

50

COSAS QUE
HAY QUE
SABER SOBRE

FÍSICA



JOANNE BAKER

Ariel

Joanne Baker

50 COSAS QUE HAY
QUE SABER SOBRE
FÍSICA

Traducción de
Blanca Ribera de Madariaga

Ariel CLAVES 

Introducción

Cuando hablé a mis amigos de este libro, ellos bromearon diciendo que lo primero que hay que saber de la física es que es muy difícil. A pesar de todo, utilizamos la física todos los días. Cuando nos miramos en un espejo o nos ponemos unas gafas utilizamos la física de la óptica. Cuando programamos un despertador nos movemos en el tiempo; cuando observamos un mapa navegamos por el espacio geométrico. Nuestros teléfonos móviles nos conectan por medio de invisibles hilos electromagnéticos con satélites que giran por encima de nuestras cabezas. Pero la física no es sólo tecnología. Sin ella no habría medio día, ni arco iris, ni diamantes. Incluso la sangre que fluye por nuestras arterias se rige por las leyes de la física, la ciencia del mundo físico.

La física moderna está llena de sorpresas. La física cuántica revolucionó totalmente nuestro mundo al cuestionar el mismísimo concepto de la existencia de un objeto. La cosmología se pregunta qué es el universo. ¿Cómo se originó y por qué estamos aquí? Nuestro universo ¿es especial o de algún modo inevitable? Al escudriñar el interior de los átomos, los físicos descubrieron un mundo fantasmal oculto de partículas elementales. Incluso la mesa de caoba más sólida está compuesta en su mayor parte por espacio vacío, y sus átomos se mantienen unidos por un entramado de fuerzas nucleares. La física surgió de la filosofía y, en cierto modo, ahora regresa a ella al ofrecer nuevas e inesperadas perspectivas del mundo que sobrepasan nuestras experiencias cotidianas.

Sin embargo, la física no se limita a un conjunto de ideas imaginativas. Tiene sus raíces en los hechos y la experimentación. El método científico actualiza continuamente las leyes de la física, igual que el software de un ordenador, eliminando virus y añadiendo nuevos módulos. Si la evidencia lo requiere, se producen importantes cambios de ideas, pero su aceptación tarda un tiempo. Para que la idea de Copérnico de que la Tierra gira alrededor del Sol fuera aceptada de forma generalizada se tardó más de una generación, pero el ritmo se ha acelerado, y la física cuántica y la relatividad se integraron en la física en el plazo de una década. Así pues, incluso las leyes físicas de mayor éxito se cuestionan sin cesar.

Esta obra le ofrece un rápido recorrido por el mundo de la física, desde los conceptos básicos como la gravedad, la luz y la energía a través de las ideas modernas de la teoría cuántica, el caos y la energía oscura. Espero que, como una buena guía turística, les tiene para desear saber más. La física no es sólo fundamental: es *divertida*.

01 Principio de Mach

Un niño montado en un tiovivo es atraído hacia el exterior por las estrellas lejanas. Éste es el principio de Mach: «la masa de allí influye sobre la inercia de aquí». A través de la gravedad, los objetos lejanos afectan al movimiento de las cosas cercanas, y a su forma de girar. Pero ¿por qué sucede esto y cómo se puede afirmar si una cosa se mueve o no?

Si alguna vez ha estado sentado en una estación y ha visto a través de la ventana que el tren de al lado se aleja de usted, sabrá que a veces resulta difícil precisar si es su propio tren el que se marcha o el otro el que llega. ¿Hay alguna forma de determinar con seguridad cuál de los dos se está moviendo?

