

Gravedad

La **gravedad** es un fenómeno natural por el cual los objetos y campos de materia dotados de masa o energía son atraídos entre sí, efecto mayormente observable en la interacción entre los planetas, galaxias y demás objetos del universo. Es una de las cuatro interacciones fundamentales que origina la fuerza que experimenta un cuerpo físico en las cercanías de un objeto astronómico. También se denomina **interacción gravitatoria** o **gravitación**. Históricamente se le ha llamado también **fuerza de gravedad**, aunque hoy el consenso científico considera esa expresión incorrecta.

Si un cuerpo está situado en las proximidades de un planeta, un observador a una distancia fija del planeta medirá una aceleración del cuerpo dirigida hacia la zona central de dicho planeta, si tal cuerpo no está sometido al efecto de otras fuerzas. La Oficina Internacional de Pesas y Medidas estableció en 1901 una gravedad estándar para la superficie de la Tierra, acorde al Sistema Internacional, con un valor fijo de $9,80665\text{ m/s}^2$.¹

Introducción

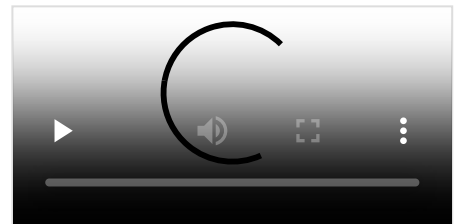
La gravedad es una de las cuatro interacciones fundamentales observadas en la naturaleza. Origina los movimientos a gran escala que se observan en el universo: la órbita de la Luna alrededor de la Tierra, las órbitas de los planetas alrededor del Sol, etcétera. A escala cosmológica parece ser la interacción dominante, pues gobierna la mayor parte de los fenómenos a gran escala (las otras tres interacciones fundamentales son predominantes a escalas más pequeñas). El electromagnetismo explica el resto de los fenómenos macroscópicos, mientras que la interacción fuerte y la interacción débil son importantes solo a escala subatómica.

El término «gravedad» se utiliza para designar la intensidad del fenómeno gravitatorio en la superficie de los planetas o satélites. Isaac Newton fue el primero en exponer que es de la misma naturaleza la fuerza que hace que los objetos caigan con aceleración constante en la Tierra (gravedad terrestre) y la fuerza que mantiene en movimiento los planetas y las estrellas. Esta idea le llevó a formular la primera teoría general de la gravitación, la universalidad del fenómeno, expuesta en su obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

Einstein, en la teoría de la relatividad general hace un análisis diferente de la interacción gravitatoria. De acuerdo con esta teoría, la gravedad puede entenderse como un efecto geométrico de la materia sobre el espacio-tiempo. Cuando cierta cantidad de materia ocupa una región del espacio-tiempo, provoca que este se deforme, de este modo la deformación de este es como si el mismo espacio-tiempo se comprimiera en dirección al centro de masa de un objeto. Visto así, la fuerza gravitatoria deja de ser una «misteriosa fuerza



Isaac Newton formuló la *ley de gravitación universal*.



El astronauta David Scott (Apolo 15) en la Luna.

que atrae», y se convierte en el efecto que produce la deformación del espacio-tiempo —de geometría no euclídea— sobre el movimiento de los cuerpos. Según esta teoría, dado que todos los objetos se mueven en el espacio-tiempo, al deformarse este, la trayectoria de aquellos será desviada produciendo su aceleración.

Actualmente, los científicos continúan trabajando en una nueva teoría de gravedad cuántica que describa unificadamente y de manera consistente los fenómenos gravitatorios y cuánticos. Se requiere una teoría que unifique los dos tipos de fenómenos para poder entender los primeros instantes del Big Bang o las singularidades gravitatorias en el interior de los agujeros negros.

Historia de la teoría gravitacional

Mundo antiguo

En la Física afirma el antiguo filósofo griego Aristóteles que los objetos caen con una velocidad proporcional a su peso e inversamente proporcional a la densidad del fluido en el que están sumergidos.² Esta es una aproximación correcta para los objetos en el campo gravitatorio de la Tierra que se mueven en el aire o el agua (véase: Física aristotélica).³

El peripatético Estratón de Lámpsaco (c. 335 – c. 269 a. C.) rechazó la creencia aristotélica de los "lugares naturales" a cambio de una visión mecánica en la que los objetos no ganan peso al caer, argumentando en cambio que el mayor impacto se debía a un aumento de velocidad.⁴ ⁵ Epicuro (c. 341 – 270 a. C.) consideraba el peso como una propiedad inherente de los átomos que influye en su movimiento.⁶

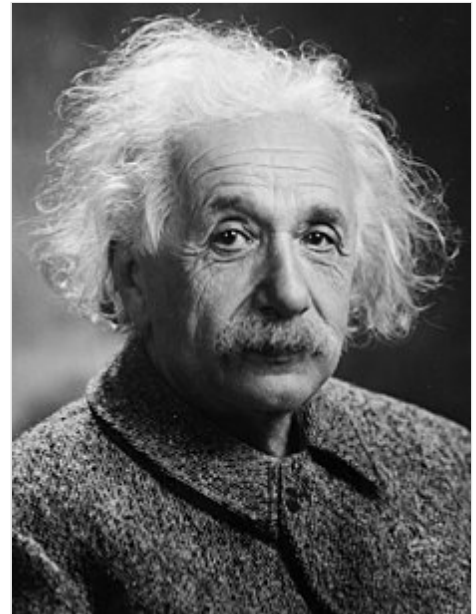
El astrónomo griego Aristarco de Samos (c. 310 a. C.- c. 230 a. C.) teorizó la traslación de la Tierra alrededor del Sol en una cosmología heliocéntrica.⁷ Seleuco de Seleucia (c. 190 a. C.; fl. c. 150 a. C.), seguidor de Aristarco,⁸ señaló la relación entre la amplitud de la marea y las fases de la Luna⁹ (véase Campo gravitatorio de la Luna).

