantidad adimensional que se obtiene dividiendo el incremento de longitud que acabamos de mencionar (dL) entre la longitud original (L) se le llama "deformación" o *strain* (en inglés). Esta deformación es extremadamente pequeña y además disminuye al alejarnos de la fuente emisora de las ondas gravitacionales. Para llegar a detectarla con fiabilidad la ciencia, a lo largo de algunas décadas, tuvo que ir superando varios retos.

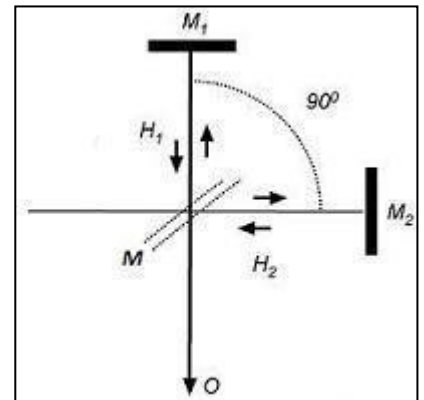
El primero de ellos fue el cálculo y la descripción de las posibles fuentes de ondas gravitacionales y de su magnitud, ya que conocer estos aspectos es un requisito para saber cuál debe ser la precisión del



aparato que las pretenda medir. En este terreno destacó la aportación de Kip Thorne (1940-), que fue pionero en estos desarrollos. A partir de ellos se supo que se necesitan eventos especialmente violentos, como supernovas o colisiones de agujeros negros para producir ondas que alcancen la Tierra con una intensidad suficiente para poder ser detectadas. Incluso una fuente así produce una deformación del orden de 10^{-21} , lo que significa que una longitud de un kilómetro del receptor puede sufrir un

cambio, dL , de 10^{-18}m (este incremento de longitud equivale tan solo a una milésima parte del tamaño de un núcleo de hidrógeno!)

Teniendo en cuenta que la longitud de onda de la luz visible es de unos 10-10m (es decir, unos doce órdenes de magnitud mayor que el dL que se quiere medir), el segundo reto que se tuvo que superar, fue el diseño de un dispositivo capaz de determinar estos incrementos de distancia tan extremadamente pequeños. Este reto se superó diseñando un tipo receptor semejante al interferómetro de Michelson y Morley (figura adjunta), el cual, además ser de gran tamaño, debía utilizar luz láser de muy alta potencia. En este interferómetro gravitacional, las longitudes iniciales de sus brazos se ajustan de tal forma que entre los haces de luz que viajan por ellos se produce una interferencia destructiva en ausencia de perturbaciones. Así, en estas condiciones la señal recibida (producto de esa interferencia) es nula. Al paso de una onda gravitacional esas distancias oscilan, se modifica el tipo de interferencia y se produce una señal oscilante. El análisis de esta señal debe servir para identificar la onda gravitacional.

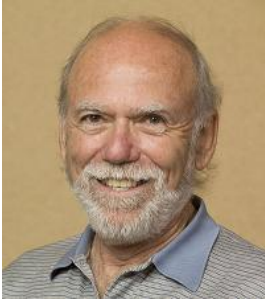


Ideado el tipo de detector, se planteó otro reto de difícil superación: la identificación efectiva con el



mismo de la señal de una onda gravitacional. Las ondas gravitacionales no son, ni mucho menos, el único fenómeno físico que puede producir cambios en la longitud del interferómetro. Sin ir más lejos, el propio ruido sísmico terrestre produce desplazamientos del orden de 10^{-6} (muchísimo mayores que el debido a una onda gravitacional). Por tanto, superpuesta a la señal extremadamente pequeña que se quiere detectar aparece siempre un ruido de mucha mayor magnitud. A la superación de esta dificultad contribuyó sobre todo Rainer Weiss (1932-) afinando el diseño del interferómetro

gravitacional, hasta conseguir que se puedan identificar y mitigar las fuentes de ruido del dispositivo, hasta llegar a la sensibilidad requerida, de unos 10^{-18}m .



Esto supuso la base teórica del proyecto LIGO (Observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser), que se materializó finalmente gracias a la creación por parte de Barry Barish (1936-) de la Colaboración Científica LIGO, encargada tanto de la construcción y funcionamiento del aparato como del análisis de sus datos.

Un detalle no menor de esta red de detectores es el hecho de que se compone de dos interferómetros láser situados en sendos lugares alejados entre sí: uno en Hanford (Washington) y el otro en Livingston (Louisiana). Esta duplicación de dispositivos es requerida porque la naturaleza juega la mala pasada de provocar fenómenos locales generadores de perturbaciones que producen señales similares a las que puede producir una onda gravitacional. Por este motivo, la única manera que se ha encontrado para aumentar de forma significativa la fiabilidad en la identificación de una señal como una señal extraterrestre, es comprobar que la misma se recibe al menos en dos lugares distintos.