En el siglo XIX, Ernst Mach, un filósofo y físico austríaco, trató de resolver esta cuestión. Siguió los pasos del gran Isaac Newton que, a diferencia de Mach, creía que el espacio era un fondo absoluto. Igual que el papel milimetrado, el espacio de Newton contenía un conjunto de coordenadas grabadas y él dibujaba todos los movimientos en relación con esa cuadrícula. Sin embargo, Mach discrepaba de él aduciendo que el movimiento sólo tenía significado al medirse con relación a otro objeto, no a la cuadrícula. ¿Qué significa moverse si no es con relación a alguna otra cosa? En este sentido, Mach, influenciado por las ideas previas del competidor de Newton, Gottfried Leibniz, fue un precursor de Albert Einstein cuando escogió creer que sólo tenía sentido el movimiento relativo. Mach argumentaba que si una pelota rueda de la misma manera ya se encuentre en Francia o en Australia, la cuadrícula del espacio es irrelevante. Lo único que posiblemente pueda afectar al movimiento de la pelota es la gravedad. En la Luna, la pelota rodaría de una forma diferente porque la fuerza gravitatoria ejercida sobre la masa de la pelota es más débil allí. Como todos los objetos del universo ejercen una fuerza gravitatoria sobre los demás, cada objeto sentirá la presencia de los otros a través de sus

Cronología

aprox. 335 a.C.

Aristóteles afirma que los objetos se mueven debido a la acción de fuerzas

1640 d.C.

Galileo formula el principio de la inercia

« El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece homogéneo e inmóvil. »

Isaac Newton, 1687

atracciones mutuas. Así que el movimiento dependerá, en último término, de la distribución de la materia, o de su masa, no de las propiedades del propio espacio.

Masa ¿Qué es exactamente la masa? Es una medida de la cantidad de materia que contiene un objeto. La masa de un trozo de metal sería igual a la suma de la masa de todos sus átomos. Existe una sutil diferencia entre masa y peso. El peso es una medida de la fuerza de la gravedad que atrae una masa hacia abajo. Un astronauta pesa menos en la Luna que en la Tierra porque la fuerza gravitatoria que ejerce la Luna, que es más pequeña, es menor. Pero la masa del astronauta es la misma: el número de átomos que contiene no ha cambiado. Según Albert Einstein, que demostró que la energía y la masa son intercambiables, la masa puede convertirse en energía pura. Así pues, la masa es, en última instancia, energía.

Inercia La inercia, que recibe su nombre del vocablo latino para la «indolencia», es muy similar a la masa, pero nos informa sobre la dificultad de mover un objeto aplicando una fuerza. Un objeto dotado de una gran inercia se resiste al movimiento. Incluso en el espacio exterior, se necesita una gran fuerza para mover un objeto de gran masa. Un asteroide rocoso gigante en su trayectoria de colisión con la Tierra necesita un enorme impulso para desviarse, ya sea éste generado por una explosión nuclear o por una fuerza menor aplicada durante más tiempo. Una pequeña nave, con menos inercia que el asteroide, podría ser maniobrada con facilidad mediante pequeños motores a reacción.

El astrónomo italiano Galileo Galilei propuso el principio de la inercia en el siglo XVII: si se deja solo a un objeto y no se le aplica ninguna fuerza, su estado de movimiento es inalterable. Si se mueve, lo continuará haciendo a la misma velocidad y en la misma dirección. Si está inmóvil, permanecerá así. Newton depuró esta idea para elaborar su primera ley del movimiento.

1687

Newton publica su argumento del cubo

1893

Mach publica *La ciencia de la mecánica*

1905

Einstein publica la teoría especial de la relatividad

El cubo de Newton Newton también codificó la gravedad. Observó que las masas se atraían unas a otras. Una manzana cae al suelo desde el árbol porque es atraída por la masa de la Tierra. Del mismo modo, la Tierra es atraída por la masa de la manzana, pero tendríamos verdaderas dificultades para medir el desplazamiento microscópico de la Tierra entera hacia la manzana.

Newton demostró que la fuerza de la gravedad decae rápidamente con la distancia, así que la fuerza gravitatoria terrestre es mucho menor si flotamos a una gran altura que si nos encontramos en su superficie. No obstante, continuaríamos notando la atracción terrestre aunque en menor medida. Cuanto más nos alejásemos, más débil sería, pero continuaría atrayendo nuestro movimiento. De hecho, todos los objetos del universo ejercen una pequeña fuerza gravitatoria que afecta a nuestro movimiento de un modo sutil.