Arquímedes descubrió el centro de gravedad de un triángulo.¹⁰ También postuló que si dos pesos iguales no tenían el mismo centro de gravedad, el centro de gravedad de los dos pesos juntos estaría en el medio de la línea que une sus centros de gravedad.¹¹ En Sobre los cuerpos flotantes, Arquímedes afirmó que para cualquier objeto sumergido en un fluido existe una fuerza de flotación hacia arriba equivalente al peso del fluido desplazado por el volumen del objeto. Los fluidos descritos por Arquímedes no son autogravitantes, ya que supone que "cualquier fluido en reposo es la superficie de una esfera cuyo centro es el mismo que el de la Tierra" (ver Principio de Arquímedes).¹² ¹³

El filósofo griego Plutarco (c. 46 – 120 d. C.) sugirió que la atracción gravitacional no era exclusiva de la Tierra.¹⁴

El ingeniero y arquitecto romano Vitruvio (c. 80 / 70 a. C.-15 a. C.) sostuvo en su De architectura que la gravedad no depende del peso de una sustancia sino de su 'naturaleza' (cf. gravedad específica).¹⁵

En el siglo VI d. C., el erudito bizantino alejandrino Juan Filópono (c. 490 – c. 570) declaró en su comentario sobre la Física de Aristóteles que "Si uno deja caer simultáneamente desde la misma altura dos cuerpos que difieren mucho en peso, encontrará que la razón de los tiempos de su movimiento no



Albert Einstein formuló la Relatividad General, que es una teoría relativista de la gravitación.

corresponde a la razón de sus pesos, pero la diferencia en el tiempo es muy pequeña". Propuso la teoría del ímpetu, que modifica la teoría de Aristóteles de que "la continuación del movimiento depende de la acción continua de una fuerza" al incorporar una fuerza causal que disminuye con el tiempo.¹⁶

Revolución científica

Los trabajos modernos sobre la teoría gravitacional comenzaron con el trabajo de Galileo Galilei a finales del siglo xvi y principios del xvii. En su famoso (aunque posiblemente apócrifo¹⁷) experimento dejando caer bolas desde la Torre de Pisa, y más tarde con cuidadosas mediciones de bolas rodando por un plano inclinado, Galileo demostró que la aceleración gravitatoria es la misma para todos los objetos. Esto supuso un gran cambio respecto a la creencia de Aristóteles de que los objetos más pesados tienen una mayor aceleración gravitatoria.¹⁸ Galileo postuló la resistencia del aire como la razón por la que los objetos con baja densidad y una superficie elevada caen más lentamente en una atmósfera. El trabajo de Galileo sentó las bases para la formulación de la teoría de la gravedad de Newton.¹⁹ Galileo tomó de los calculadores de Merton College y de Domingo de Soto la noción de que el movimiento en caída libre de un objeto sin efectos aerodinámicos importantes, siguen un movimiento uniformemente acelerado, ya que él mismo explica que eso era enseñado por "los doctores de París" a principio del siglo xvi.

Teoría de la gravitación de Newton



El físico y matemático inglés, Sir Isaac Newton (1642-1727)

En 1687, el matemático inglés Sir Isaac Newton publicó *Principia*, que plantea la hipótesis de la ley de la inversa del cuadrado de la gravitación universal. En sus propias palabras, *deduje que las fuerzas que mantienen a los planetas en sus orbes deben [ser] recíprocamente como los cuadrados de sus distancias desde los centros alrededor de los cuales giran: y así comparé la fuerza requerida para mantener a la Luna en su Orbe con la fuerza de gravedad en la superficie de la Tierra; y encontré que responden de manera bastante cercana.*²⁰ La cita procede de un memorándum que se cree que fue escrito hacia 1714. Ya en 1645 Ismaël Bullialdus había argumentado que cualquier fuerza ejercida por el Sol sobre objetos distantes tendría que seguir una ley inversa al cuadrado. Sin embargo, también descartó la idea de que tal fuerza existiera. Véase, por ejemplo,²¹ La ecuación es la siguiente:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Donde F es la fuerza, m_1 y m_2 son las masas de los objetos que interactúan, r es la distancia entre los centros de las masas y G es la constante gravitatoria.

La teoría de Newton tuvo su mayor éxito cuando se utilizó para predecir la existencia de Neptuno basándose en los movimientos de Urano que no podían ser explicados por las acciones de los otros planetas. Los cálculos de John Couch Adams y Urbain Le Verrier predijeron la posición general del planeta, y los cálculos de Le Verrier son los que llevaron a Johann Gottfried Galle al descubrimiento de Neptuno.

