

## INDICE

### LEY DE GRAVEDAD

- 1) ACELERACIÓN
- 2) FUERZA DE GRAVEDAD (EINSTEIN)
- 3) FUERZA CENTRIPETA

#### **Ley de la Gravedad**

La contribución más específica de Newton a la descripción de las fuerzas de la naturaleza fue la explicación de la fuerza de la gravedad. En la actualidad los científicos saben que sólo hay otras tres fuerzas, además de la gravedad, que originan todas las propiedades y actividades observadas en el Universo: el electromagnetismo, la llamada interacción nuclear fuerte (que mantiene unidos los protones y neutrones en los núcleos atómicos) y la interacción nuclear débil (o interacción débil) entre algunas de las partículas elementales, que explica el fenómeno de la radiactividad (*véase Fuerzas fundamentales*). La comprensión del concepto de fuerza se remonta a la ley de la gravitación universal, que reconocía que todas las partículas materiales, y los cuerpos formados por estas partículas, tienen una propiedad denominada masa gravitacional. Esta propiedad hace que dos partículas cualesquiera ejerzan entre sí una fuerza atractiva (a lo largo de la línea que las une) directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Esta fuerza gravitatoria rige el movimiento de los planetas alrededor del Sol y de los objetos en el campo gravitatorio terrestre; también es responsable del colapso gravitacional que, según se cree, constituye el estado final del ciclo vital de las estrellas masivas y es la causa de muchos fenómenos astrofísicos. *Véase Agujero negro; Estrella.*

Una de las observaciones más importantes de la física es que la masa gravitacional de un cuerpo (que es el origen de la fuerza gravitatoria que existe entre el cuerpo y otros cuerpos) es igual a su masa inercial, la propiedad que determina el movimiento del cuerpo en respuesta a cualquier fuerza ejercida sobre él (*véase Inercia*). Esta equivalencia, confirmada experimentalmente con gran precisión (se ha demostrado que, en caso de existir alguna diferencia entre ambas masas, es menor de una parte en 10<sup>13</sup>), lleva implícita el principio de proporcionalidad: cuando un cuerpo tiene una masa gravitacional dos veces mayor que otro, su masa inercial también es dos veces mayor.

Esto explica la observación de Galileo realizada con anterioridad a la formulación de las leyes de Newton de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración independientemente de su masa: aunque los cuerpos más pesados experimentan una fuerza gravitatoria mayor, su mayor masa inercial disminuye en un factor igual a la aceleración por unidad de fuerza, por lo que la aceleración total es la misma que en un cuerpo más ligero.

Sin embargo, el significado pleno de esta equivalencia entre las masas gravitacional e inercial no se apreció hasta que Albert Einstein enunció la teoría de la relatividad general. Einstein se dio cuenta de que esta equivalencia tenía una implicación adicional: la equivalencia de un campo gravitatorio y un sistema de referencia acelerado (*véase la sección *La física moderna: Relatividad*, en este mismo artículo*).

La fuerza gravitatoria es la más débil de las cuatro fuerzas de la naturaleza. Por ejemplo, la fuerza gravitatoria entre dos protones (una de las partículas elementales más pesadas) es 10<sup>36</sup> veces menos intensa que la fuerza

electrostática entre ellos, sea cual sea la distancia que los separe. En el caso de dos protones situados en el núcleo de un átomo, la fuerza electrostática de repulsión es a su vez mucho menor que la interacción nuclear fuerte. El que la gravedad sea la fuerza dominante a escala macroscópica se debe a dos hechos: 1) según se sabe, sólo existe un tipo de masa, por lo que sólo existe un tipo de fuerza gravitacional, siempre atractiva; esto hace que las fuerzas gravitacionales de las numerosísimas partículas elementales que componen un cuerpo como la Tierra se sumen, con lo que la fuerza total resulta muy grande. 2) Las fuerzas gravitacionales actúan a cualquier distancia, disminuyendo según el cuadrado de la separación entre los cuerpos.

En cambio, las cargas eléctricas de las partículas elementales, que originan las fuerzas electrostáticas y electromagnéticas, pueden ser positivas o negativas. Las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen. Los cuerpos formados por muchas partículas tienden a ser eléctricamente neutros, y las fuerzas eléctricas ejercidas por las partículas, aunque tienen un alcance infinito al igual que la fuerza de gravedad, se cancelan mutuamente. Por su parte, las interacciones nucleares, tanto la fuerte como la débil, tienen un alcance extremadamente corto, y apenas son apreciables a distancias mayores de una billonésima de centímetro.