Newton trató de comprender las relaciones entre objetos y movimiento imaginando un cubo de agua que daba vueltas. Al principio, cuando empezamos a girar el cubo, el agua permanece en reposo aunque el cubo se mueva. Después, el agua también empieza a girar. La superficie se hace cóncava y el líquido intenta rebasar los bordes del cubo, pero se mantiene en el interior gracias a la fuerza de confinamiento del cubo. Newton argumentaba que la rotación del agua sólo podía entenderse en el marco de referencia fijo del espacio absoluto, contra su cuadrícula. Simplemente observándolo se puede saber si el cubo gira, pues se aprecian las fuerzas que participan en él produciendo la superficie cóncava en el agua.

Siglos más tarde, Mach revisó este argumento. ¿Y si el cubo lleno de agua fuera la única cosa en el universo? ¿Cómo se podía saber que estaba girando? ¿No se podía saber también si el agua giraba en relación con el cubo? La única forma de encontrarle un sentido sería colocar otro objeto en el universo del cubo, por ejemplo, la pared de una habitación o una estrella distante. Entonces el cubo estaría girando sin lugar a dudas en relación a ellas. Pero sin la referencia de una habitación inmóvil y de las estrellas fijas, ¿quién podía decir si era el cubo o el agua lo que giraba? Cuando contemplamos el Sol y el arco estelar en el firmamento experimentamos la misma sensación. ¿Son las estrellas o la Tierra lo que se mueve? ¿Cómo podemos saberlo?

Según Mach y Leibniz, para que el movimiento tenga sentido para nosotros hacen falta objetos de referencia externos y, por lo tanto, la inercia como concepto carece de significado en un universo que cuente con un solo objeto. Por tanto, si el universo estuviera desprovisto de estrellas, nunca sabríamos si la Tierra se mueve. Las estrellas nos dicen que giramos en relación a ellas.

ERNST MACH (1838-1916)

Además de por el principio que lleva su nombre, el físico austríaco Ernst Mach es recordado por sus trabajos en el campo de la óptica y la acústica, la fisiología de la percepción sensorial, la filosofía de la ciencia y sobre todo por su investigación sobre la velocidad supersónica. En 1877 publicó un artículo de gran repercusión en el que describe cómo un proyectil que se mueve más rápido que la velocidad del sonido produce una onda de choque, parecida a una estela. Es esta onda de choque en el aire la que produce la explosión sónica de una nave supersónica. La relación de la velocidad del proyectil, o reactor, con la velocidad del sonido se denomina actualmente número de Mach, de tal modo que Mach 2 es el doble de la velocidad del sonido.

Las ideas de movimiento relativo frente a movimiento absoluto expresadas en el principio de Mach han inspirado a muchos físicos desde entonces, por ejemplo a Einstein (que fue quien en realidad acuñó el término «principio de Mach»). Einstein tomó la idea de que todo movimiento es relativo para desarrollar sus teorías de la relatividad especial y general. También resolvió uno de los problemas principales planteados por las ideas de Mach: la rotación y la aceleración debían crear fuerzas adicionales, pero ¿dónde estaban? Einstein demostró que si todo en el universo girara en relación con la Tierra, deberíamos experimentar en efecto una pequeña fuerza que haría temblar al planeta de una forma determinada.

La naturaleza del espacio ha desconcertado a los científicos durante milenios. Los físicos creen que la partícula moderna es un caldero en ebullición de partículas subatómicas que se crean y se destruyen continuamente. La masa, la inercia, las fuerzas y el movimiento quizá no sean, al fin y al cabo, más que manifestaciones de una burbujeante sopa cuántica.

**La idea en síntesis:
la masa influye
en el movimiento**

02 Las leyes del movimiento de Newton

Isaac Newton fue uno de los científicos más relevantes, polémicos e influyentes de todos los tiempos. Contribuyó a inventar el cálculo, explicó la gravedad e identificó los colores que componían la luz blanca. Sus tres leyes del movimiento explican por qué una pelota de golf sigue una trayectoria curva, por qué nos vemos empujados hacia el lado externo de un coche que gira y por qué notamos la fuerza a través de un bate de béisbol al golpear la pelota.

Aunque en época de Newton las motos aún estaban por inventarse, sus tres leyes del movimiento explican cómo sube un piloto acrobático por la vertical «pared de la muerte» y cómo corren los ciclistas olímpicos por las pistas inclinadas.