Una discrepancia en la órbita de Mercurio puso de manifiesto los fallos de la teoría de Newton. A finales del siglo xix, se sabía que su órbita mostraba ligeras perturbaciones que no podían explicarse por completo con la teoría de Newton, pero todas las búsquedas de otro cuerpo perturbador (como un planeta que orbitara alrededor del Sol aún más cerca que Mercurio) habían sido infructuosas. La cuestión se resolvió en 1915

con la nueva teoría de la relatividad general de Albert Einstein, que explicaba la pequeña discrepancia en la órbita de Mercurio. Esta discrepancia era el avance en el perihelio de Mercurio de 42,98 segundos de arco por siglo.²²

Aunque la teoría de Newton ha sido superada por la relatividad general de Albert Einstein, la mayoría de los cálculos gravitacionales modernos de la no relativista se siguen haciendo con la teoría de Newton porque es más sencilla de trabajar y da resultados suficientemente precisos para la mayoría de las aplicaciones que implican masas, velocidades y energías suficientemente pequeñas.

Principio de equivalencia

El principio de equivalencia, explorado por una sucesión de investigadores, entre ellos Galileo, Loránd Eötvös y Einstein, expresa la idea de que todos los objetos caen de la misma manera, y que los efectos de la gravedad son indistintos de ciertos aspectos de la aceleración y la desaceleración. La forma más sencilla de comprobar el principio de equivalencia débil es dejar caer dos objetos de masas o composiciones diferentes en el vacío y ver si caen al suelo al mismo tiempo. Estos experimentos demuestran que todos los objetos caen a la misma velocidad cuando otras fuerzas (como la resistencia del aire y los efectos electromagnéticos) son despreciables. Las pruebas más sofisticadas utilizan una balanza de torsión del tipo inventado por Eötvös. Para realizar experimentos más precisos en el espacio se han previsto experimentos por satélite, por ejemplo STEP.²³

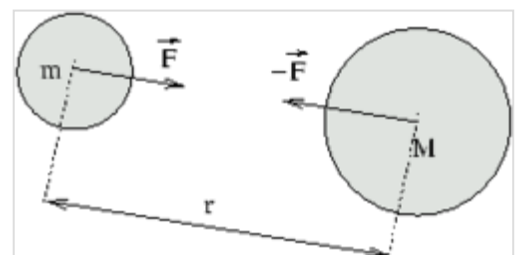
Las formulaciones del principio de equivalencia incluyen:

- El principio de equivalencia débil: *La trayectoria de una masa puntual en un campo gravitatorio sólo depende de su posición y velocidad iniciales, y es independiente de su composición.*²⁴
- El principio de equivalencia einsteiniano: *El resultado de cualquier experimento local no gravitacional en un laboratorio que cae libremente es independiente de la velocidad del laboratorio y de su ubicación en el espaciotiempo.*²⁵
- El principio de equivalencia fuerte que requiere ambas cosas.

Mecánica clásica: ley de la gravitación universal de Isaac Newton

En la teoría newtoniana de la gravitación, los efectos de la gravedad son siempre atractivos, y la fuerza resultante se calcula respecto del centro de gravedad de ambos objetos (en el caso de la Tierra, el centro de gravedad es su centro de masas, al igual que en la mayoría de los cuerpos celestes de características homogéneas). La gravedad newtoniana tiene un alcance teórico infinito; la fuerza es mayor si los objetos están próximos pero a mayor distancia dicha fuerza pierde intensidad. Además Newton postuló que la gravedad es una acción a distancia (y por tanto a nivel relativista no es una descripción correcta, sino solo una primera aproximación para cuerpos en movimiento muy lento comparado con la velocidad de la luz).

La ley de la gravitación universal formulada por Isaac Newton postula que la fuerza que ejerce una partícula puntual con masa m_1 sobre otra con masa m_2 es directamente proporcional al



Fuerzas mutuas de atracción entre dos esferas de diferente tamaño. De acuerdo con la mecánica newtoniana las dos fuerzas son iguales en módulo, pero de sentido contrario; al estar aplicadas en diferentes cuerpos no se anulan y su efecto combinado no altera la posición del centro de gravedad conjunto de ambas esferas.

producto de las masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa:

$$\mathbf{F}_{21} = -G \frac{m_1 m_2}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|^2} \hat{\mathbf{u}}_{21}$$

donde $\hat{\mathbf{u}}_{21}$ es el vector unitario que dirigido de la partícula 1 a la 2, esto es, en la dirección del vector $\mathbf{r}_{21} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$, y G es la constante de gravitación universal, siendo su valor aproximadamente $6,674 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$.

Por ejemplo, usando la ley de la gravitación universal, podemos calcular la fuerza de atracción entre la Tierra y un cuerpo de 50 kg. La masa de la Tierra es $5,974 \times 10^{24} \text{ kg}$ y la distancia entre el centro de gravedad de la Tierra (centro de la tierra) y el centro de gravedad del cuerpo es 6378,14 km (igual a 6 378 140 m, y suponiendo que el cuerpo se encuentre sobre la línea del ecuador). Entonces, la fuerza es:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} = 6,67428 \times 10^{-11} \frac{50 \times 5,974 \cdot 10^{24}}{6378140^2} = 490,062 \text{ N}$$

La fuerza con que se atraen la Tierra y el cuerpo de 50 kg es 490.062 N (Newtons, Sistema Internacional de Unidades), lo que representa 50 kgf (kilogramo-fuerza, Sistema Técnico), como cabía esperar, por lo que decimos simplemente que el cuerpo pesa 50 kg.