Observatorio de Livingston

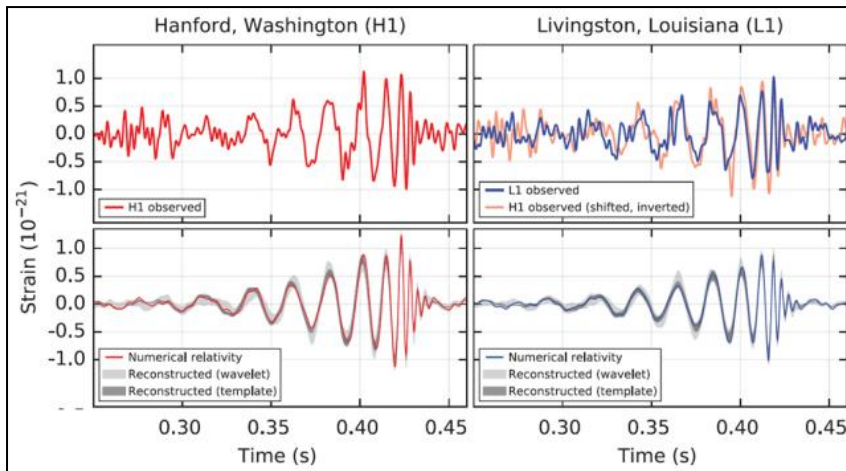


Observatorio de Hanford

Actualmente la colaboración LIGO está formada por más de 1000 científicos repartidos en más de 50 grupos de investigación. Los dos interferómetros láser tienen forma de L de 4km de longitud de brazo el de Louisiana y de 2km el de Hanford. Su primera versión exploró el cosmos entre 2001 y 2010, sin que ninguna señal fuera detectada. Tras este periodo se procedió a una mejora sustancial de los detectores, dando lugar a Advanced LIGO. En paralelo múltiples grupos de investigación procedieron al cálculo detallado de las señales exactas que serían emitidas por posibles fuentes y al desarrollo de técnicas de identificación y extracción de estas señales del fuerte ruido de los detectores. Finalmente este ingente trabajo colectivo dio el fruto deseado, cuando se logró 2015 la primera detección directa de una onda gravitacional. Por sus contribuciones al logro de este hito, en 2017 se concedió la mitad del premio Nobel a Thorne y Basish, y la otra mitad a Weiss.

15. Detección directa de ondas gravitacionales

El 14 de septiembre de 2015 los dos detectores Advanced LIGO registraron con inesperada claridad una señal concordante con el paso de una onda gravitacional. En el gráfico que acompañó a la publicación de la noticia en Physical Review Letters, se muestra la señal individual detectada en cada observatorio, la superposición de ambas y la simulación obtenida al resolver las ecuaciones de la relatividad general para el caso de un sistema de dos agujeros negros fusionándose. El acuerdo entre experimentos y teoría resulta espectacular.



Leyendo el gráfico adjunto vemos que la deformación o *strain* producida por la onda gravitacional, llegó a un máximo de 10^{-21} . Este valor de la deformación significa, que el efecto de la onda gravitacional, por ejemplo, en el diámetro de la Tierra fue de una centésima de millonésima de millonésima de metro (del orden del tamaño de un átomo!).

Por otra parte, el análisis detallado

de estas señales indicó que la fuente emisora de las ondas gravitacionales fueron dos agujeros negros de unas 36 y 29 masas solares, que se fusionaron hace aproximadamente 130 millones de años. Ocurrió a algo más de 1000 millones de años-luz de distancia de la Tierra y, aunque la ubicación exacta del lugar de la esfera celeste donde sucedió no se puede establecer completamente a partir de las medidas de sólo dos observatorios, sí se ha podido estimar que ese lugar está alrededor de la dirección de la Gran Nube de Magallanes en el cielo austral.

En la página web se puede ver una simulación que recrea el evento. A partir del sistema binario original, se formó un sólo agujero negro con 62 masas solares. La diferencia entre la masa final y la masa inicial, es decir, 3 masas solares, fue emitida en forma de ondas gravitacionales. Thorne expresó que esta es la explosión más grande medida en la historia, después del *big bang*".

Estos resultados enseñan que la detección directa de una onda gravitacional puede aportar un compendio amplio e importante de conocimientos científicos. En este caso, esta investigación aportó, como subproducto, la primera observación directa de un agujero negro y la confirmación de lo que hasta entonces era sólo una hipótesis: que los agujeros negros pueden formar sistemas binarios. Esto era inesperado y, por ello, muchos científicos esperaban que la primera señal detectada de ondas gravitacionales proviniese de la fusión de dos estrellas de neutrones, señal que luego se observó en agosto de 2017, contando con la colaboración del detector europeo Virgo, situado en Cascina (Italia) (fotografía adjunta).