Newton, que vivió en el siglo xvii, se considera uno de los intelectos más destacados de la ciencia. Su carácter altamente inquisitivo le llevó a comprender algunos de los aspectos en apariencia más simples y sin embargo profundos de nuestro mundo, tales como la razón por la que se curva una pelota lanzada al espacio, por qué las cosas caen hacia abajo y no hacia arriba, y cómo se mueven los planetas alrededor del Sol.

Cuando no era más que un estudiante corriente en Cambridge en la década de 1660, Newton se inició en la lectura de las grandes obras de la matemática. A través de ellas se alejó del derecho civil para aproximarse a las leyes de la física. Más tarde, encerrado en su casa durante un período sabático cuando la universidad cerró por un brote de peste, Newton dio los primeros pasos para desarrollar sus tres leyes del movimiento.

Cronología

aprox. 350 a.C.

Aristóteles propone en *Física* que los movimientos se deben a cambios continuos

1640 d.C.

Galileo formula el principio de la inercia

Las leyes del movimiento de Newton

Primera ley. Los cuerpos se mueven en línea recta a velocidad constante, o permanecen en reposo, a menos que intervenga una fuerza para cambiar su velocidad o dirección.

Segunda ley. Las fuerzas producen aceleraciones que son proporcionales a la masa de un cuerpo ($F = ma$).

Tercera ley. Toda acción de una fuerza produce una reacción total y opuesta.

Fuerzas Tomando prestado el principio de la inercia de Galileo, Newton formuló su primera ley. Ésta afirma que los cuerpos no se mueven ni cambian de velocidad a menos que intervenga alguna fuerza. Los cuerpos inmóviles continuarán en este estado a menos que se les aplique una fuerza; los cuerpos que se mueven a velocidad constante continuarán haciéndolo a esa velocidad a menos que actúe sobre ellos alguna fuerza. Una fuerza (por ejemplo, un empujón) proporciona una aceleración que altera la velocidad del objeto. La aceleración es un cambio en la velocidad durante un cierto tiempo.

Esto resulta difícil de apreciar por medio de nuestra propia experiencia. Si lanzamos un disco de hockey, éste se deslizará sobre el hielo pero finalmente disminuirá de velocidad debido a la fricción con el hielo. La fricción produce una fuerza que decelera el disco. Pero la primera ley de Newton sólo se observa en el caso especial de que no se produzca ninguna fricción. Lo más cerca que podemos encontrarnos de este caso es en el espacio, pero incluso allí actúan fuerzas como la gravedad. Sin embargo, esta primera ley nos ofrece un criterio básico a partir del cual podemos entender las fuerzas y el movimiento.

Aceleración La segunda ley del movimiento de Newton establece la relación entre la magnitud de la fuerza y la aceleración que produce. La fuerza que se necesita para acelerar un objeto es proporcional a su masa. Los objetos pesados —o mejor dicho, los que tienen una inercia considerable— requieren una fuerza mayor para acelerarse que los objetos ligeros. De modo que para que un coche acelere de 0 (reposo) a 100 kilómetros por hora en un minuto haría falta una fuerza

1687

Newton publica los *Principia*

1905

Einstein publica la teoría especial de la relatividad

igual a la masa del coche por el incremento de la velocidad por unidad de tiempo.

La segunda ley de Newton se expresa algebraicamente como « $F = ma$ », la fuerza (F) es igual a la masa (m) por la aceleración (a). O lo que es lo mismo, si damos la vuelta a esta definición, la segunda ley afirma que la aceleración es igual a fuerza por unidad de masa. Para una aceleración constante, fuerza por unidad de masa también es invariable. Así pues, para mover un kilogramo de masa hace falta la misma cantidad de fuerza, ya sea éste parte de un cuerpo grande o pequeño. Esto explica el experimento imaginario de Galileo en el que se pregunta: si los tiramos a la vez, ¿qué llegará antes al suelo, una bala de cañón o una pluma? Al visualizarlo, nos parece que la bala de cañón llegará antes que la pluma flotando. Pero esto se debe simplemente a la resistencia del aire que mueve la pluma. Si no hubiera aire, ambas caerían al mismo ritmo y llegarían al suelo a la vez. Experimentan la misma aceleración, la gravedad, así que caen una junto a otra. Los astronautas del *Apolo 15* mostraron en 1971 que en la Luna, donde no existe una atmósfera que la haga disminuir de velocidad, la pluma cae al mismo ritmo que el pesado martillo de un geólogo.