Dentro de esta ley empírica, tenemos estas importantes conclusiones:

- Las fuerzas gravitatorias son siempre atractivas. El hecho de que los planetas describan una órbita cerrada alrededor del Sol indica este hecho. Una fuerza atractiva puede producir también órbitas abiertas, pero una fuerza repulsiva nunca podrá producir órbitas cerradas.
- Tienen alcance infinito. Dos cuerpos, por muy alejados que se encuentren, experimentan esta fuerza.
- La fuerza asociada con la interacción gravitatoria es central.
- A mayor distancia menor fuerza de atracción, y a menor distancia mayor la fuerza de atracción.

A pesar de los siglos, hoy sigue utilizándose cotidianamente esta ley en el ámbito del movimiento de cuerpos incluso a la escala del sistema solar, aunque esté desfasada teóricamente. Para estudiar el fenómeno en su completitud hay que recurrir a la teoría de la Relatividad General.

Véanse también: masa inercial y Masa gravitacional.

Problema de los dos cuerpos y órbitas planetarias

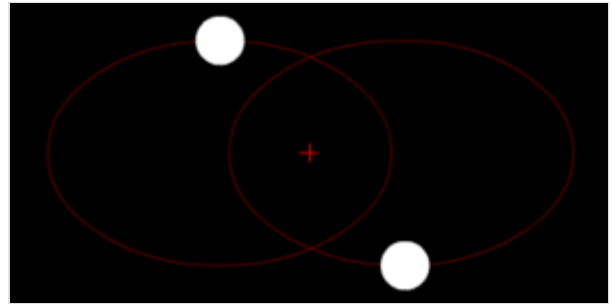
La ley de Newton aplicada a un sistema de dos partículas o dos cuerpos, cuyas dimensiones físicas son pequeñas comparadas con las distancias entre ellos, lleva a que ambos cuerpos describirán una curva cónica (elipse, parábola o hipérbola) respecto a un sistema de referencia inercial con origen en el centro de masa del sistema, que además coincidirá con uno de los focos de la cónica. Si la energía total del sistema (energía potencial más energía cinética de los cuerpos) es negativa, entonces las curvas cónicas que dan la trayectoria

de ambos cuerpos serán elipses. Ese resultado fue la primera deducción teórica de que los planetas reales se mueven en trayectorias que con bastante aproximación, son elipses, y permitió explicar diversas observaciones empíricas resumidas en las leyes de Kepler.

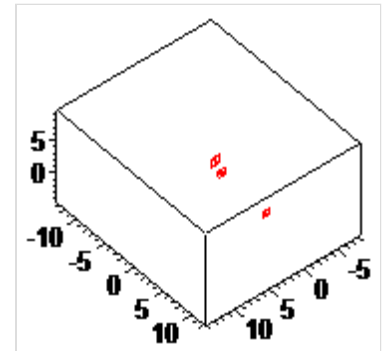
Problema de los tres cuerpos

De acuerdo con la descripción newtoniana, cuando se mueven tres cuerpos bajo la acción de su campo gravitatorio mutuo, como el sistema Sol-Tierra-Luna, la fuerza sobre cada cuerpo es justamente la suma vectorial de las fuerzas gravitatorias ejercidas por los otros dos. Así las ecuaciones de movimiento son fáciles de escribir pero difíciles de resolver ya que no son lineales. De hecho, es bien conocido que la dinámica del problema de los tres cuerpos de la mecánica clásica es una dinámica caótica.

Desde la época de Newton se ha intentado hallar soluciones matemáticamente exactas del problema de los tres cuerpos, hasta que a finales del siglo XIX Henri Poincaré demostró en un célebre trabajo que era imposible una solución general analítica (sin embargo, se mostró también que por medio de series infinitas convergentes se podía solucionar el problema). Solamente en algunas circunstancias son posibles ciertas soluciones sencillas. Por ejemplo, si la masa de uno de los tres cuerpos es mucho menor que la de los otros dos (problema conocido como *problema restringido de los tres cuerpos*), el sistema puede ser reducido a un problema de dos cuerpos más otro problema de un solo cuerpo.



Dos cuerpos orbitando alrededor de su centro de masas en órbitas elípticas

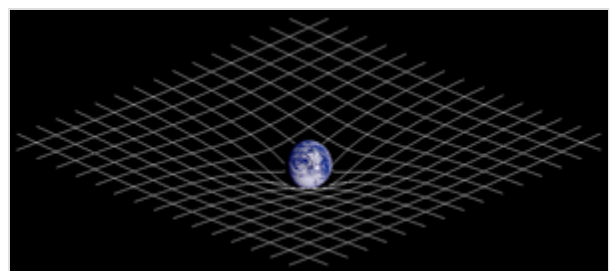


Movimiento caótico de tres cuerpos en un campo de fuerzas aislado

Mecánica relativista: teoría general de la relatividad

Albert Einstein revisó la teoría newtoniana en su teoría de la relatividad general, describiendo la interacción gravitatoria como una deformación de la geometría del espacio-tiempo por efecto de la masa de los cuerpos; el espacio y el tiempo asumen un papel dinámico.

