

Tras desarrollar la Teoría de la Relatividad Especial (TER), Albert Einstein se planteó la tarea de extender el Principio de Relatividad a todos los sistemas, fueran inerciales o no.

El hecho de que las leyes de la física pudiesen escribirse de la misma manera para todos los sistemas de referencia inerciales (lo que se conoce como **covarianza de las leyes**), mientras que no se cumplían para sistemas acelerados parecía contradictorio, máxime si pensamos que todos los cuerpos del universo están sometidos a la fuerza de gravedad, siendo por tanto objetos que poseen aceleración. No es posible, por tanto, fijar ningún sistema que sea rigurosamente inercial.

Realmente si los efectos debidos a la aceleración son muy pequeños (pensemos en el valor de la aceleración centrípeta de la Tierra orbitando alrededor del Sol debido a la fuerza de gravedad) podemos considerar nuestro sistema como inercial en buena aproximación.

La Teoría de la Relatividad General (TGR) tiene su arranque en el Principio de Equivalencia (1907):

Principio de Equivalencia

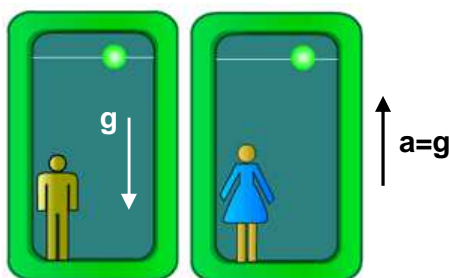
Ningún experimento, sea mecánico o no, puede manifestar diferencia alguna entre un laboratorio acelerado y otro sometido a la acción de un campo gravitatorio. Ambos son equivalentes.

Consideremos dos sistemas de referencia:

En uno de ellos actúa un campo gravitatorio uniforme.

El otro no está sometido a campo gravitatorio alguno, pero se mueve con una aceleración idéntica en valor al campo gravitatorio que actúa en el primero, pero de sentido contrario.

Ambos sistemas son equivalentes, es decir, los experimentos que se lleven a cabo en condiciones idénticas en estos dos sistemas darán lugar a resultados idénticos.



Observadores en dos sistemas de referencia distintos.

El de la izquierda está sometido a la acción de un campo gravitatorio.

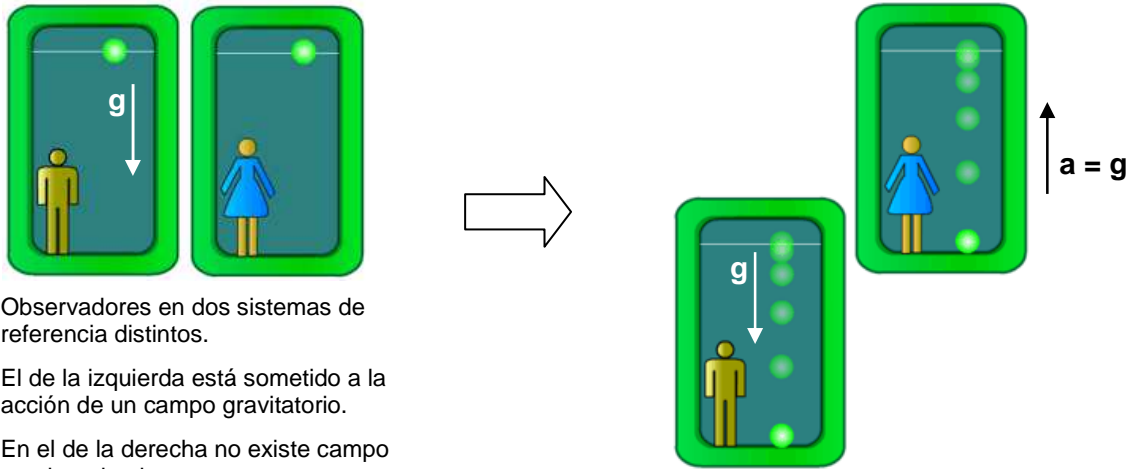
En el de la derecha no existe campo gravitatorio alguno y se mueve hacia arriba con una aceleración igual a g .

Según el Principio de Equivalencia ambos sistemas son equivalentes

El Principio de Equivalencia mantiene que **cualquier campo gravitatorio uniforme puede ser sustituido a todos los efectos por un movimiento con aceleración constante y viceversa.**

Hay que tener en cuenta que los campos gravitatorios con los que nos encontramos en la naturaleza no son constantes (el campo gravitatorio terrestre, por ejemplo, disminuye a medida que nos alejamos de la superficie terrestre, no es idéntico en todos los puntos del planeta debido a variaciones en la densidad y distribución de la materia... etc). Por tanto, sólo podrán ser equivalentes a un movimiento con aceleración constante **si consideramos pequeñas porciones de espacio y tiempos pequeños** (se dice que un campo gravitatorio de **carácter local** es equivalente a un movimiento con aceleración constante).