**NOTA:** A pesar de su importancia macroscópica, la fuerza de la gravedad es tan débil que un cuerpo tiene que poseer una masa enorme para que su influencia sobre otro cuerpo resulte apreciable. Por eso, la ley de la gravitación universal se dedujo de las observaciones del movimiento de los planetas mucho antes de que pudiera comprobarse de forma experimental. Esto sucedió en 1771, cuando el físico y químico británico Henry Cavendish confirmó la ley utilizando grandes esferas de plomo para atraer pequeñas masas unidas a un péndulo de torsión. A partir de esas medidas, Cavendish también dedujo la masa y la densidad de la Tierra.

## ACELERACIÓN

**Aceleración**, se conoce también como aceleración lineal, y es la variación de la velocidad de un objeto por unidad de tiempo. La velocidad se define como vector, es decir, tiene módulo (magnitud), dirección y sentido. De ello se deduce que un objeto se acelera si cambia su celeridad (la magnitud de la velocidad), su dirección de movimiento, o ambas cosas. Si se suelta un objeto y se deja caer libremente, resulta acelerado hacia abajo. Si se ata un objeto a una cuerda y se le hace girar en círculo por encima de la cabeza con celeridad constante, el objeto también experimenta una aceleración uniforme; en este caso, la aceleración tiene la misma dirección que la cuerda y está dirigida hacia la mano de la persona.

Cuando la celeridad de un objeto disminuye, se dice que decelera. La deceleración es una aceleración negativa.

Un objeto sólo se acelera si se le aplica una fuerza. Según la segunda ley del movimiento de Newton, el cambio de velocidad es directamente proporcional a la fuerza aplicada (*véase Mecánica*). Un cuerpo que cae se acelera debido a la fuerza de la gravedad.

La aceleración angular es diferente de la aceleración lineal. La velocidad angular de un cuerpo que gira es la variación del ángulo descrito en su rotación en torno a un eje determinado por unidad de tiempo. Una aceleración angular es un cambio de la velocidad angular, es decir, un cambio en la tasa de rotación o en la dirección del eje.

## FUERZA DE GRAVEDAD (EINSTEIN)

En el caso de la gravitación, se podría señalar el hecho de que la teoría newtoniana hace uso de la «acción a distancia», es decir, de una fuerza gravitatoria que actúa instantáneamente, mientras que en la teoría einsteniana la interacción gravitatoria se propaga a la velocidad de la luz, al igual que la interacción electromagnética. En la teoría no relativista de Newton, el espacio y el tiempo se consideran separados y absolutos, y la gravedad no está relacionada en forma alguna con la geometría; por su parte, en la teoría de

Einstein, el espacio y el tiempo se confunden (como ocurre siempre en la física relativista) y la gravedad se halla íntimamente relacionada con la geometría del espacio–tiempo. La relatividad general, a diferencia de la gravitación newtoniana, está fundamentada en el principio de equivalencia: es imposible distinguir localmente entre un campo gravitatorio y un sistema de referencia uniformemente acelerado (como un ascensor). Lo único que un observador puede percibir o medir localmente es la diferencia entre su aceleración propia y la aceleración local debida a la gravedad.

La interpretación basada en el cambio de paradigma se centra en las profundas diferencias filosóficas y de lenguaje entre la teoría antigua y la nueva. Kuhn no subraya el hecho (aunque, por supuesto, lo menciona) de que la vieja teoría puede proporcionar una aproximación suficientemente válida para realizar cálculos y predicciones dentro del dominio para el que fue desarrollada (en este caso sería el límite de velocidades relativas muy bajas). Sin embargo, me gustaría destacar esta característica, pues en la competencia entre esquemas en el marco de la empresa científica, el triunfo de un esquema sobre otro no implica necesariamente que el anterior sea abandonado y olvidado. De hecho, al final puede ser utilizado con mucha mayor frecuencia que su más preciso y sofisticado sucesor. Eso es lo que pasa ciertamente con las mecánicas newtoniana y einsteniana restringidas al sistema solar. La victoria en la pugna entre teorías científicas competidoras puede ser más una cuestión de degradación de la teoría antigua y promoción de la nueva que de muerte de la teoría desbancada. (Ni que decir tiene que a menudo la vieja teoría pierde todo valor, y entonces sólo los historiadores de la ciencia se molestan en discutir sobre ella.)

### La ecuación de Einstein para la relatividad general

$$G_{\mu\nu} = 8 \pi G T_{\mu\nu}$$

representa para la gravitación lo que las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo. El lado izquierdo de la ecuación hace referencia a la curvatura del espacio–tiempo (al campo gravitatorio), y el lado derecho a la densidad de energía, etc., de todo lo que no es campo gravitatorio. Expresa en una única y pequeña fórmula las características universales de los campos gravitatorios en todo el cosmos. A partir de las masas, las posiciones y las velocidades de todas las partículas materiales, puede calcularse el campo gravitatorio (y por lo tanto el efecto de la gravitación sobre el movimiento de un cuerpo de prueba) sea cual sea el lugar y momento. Es éste un esquema particularmente poderoso, que resume en un breve mensaje las propiedades generales de la gravedad en cualquier lugar.