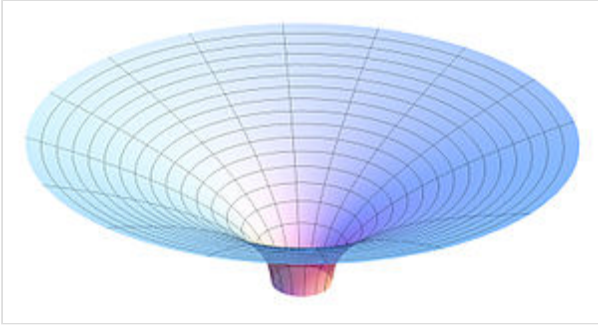
Según Einstein, no existe el empuje gravitatorio; dicha fuerza es una ilusión, un efecto de la geometría. Así, la Tierra deforma el espacio-tiempo de nuestro entorno, de manera que el propio espacio nos empuja hacia el suelo. Una hormiga, al caminar sobre un papel arrugado, tendrá la sensación de que hay fuerzas misteriosas que la empujan hacia diferentes direcciones, pero lo único que existe son pliegues en el papel, su geometría.



Representación esquemática bidimensional de la deformación del espacio-tiempo en el entorno de la Tierra

La deformación geométrica viene caracterizada por el tensor métrico que satisface las ecuaciones de campo de Einstein. La "fuerza de la gravedad" newtoniana es solo un efecto asociado al hecho de que un observador en reposo respecto a la fuente del campo no es un observador inercial y por tanto al tratar de aplicar el equivalente relativista de las leyes de Newton mide fuerzas ficticias dadas por los símbolos de Christoffel de la métrica del espacio-tiempo.

La gravedad convencional de acuerdo con la teoría de la relatividad tiene generalmente características atractivas, mientras que la denominada energía oscura parece tener características de fuerza gravitacional repulsiva, causando la acelerada expansión del universo.



Una representación del paraboloides de Flamm, cuya curvatura geométrica coincide con la del plano de la eclíptica o ecuatorial de una estrella esféricamente simétrica.

Cálculo relativista de la fuerza aparente

En presencia de una masa esférica, el espacio-tiempo no es plano sino curvo, y el tensor métrico g que sirve para calcular las distancias viene dado en coordenadas usuales (t,r,θ,ϕ) , llamada métrica de Schwarzschild:

$$g = -c^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) dt \otimes dt + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr \otimes dr + r^2 (d\theta \otimes d\theta + \sin^2 \theta d\phi \otimes d\phi)$$

donde G es la constante de gravitación universal, M es la masa de la estrella, y c es la velocidad de la luz. La ecuación de las geodésicas dará la ecuación de las trayectorias en el espacio-tiempo curvo. Si se considera una partícula en reposo respecto a la masa gravitatoria que crea el campo, se tiene que esta seguirá una trayectoria dada por las ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{d^2 r}{d\tau^2} = + \frac{GM}{(c^2 r - 2GM)r} \left(\frac{dr}{d\tau}\right)^2 - \left(r - \frac{2GM}{c^2}\right) \frac{GM}{r^3} \left(\frac{dt}{d\tau}\right)^2 \\ \frac{d^2 t}{d\tau^2} = -2 \frac{GM}{(c^2 r - 2GM)r} \left(\frac{dr}{d\tau}\right) \left(\frac{dt}{d\tau}\right) \end{cases}$$

La primera de estas ecuaciones da el cambio de la coordenada radial, y la segunda da la dilatación del tiempo respecto a un observador inercial, situado a una distancia muy grande respecto a la masa que crea el campo. Si se particularizan esas ecuaciones para el instante inicial en que la partícula está en reposo y empieza a moverse desde la posición inicial, se llega a que la fuerza aparente que mediría un observador en reposo viene dada por:

$$\frac{d^2 r}{d\tau^2} = - \left(r - \frac{2GM}{c^2}\right) \frac{GM}{r^3} \left(\frac{dt}{d\tau}\right)^2 = - \frac{GM}{r^2} \left[\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) \left(\frac{dt}{d\tau}\right)^2 \right] \approx - \frac{GM}{r^2}$$

Esta expresión coincide con la expresión de la teoría newtoniana si se tiene en cuenta que la dilatación del tiempo gravitatoria para un observador dentro de un campo gravitatorio y en reposo respecto a la fuente del campo viene dado por:

$$\left| \left(\frac{dt}{d\tau} \right)^2 = \left[1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right]^{-1} \right.$$

Ondas gravitatorias

Además, la relatividad general predice la propagación de ondas gravitatorias. Estas ondas solo podrían ser medibles si las originan fenómenos astrofísicos violentos, como el choque de dos estrellas masivas o remanentes del *Big Bang*. Estudios preliminares sugieren que estas ondas han sido finalmente detectadas²⁶ de forma indirecta en la variación del periodo de rotación de púlsares dobles, y según el proyecto LIGO, también se detectaron provenientes de la unión de dos agujeros negros.²⁷ Por otro lado, las teorías cuánticas actuales apuntan a una "unidad de medida de la gravedad", el gravitón, como partícula que provoca dicha "fuerza", es decir, como partícula asociada al campo gravitatorio.