La identidad entre la **masa inercial** (la que aparece en la segunda ley de Newton) y la **masa gravitacional** (la masa que aparece en la ley de gravitación) fue una pista importante para llegar al enunciado del **Principio de Equivalencia**. Gracias a esa identidad (que pasó desapercibida durante siglos) todos los cuerpos caen con la misma aceleración, estableciéndose una equivalencia entre gravedad y aceleración.



Observadores en dos sistemas de referencia distintos.
 El de la izquierda está sometido a la acción de un campo gravitatorio.
 En el de la derecha no existe campo gravitatorio alguno.

El sistema en el que existe campo gravitatorio (izquierda) permanece en reposo. Un objeto cae en él con aceleración constante.
 El sistema en el que no existe campo gravitatorio (derecha) se mueve hacia arriba con una aceleración igual al campo gravitatorio del otro. Un objeto libre se comporta exactamente igual.

La equivalencia entre campos gravitatorios (locales) y movimientos con aceleración constante permite sustituir los campos gravitatorios homogéneos por sistemas de referencia uniformemente acelerados, hacer un estudio de los mismos y trasladar los resultados obtenidos.

El resultado sería una nueva teoría de la gravitación consistente con los postulados de la Teoría de la Relatividad (especialmente con la proposición de que nada, tampoco la gravedad, puede viajar a mayor velocidad que la luz)

$$F = m a$$

La masa en dinámica es una medida de la inercia de los cuerpos (masa inercial). Una masa elevada significa una gran resistencia a variar la velocidad.

La masa en la ley de gravitación está relacionada con el poder de atracción gravitatorio (masa gravitacional). Cuanto mayor es la masa de un objeto mayor es su poder de atracción sobre otros objetos.

$$F = G \frac{m M}{d^2}$$

Si un objeto de masa m es atraído por otro de masa M , se verá atraído hacia él con una aceleración, a . Si la masa inercial y la gravitacional son iguales, la aceleración comunicada es independiente de su masa.

Los objetos caen, atraídos por la Tierra, con esa aceleración, idéntica para todos ($9,81 \text{ m/s}^2$).

$$\left. \begin{aligned} F &= m a \\ F &= G \frac{m M}{d^2} \end{aligned} \right\} \cancel{m} \implies a = G \frac{M}{d^2}$$

$$a = G \frac{M}{d^2}$$

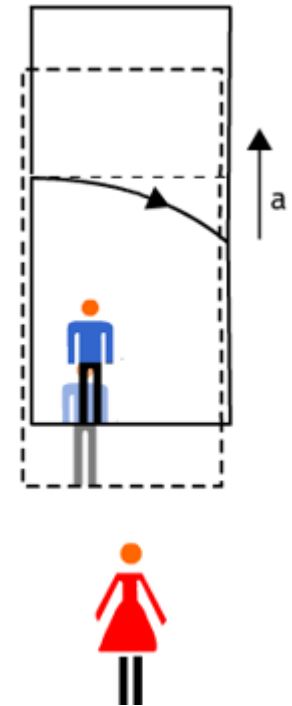
El desarrollo de la Teoría de la Relatividad General aportó conclusiones tan sorprendentes como las generadas a partir de la Teoría de la Relatividad Especial:

1. Los rayos de luz son desviados por los campos gravitatorios (deflexión de la luz)

Si aplicamos el principio de equivalencia podemos sustituir un campo gravitatorio (local) por un movimiento uniformemente acelerado en sentido contrario. Consideremos entonces un laboratorio situado en una región del espacio en la que no existe ningún campo gravitatorio y que se mueve hacia arriba con una aceleración a .

Consideremos que por un pequeño agujero situado en el lateral izquierdo penetra un rayo de luz. Debido al movimiento acelerado del laboratorio un observador situado en el exterior verá la trayectoria de la luz curvada hacia abajo.

Si ahora volvemos al principio, y haciendo uso nuevamente del principio de equivalencia volvemos a situar el laboratorio en un campo gravitatorio equivalente, deberemos de concluir que **un campo gravitatorio curva los rayos de luz**. La situación es equivalente a suponer que los rayos de luz están formados por partículas materiales (con masa) sobre las que actúa el campo gravitatorio. Este resultado es inexplicable desde el punto de vista de la física clásica, ya que la luz no tiene masa, pero la física relativista aporta una explicación: las partículas de la luz (fotones) son pura energía, pero según la TER masa y energía son equivalentes, por lo que el campo gravitatorio puede actuar sobre los rayos de luz desviándolos.