Un crítico podría exigir de nuevo que incluyéramos como parte del esquema no sólo la fórmula, sino también una explicación de los símbolos que la componen. Mi padre, un abogado culto que batalló por comprender la teoría de Einstein, solía decir: «Mira qué simple y hermosa es esta teoría, pero ¿qué significan  $T_{\mu\nu}$  y  $G_{\mu\nu}$ ?». Como en el caso del electromagnetismo, aunque se tenga que incluir todo un curso de matemáticas dentro del esquema, la ecuación de Einstein seguirá siendo un prodigo de compresión, puesto que describe el comportamiento de todos los campos gravitatorios dondequiera que se encuentren. El esquema será todavía extraordinariamente pequeño, y su complejidad muy baja. La teoría de la relatividad general de Einstein para la gravedad es, pues, simple.

### FUERZA CENTRÍPETA

Fuerza dirigida hacia un centro, que hace que un objeto se desplace en una trayectoria circular. Por ejemplo, supongamos que atamos una pelota a una cuerda y la hacemos girar en círculo a velocidad constante. La pelota se mueve en una trayectoria circular porque la cuerda ejerce sobre ella una fuerza centrípeta. Según la primera ley del movimiento de Newton, un objeto en movimiento se desplazará en línea recta si no está sometido a una fuerza (*véase* Mecánica). Si se cortara la cuerda de repente, la pelota dejaría de estar sometida a la fuerza centrípeta y seguiría avanzando en línea recta en dirección tangente a la trayectoria circular (si no tenemos en cuenta la fuerza de la gravedad). En otro ejemplo, consideraremos una persona montada en un carrusel. Cuando gira, hay que agarrarse para no caerse. En el punto en que la persona está en contacto con el

carrusel, se aplica una fuerza centrípeta que hace que la persona se desplace en una trayectoria circular. Si la persona se soltara, saldría despedida siguiendo una línea recta (tampoco aquí consideramos la fuerza de la gravedad).

En general, la fuerza centrípeta que debe aplicarse a un objeto de masa  $m$  para que se mueva en una trayectoria circular de radio  $r$  con una velocidad constante  $v$  es

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

Cuando se aplica una fuerza centrípeta, la tercera ley de Newton implica que en algún lugar debe actuar una fuerza de reacción de igual magnitud y sentido opuesto. En el caso de la pelota que gira con una cuerda, la reacción es una fuerza dirigida hacia el exterior, o *centrífuga*, experimentada por la mano que sujetla la cuerda. En el caso del carrusel, el cuerpo de la persona presiona hacia fuera *contra* el asiento como reacción a la fuerza centrípeta ejercida *por* el asiento.

La idea de fuerza centrífuga puede generar confusión. Frecuentemente se piensa que sobre un objeto que se mueve en una trayectoria curva actúa una fuerza que tiende a desplazarlo hacia fuera, alejándolo del centro, y que esta fuerza equilibra la fuerza centrípeta que tira de él hacia dentro. Pero, en realidad, no hay ninguna fuerza centrífuga que actúe *sobre el objeto*, con lo que la fuerza centrípeta *no* está equilibrada y el objeto no tiende a moverse *hacia fuera*. Si se suprimiera de pronto la fuerza centrípeta (una vez más, prescindiendo de la gravedad), el objeto no se aceleraría, sino que seguiría moviéndose en una línea recta tangente, lo que demuestra que sobre el objeto no actúa ninguna otra fuerza.

Sin embargo, desde el punto de vista del objeto en movimiento, puede parecer que existe dicha fuerza centrífuga. Las personas que giran en un carrusel sienten una fuerza que tiende a alejarlas del centro. Al contrario que una fuerza real, que se debe a la influencia de un objeto o un campo, esta fuerza centrífuga es una fuerza *ficticia*.

Las fuerzas ficticias sólo aparecen cuando se examina un sistema desde un marco de referencia acelerado.

Si se examina el mismo sistema desde un marco de referencia no acelerado, todas las fuerzas ficticias desaparecen. Las personas de un carrusel que gira sienten una fuerza centrífuga solamente porque el carrusel es un marco de referencia acelerado. Si el mismo sistema se analiza desde el suelo, que es un marco de referencia no acelerado, no existe fuerza centrífuga alguna. El individuo estacionario sólo observaría la fuerza centrípeta que hace que las personas que giran en el carrusel sigan moviéndose en una trayectoria circular. En general, las fuerzas reales aparecen independientemente de que el marco de referencia empleado sea acelerado o no; las fuerzas ficticias sólo aparecen en un marco de referencia acelerado.