Efectos gravitatorios

Con la ayuda de esta nueva teoría, se pueden observar y estudiar una nueva serie de sucesos antes no explicables o no observados:

- Desviación gravitatoria de luz hacia el rojo en presencia de campos con intensa gravedad: la frecuencia de la luz decrece al pasar por una región de elevada gravedad. Confirmado por el experimento de Pound y Rebka (1959).
- Dilatación gravitatoria del tiempo: los relojes situados en condiciones de gravedad elevada marcan el tiempo más lentamente que relojes situados en un entorno sin gravedad. Demostrado experimentalmente con relojes atómicos situados sobre la superficie terrestre y los relojes en órbita del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés). También, aunque se trata de intervalos de tiempo muy pequeños, las diferentes pruebas realizadas con sondas planetarias han dado valores muy cercanos a los predichos por la relatividad general.
- Efecto Shapiro (dilatación gravitatoria de desfases temporales): diferentes señales atravesando un campo gravitatorio intenso necesitan mayor tiempo para hacerlo.
- Decaimiento orbital debido a la emisión de radiación gravitatoria. Observado en púlsares binarios.
- Precesión geodésica: debido a la curvatura del espacio-tiempo, la orientación de un giroscopio en rotación cambiará con el tiempo. Esto está siendo puesto a prueba por el satélite Gravity Probe B.

Mecánica cuántica: búsqueda de una teoría unificada

Aunque aún no se dispone de una auténtica descripción cuántica de la gravedad, todos los intentos por crear una teoría física que satisfaga simultáneamente los principios cuánticos y a grandes escalas coincida con la teoría de Einstein de la gravitación, han encontrado grandes dificultades. En la actualidad existen algunos enfoques prometedores como la gravedad cuántica de bucles, la teoría de supercuerdas o la teoría de twistores, pero ninguno de ellos es un modelo completo que pueda suministrar predicciones suficientemente precisas. Además se han ensayado un buen número de aproximaciones semiclásicas que han sugerido

nuevos efectos que debería predecir una teoría cuántica de la gravedad. Por ejemplo, Stephen Hawking usando uno de estos últimos enfoques sugirió que un agujero negro debería emitir cierta cantidad de radiación, efecto que se llamó radiación de Hawking y que aún no ha sido verificado empíricamente.

Las razones de las dificultades de una teoría unificada son varias. La mayor de ellas es que en el resto de teorías cuánticas de campos la estructura del espacio-tiempo es fija totalmente independiente de la materia, pero en cambio, en una teoría cuántica de la gravedad el propio espacio-tiempo debe estar sujeto a principios probabilistas, pero no sabemos como describir un espacio de Hilbert para los diversos estados cuánticos del propio espacio-tiempo. Así La unificación de la fuerza gravitatoria con las otras fuerzas fundamentales sigue resistiéndose a los físicos. La aparición en el Universo de materia oscura o una aceleración de la expansión del Universo hace pensar que todavía falta una teoría satisfactoria de las interacciones gravitatorias completas de las partículas con masa.

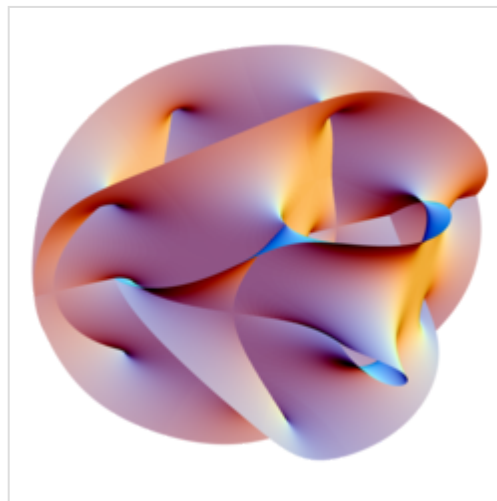
Otro punto difícil, es que de acuerdo con los principios cuánticos, el campo gravitatorio debería manifestarse en «cuantos» o partículas bosónicas transmisoras de la influencia gravitatoria. Dadas las características del campo gravitatorio, la supuesta partícula que transmitiría la interacción gravitatoria, llamada provisionalmente gravitón, debería ser una partícula sin masa (o con una masa extremadamente pequeña) y un espín de **2 \hbar** . Sin embargo, los experimentos de detección de ondas gravitatorias todavía no han encontrado evidencia de la existencia del gravitón, por lo que de momento no es más que una conjetura física que podría no corresponderse con la realidad.

La interacción gravitatoria como fuerza fundamental

La interacción gravitatoria es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la Naturaleza, junto al electromagnetismo, la interacción nuclear fuerte y la interacción nuclear débil. A diferencia de las fuerzas nucleares y a semejanza del electromagnetismo, actúa a grandes distancias. Sin embargo, al contrario que el electromagnetismo, la gravedad es una fuerza de tipo atractiva aunque existen casos particulares en que las geodésicas temporales pueden expandirse en ciertas regiones del espacio-tiempo, lo cual hace aparecer a la gravedad como una fuerza repulsiva, por ejemplo la energía oscura. Este es el motivo de que la gravedad sea la fuerza más importante a la hora de explicar los movimientos celestes.

Véase también

- Ley de gravitación universal
- Ingravidez
- Anomalía gravitatoria
- Anomalía geoidal
- Campo gravitatorio
- Interacciones fundamentales
- Teoría general de la relatividad
- Teoría de supercuerdas



Sección bidimensional proyectada en 3D de una variedad de Calabi-Yau de dimensión 6 embebida en CP^4 , este tipo de variedades se usan para definir una teoría de supercuerdas en diez dimensiones, usada como modelo de gravedad cuántica y teoría del todo.