El desarrollo matemático de la teoría permite obtener la expresión del ángulo de desviación de la luz (deflexión) por un astro, lo que podría servir para la confirmación experimental de la teoría:

$$\Theta = -4 G \frac{M}{b c^2}$$

G: constante de gravitación
M: masa estrella
b: distancia mínima del rayo al centro de la estrella
c: velocidad de la luz

Si consideramos la luz de una estrella que pase próxima al Sol, el ángulo de desviación debería ser de 1,7".

En 1919 Eddington y Dyson planificaron sendas expediciones a Sobral (Brasil) y a la isla de Príncipe, ya que el 29 de mayo iba a producirse un eclipse que haría posible la medición propuesta por Einstein. El resultado experimental mostró una excelente concordancia con las predicciones teóricas.

2. Campos gravitatorios intensos provocan dilataciones temporales.

Si se colocan dos relojes en lugares en los cuales el valor del campo gravitatorio tenga distinto valor, se observará que **el reloj colocado en el lugar en el cual el campo gravitatorio es más intenso retrasa respecto al situado en el lugar en el cual el campo gravitatorio es más débil**.

Esta dilatación temporal del tiempo, debida a la acción del campo gravitatorio, nada tiene que ver con la considerada en la teoría especial de la relatividad, por lo que, en caso de que existan ambas deben ser consideradas.

La dilatación temporal de origen gravitatorio debe tenerse en cuenta en los sistemas GPS (junto con la debida a la velocidad). Este sistema determina la posición de un objeto sobre la superficie terrestre determinando cuánto tarda en llegar una señal de radio emitida desde satélites situados a 20 000 km de distancia. A esta altura existe una variación apreciable en el valor del campo gravitatorio. En consecuencia, los relojes situados en los satélites de posicionamiento adelantarán respecto de los situados en la Tierra unos 40 000 nanosegundos por día. Dado que para determinar la posición con la precisión requerida (unos pocos metros) se necesita medir el tiempo de viaje de la señal con una precisión del orden de 10 000 nanosegundos, es necesario considerar los efectos relativistas.

(Se puede encontrar un discusión sobre las correcciones efectuadas en los sistemas GPS en:

<http://web.usal.es/~guillermo/publications/Popularscience/GPSyRelatividadporGuillermoSanchez.pdf>)

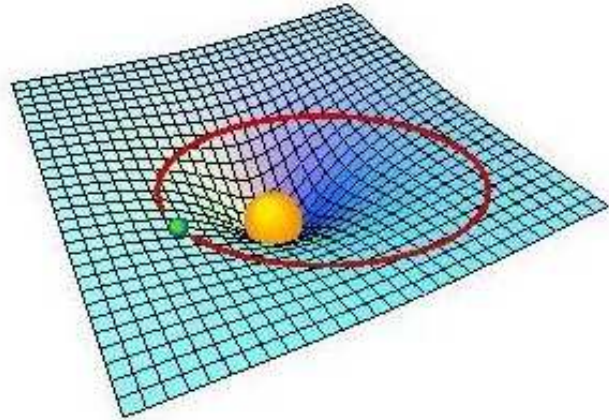
3. Era necesario una revisión completa de la teoría de gravitación de Newton

La teoría de gravitación de Newton consideraba que la interacción gravitatoria debería propagarse de forma instantánea entre los cuerpos afectados.

Según la TER nada, tampoco la gravedad, podía viajar a velocidades superiores a la de la luz en el vacío.

Como se puede deducir de todo lo dicho **la gravitación es el problema central de la Teoría de la Relatividad General**, y para resolverlo hay que realizar un análisis muy profundo de la estructura del espacio-tiempo.

La conclusión a la que se llega es que **nuestro espacio-tiempo no es euclidiano ya que la presencia de masas producen deformaciones (curvaturas) en el continuo espacio-tiempo**. Cuando un rayo de luz viaja en ese espacio-tiempo entre dos puntos, sigue la trayectoria más corta entre ambos. Esa trayectoria es una recta en un espacio plano (euclídeo). Es decir, en una zona del espacio-tiempo en la que no existan masas, o éstas sean muy pequeñas, pero si nos encontramos con masas considerables (astros) el espacio tiempo se curva y la luz recorre una trayectoria curva (geodésica). Análogamente cualquier cuerpo que se mueva en esa región se verá forzado a recorrer una trayectoria curva como consecuencia de la deformación del espacio tiempo.



La fuerza de gravedad de la teoría de gravitación de Newton es reemplazada por la curvatura del espacio-tiempo (tetradimensional) en la nueva teoría.

La presencia de grandes masas (que producen campos gravitatorios intensos), al curvar el espacio-tiempo, provocan distorsiones tanto en el espacio como en el tiempo.

Si se produce una alteración en la distribución de masas (por ejemplo la explosión de una supernova) se originarán **ondas gravitacionales** que se transmiten a una velocidad igual a la de la luz. **La interacción gravitatoria, por tanto, no se propaga de forma instantánea entre los cuerpos.**