Tras la observación de las primeras ondas gravitacionales, todo parece indicar que con relativa rapidez se producirán más y más descubrimientos, como resultado de haber abierto esta ventana al Universo. Durante sus dos primeros periodos de observación, Advanced LIGO y Virgo han detectado otras cuatro fusiones de agujeros negros además de la mencionada fusión de estrellas de neutrones.

Descubierta la primera señal de ondas gravitacionales (El país, 11/02/2016) (Disponible en la Web)

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger (Physical Review Letters, 2016) (Disponible en la Web)

15. Perspectivas

La relatividad ha sido una de las teorías más sometidas a experimentos. Sus predicciones ha sido puestas a prueba siempre con extraordinario éxito. Hasta hace poco estos estudios se referían a fenómenos que tienen lugar en lo que se denomina campo gravitatorio débil, como, por ejemplo, la deflexión de la luz al pasar cerca del Sol, la dilatación del tiempo de origen gravitatorio en zonas de sometidas a una gravedad de intensidad moderada, etc. Las ondas gravitacionales provienen de regiones donde la gravedad es

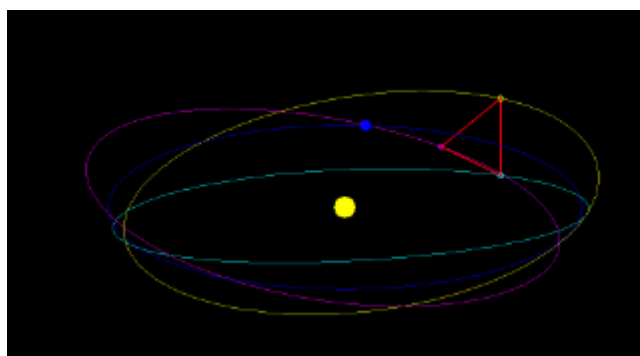
enormemente intensa y su estudio permitirá poner a prueba la teoría en el régimen de campo gravitatorio fuerte.

Los resultados ya obtenidos a raíz de las primeras detecciones directas de ondas gravitatorias son muy prometedores y alumbran un desarrollo inminente de gran envergadura. Con la ampliación de los medios de observación astronómica que se prevé y la mejora ya iniciada en los medios actuales, se espera acceder a fuentes emisoras de ondas gravitacionales tales como estrellas de neutrones en rotación, supernovas, agujeros negros supermasivos e, incluso, el propio eco gravitacional del *big bang*. Puede afirmarse, por tanto, que apenas acabamos de asomarnos por una nueva ventana al Universo a través de la cual esperamos obtener información que permitirá evaluar la relatividad general hasta sus últimas consecuencias, poner a prueba sus aspectos más fundamentales y, sobre todo, profundizar enormemente en el conocimiento de los hechos físicos que gobiernan el mundo.

Próximamente entrarán en funcionamiento nuevos detectores en la Tierra de ondas gravitacionales (otro detector de LIGO en India y el detector japonés KAGRA) y los detectores ya construidos están siendo actualmente modernizados para entrar de nuevo en funcionamiento a finales de 2018.

Pero, además, en un futuro próximo se espera que satélites de tercera generación también se lancen al espacio para explorar con mayor detalle las ondas gravitacionales.

En este sentido, destaca LISA (Laser Interferometer Space Antenna), un proyecto conjunto de la ESA y de la NASA que prevé construir un observatorio espacial dedicado a las ondas gravitacionales. El detector eLISA constará de tres naves espaciales, con forma de discos de hockey, orbitando a cinco millones de kilómetros entre sí, formando un triángulo equilátero. Las tres naves transportarán sistemas



ópticos emisores y detectores que les permitirán rastrearse entre sí y que actuarán conjuntamente para medir las ondas gravitacionales que pasen cerca. Cuando las ondas gravitacionales atraviesen la región del espacio en que se encuentren las naves, sus distancias relativas deberán modificarse por la perturbación espacio-temporal, de la que darán cuenta los instrumentos (medirán pequeñas variaciones de fase de los haces láser que las conectan)

Este documento o cualquier parte de él se puede utilizar libremente con fines educativos o de divulgación, si bien se ha de citar la fuente (**Web de materiales didácticos de la Sección Local de Alicante de la Real Sociedad Española de Física**) y el autor (**Manuel Alonso Sánchez**)

Todos los **documentos** que se citan aquí y las **animaciones interactivas** para este tema se pueden descargar desde el tema "on line", disponible en la citada Web de materiales didácticos: <http://rsefalicante.umh.es/fisica.htm>

Contacto: Nos encantará recibir sugerencias, propuestas de mejora o aportaciones de cualquier tipo. También nos ofrecemos a impartir una charla (para docentes o para alumnos) o un curso de formación sobre algunos de los contenidos de la Web. Estamos a vuestra disposición en esta dirección: manuelalonso@inicio.es.