- Superfuerza

Referencias

1. «Resolution of the 3rd CGPM (1901)» (<http://www1.bipm.org/en/CGPM/db/3/2/>). Oficina Internacional de Pesas y Medidas. Consultado el 10 de diciembre de 2018.
2. Drabkin, Israel E. (1938). «Notes on the Laws of Motion in Aristotle». *The American Journal of Philology* **59** (1): 60-84. JSTOR 90584 (<https://www.jstor.org/stable/90584>). doi:10.2307/290584 (<https://dx.doi.org/10.2307%2F290584>).
3. Rovelli, Carlo (2015/ed). «Aristotle's Physics: A Physicist's Look» (<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-the-american-philosophical-association/article/aristotles-physics-a-physicists-look/60964532EE56BA65655971A314FD9717>). *Journal of the American Philosophical Association* (en inglés) **1** (1): 23-40. ISSN 2053-4477 (<https://portal.issn.org/resource/issn/2053-4477>). doi:10.1017/apa.2014.11 (<https://dx.doi.org/10.1017%2Fapa.2014.11>). Consultado el 8 de noviembre de 2018.
4. Carrier, Richard (1 de diciembre de 2017). *The Scientist in the Early Roman Empire* (<https://books.google.com/books?id=Qu07DwAAQBAJ&q=For+example%2C+in+his+lost+books+On+Lightness+and+Heaviness+and+On+Motion%2C+Strato+abandoned+the+doctrine+of+%27natural+places%27+in+exchange+for+a+more+mechanical+view+of+why+some+objects+rise+and+others+fall+&pg=PT142>) (en inglés). Pitchstone Publishing (US&CA). p. 333. ISBN 978-1-63431-107-6. «For example, in his lost books On Lightness and Heaviness and On Motion, Strato abandoned the doctrine of 'natural places' in exchange for a more mechanical view of why some objects rise and others fall ».
5. Fortenbaugh, William (2017). *Strato of Lampsacus: Text, Translation and Discussion* (<https://books.google.com/books?id=N8s3DwAAQBAJ&pg=PA103>) (en inglés). Routledge. ISBN 978-1-351-48792-4. «If someone drops a rock [from] a finger's height above the ground, it certainly won't make a visible impact on the ground, but if someone drops it holding it a hundred feet or more, it will have a strong impact. And there is no other reason for that impact. Because it does not have greater weight, nor is it impelled by greater force; but it moves faster. »
6. «Weight in Greek Atomism» (<https://philarchive.org/archive/AUGWIG-3>). *Philosophia* **45**: 85. 2015.
7. «Plutarch, Platonicae quaestiones, Question VIII, section 1» (<http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus:text:2008.01.0384:chapter=8:section=1>). www.perseus.tufts.edu. Consultado el 27 de agosto de 2023.
8. «Plutarch, Platonicae quaestiones, Question VIII, section 1» (<http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus:text:2008.01.0384:chapter=8:section=1>). www.perseus.tufts.edu. Consultado el 27 de agosto de 2023.
9. Strabo. «Geography — III, 5, 9.» (https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Strabo/3E*.html). penelope.uchicago.edu. Consultado el 27 de agosto de 2023.
10. Reviel Neitz; William Noel (13 de octubre de 2011). *The Archimedes Codex: Revealing The Secrets of the World's Greatest Palimpsest* (<https://books.google.com/books?id=ZC1MOaAkKnsC&pg=PT125>). Hachette UK. p. 125. ISBN 978-1-78022-198-4.
11. CJ Tuplin, Lewis Wolpert (2002). *Science and Mathematics in Ancient Greek Culture* (<https://books.google.com/books?id=ajGkvOo0egwC&pg=PR11>). Hachette UK. p. xi. ISBN 978-0-19-815248-4.
12. *The works of Archimedes* (Thomas L. Heath, trad.) (<https://archive.org/stream/worksofarchimede00arch#page/254/mode/2up>). Cambridge: Cambridge University Press. 1897. p. 254. Consultado el 13 de noviembre de 2017.
13. Ceccarelli, Marco (17 de agosto de 2007). *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science: Their Contributions and Legacies* (<https://books.google.com/books?id=UmBnVMA5ri4C&pg=PA13>) (en inglés). Springer Science & Business Media. p. 13. ISBN 978-1-4020-6366-4.

14. Bakker, Frederik; Palmerino, Carla Rita (1 de junio de 2020). «Motion to the Center or Motion to the Whole? Plutarch's Views on Gravity and Their Influence on Galileo» (<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/709138>). *Isis* (en inglés) **111** (2): 217-238. ISSN 0021-1753 (<https://portal.issn.org/resource/issn/0021-1753>). doi:10.1086/709138 (<https://dx.doi.org/10.1086%2F709138>).
15. Vitruvius, Marcus Pollio (1914). 7 (http://www.gutenberg.org/files/20239/20239-h/29239-h.htm#Page_215). En Alfred A. Howard, ed. «De Architectura libri decem». VII (Harvard University, Cambridge: Harvard University Press). p. 215.
16. «John Philoponus» (<https://www.eoht.info/page/John%20Philoponus>). *www.eoht.info*. Consultado el 9 de junio de 2023.
17. Ball, Phil (Junio de 2005). «Tall Tales». *Nature News*. doi:10.1038/news050613-10 (<https://dx.doi.org/10.1038%2Fnews050613-10>).
18. Galileo (1638), *Dos ciencias nuevas, Primer día habla Salviati: Si esto fuera lo que Aristóteles quiso decir, le cargaríais con otro error que equivaldría a una falsedad; porque, al no existir en la tierra una altura tan grande, es evidente que Aristóteles no podría haber hecho el experimento; sin embargo, quiere darnos la impresión de que lo ha realizado cuando habla de tal efecto como uno que vemos*.
19. Bongaarts, Peter (2014). *Teoría Cuántica: Un enfoque matemático* (<https://books.google.com/books?id=Cc6lBQAAQBAJ&pg=PA11>) (ilustrada edición). Springer. p. 11. ISBN 978-3-319-09561-5.
20. Chandrasekhar, Subrahmanyan (2003). Oxford University Press, ed. *Principia de Newton para el lector común*. Oxford. (pp. 1-2).
21. Linton, Christopher M. (2004). *De Eudoxus a Einstein - Una historia de la astronomía matemática* (https://archive.org/details/fromeudoxustoein00lint_648). Cambridge: Cambridge University Press. p. 225 (https://archive.org/details/fromeudoxustoein00lint_648/page/n237). ISBN 978-0-521-82750-8.
22. Nobil, Anna M. (Marzo 1986). «El valor real del avance del perihelio de Mercurio». *Nature* **320** (6057): 39-41. Bibcode:...39N 1986Natur.320 ...39N (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1986Natur.320>). S2CID 4325839 (<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4325839>). doi:10.1038/320039a0 (<https://dx.doi.org/10.1038%2F320039a0>).
23. M.C.W.Sandford (2008). «STEP: Satellite Test of the Equivalence Principle» (<https://web.archive.org/web/20110928041608/http://www.sstd.rl.ac.uk/fundphys/step/>). Rutherford Appleton Laboratory. Archivado desde el original (<http://www.sstd.rl.ac.uk/fundphys/step/>) el 28 de septiembre de 2011. Consultado el 14 de octubre de 2011.
24. Paul S Wesson (2006). *Five-dimensional Physics* (<https://archive.org/details/fivedimensionalp0000wess>). World Scientific. p. [82 82](https://archive.org/details/fivedimensionalp0000wess/page/82_82) (https://archive.org/details/fivedimensionalp0000wess/page/82_82) (https://archive.org/details/fivedimensionalp0000wess/page/82_82). ISBN 978-981-256-661-4.
25. Haugen, Mark P.; C. Lämmerzahl (2001). «Principios de Equivalencia: Su papel en la física de la gravitación y los experimentos que los ponen a prueba». *Gyros. Lecture Notes in Physics* **562** (562, *Giroscopios, relojes e interferómetros...: Probando la gravedad relativista en el espacio*). pp. 195-212. Bibcode:2001LNP...562..195H (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2001LNP...562..195H>). S2CID 15430387 (<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15430387>). arXiv:gr-qc/0103067 (<https://arxiv.org/abs/gr-qc/0103067>). doi:10.1007/3-540-40988-2_10 (https://dx.doi.org/10.1007%2F3-540-40988-2_10).
26. «Detectan por primera vez las ondas gravitacionales que predijo Einstein» (<http://www.elmundo.es/ciencia/2016/02/11/56bba0d7ca4741cc0b8b4608.html>). *elmundo.es*. Consultado el 17 de mayo de 2016.
27. «LIGO Detected Gravitational Waves from Black Holes» (<https://www.ligo.caltech.edu/detection>). *elmundo.es* (en inglés). Consultado el 6 de junio de 2016.




Bibliografía

- Halliday, David; Robert Resnick; Kenneth S. Krane (2001). *Physics v. 1* (en inglés). Nueva York: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-32057-9.
- Serway, Raymond A.; Jewett, John W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers* (<https://archive.org/details/physicsscienyv2p00serw>) (en inglés) (6.^a edición). Brooks/Cole. ISBN 0-534-

40842-7.

- Tipler, Paul Allen; Gene Mosca (2004). *Physics for Scientists and Engineers: Mechanics, Oscillations and Waves, Thermodynamics* (https://archive.org/details/physicsforscient00tipl_721) (en inglés) (5.ª edición). W.H. Freeman & Company. p. 650 (https://archive.org/details/physicsforscient00tipl_721/page/n648). ISBN 0-7167-0809-4.
- Wald, Robert M. (1994). *Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics* (http://books.google.com.ar/books?id=lud7eyDxT1AC&printsec=frontcover&client=firefox-a&source=gbs_v2_summary_r&cad=0) (en inglés). Chicago University Press. p. 205. ISBN 0-226-87027-8.
- Wald, Robert M. (1984). *General Relativity* (<https://archive.org/details/generalrelativit0000wald/page/491>) (en inglés) (12.ª edición). Chicago University Press. p. 491 (<https://archive.org/details/generalrelativit0000wald/page/491>). ISBN 0-226-87033-2.

Enlaces externos

-  Wikcionario tiene definiciones y otra información sobre **gravedad**.
-  Wikimedia Commons alberga una categoría multimedia sobre **Gravedad**.
-  Wikiquote alberga frases célebres de o sobre **Gravedad**.
- Medida de la constante G de la Gravitación Universal, en sc.ehu.es (<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/constante/constante.htm>) (consultado el 4 de abril de 2009).
- Los secretos de la gravedad (<http://www.astronoo.com/es/articulos/gravedad.html>)

Obtenido de «<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Gravedad&oldid=155525193>»

▪