Acción es igual a reacción La tercera ley de Newton dice que cualquier fuerza aplicada a un cuerpo produce una fuerza igual y opuesta sobre ese cuerpo. En otras palabras, para cada acción hay una reacción. La fuerza opuesta se percibe como un retroceso. Si una patinadora empuja a otra, ésta también patinará hacia atrás cuando colisione con el cuerpo de su compañera. Un tirador percibe el retroceso del rifle contra su hombro al disparar. La fuerza de retroceso es de magnitud igual a la que transmitiría originalmente el empujón o la bala. En las películas de crímenes, la víctima de un disparo muchas veces sale despedida hacia atrás a causa de la fuerza del balazo. Esto es un tanto engañoso. Si la fuerza fuera realmente tan grande, el tirador también sería lanzado hacia atrás por el retroceso del revólver. Aunque diéramos un salto hacia arriba para despegarnos del suelo, ejerceríamos una pequeña fuerza sobre la Tierra, pero como la masa terrestre es mucho mayor que la nuestra, apenas se nota.

Con estas tres leyes, más la de la gravedad, Newton explicaba el movimiento de prácticamente todos los objetos, desde las bellotas que caían hasta las balas que se disparan desde un cañón. Armado con estas tres ecuaciones podría haberse subido con total confianza a una rápida moto y acelerar hasta la pared de la muerte, si tal cosa hubiera existido en su tiempo. ¿Cuánto confiaba usted en las leyes de Newton? La primera ley dice que la moto y el motorista continuarían viajando en una dirección a una velocidad determinada. Pero para mantener la moto en movimiento en un círculo, de acuerdo con la segunda ley, hace falta una se-

ISAAC NEWTON (1643-1727)

Isaac Newton fue el primer científico que mereció el honor de ser nombrado caballero en Gran Bretaña. Pese a ser «holgazán» y «distráido» en la escuela, y un estudiante corriente en la Universidad de Cambridge, Newton floreció repentinamente cuando la peste obligó a cerrar la universidad en el verano de 1665. De vuelta a su casa de Lincolnshire, Newton dedicó toda su atención a las matemáticas, la física y la astronomía, e incluso sentó las bases del cálculo. En esa época, elaboró una primera versión de sus tres leyes del movimiento y dedujo la ley de la inversa del cuadrado para la gravedad. Tras este notable estallido de ideas, Newton fue elegido para ocupar la Cátedra Lucasiana de Matemáticas en 1669 con tan sólo 27 años. Al centrar su atención en la óptica, Newton descubrió mediante un

prisma que la luz blanca estaba compuesta por un arco iris de colores, enzarzándose en una famosa disputa con Robert Hooke y Christiaan Huygens sobre este particular. Newton escribió dos obras importantes, *Philosophiæ naturalis Principia mathematica*, o *Principia*, y *Opticks*. Más adelante, Newton pasó a ser políticamente activo. Defendió la libertad académica cuando el rey Jacobo II trató de interferir en los nombramientos universitarios y entró en el Parlamento en 1689. Personaje contradictorio, por una parte deseoso de atraer la atención y por otra retraído y tratando de evitar las críticas, Newton utilizó su privilegiada posición para luchar enérgicamente contra sus enemigos científicos y continuó siendo una figura controvertida hasta su muerte.

gunda fuerza que cambie su dirección continuamente, en este caso aplicada por la pista a través de las ruedas. La fuerza requerida es igual a la masa de la moto y la del motorista multiplicada por su aceleración. La tercera ley explica la presión ejercida por la moto sobre la pista, al tiempo que se establece la fuerza de reacción. Ésta es la presión que mantiene unido al conductor acrobático a la pared inclinada, y si la moto va lo bastante rápido puede incluso correr por una pared vertical.

El conocimiento de las leyes de Newton es, incluso en la actualidad, prácticamente todo cuanto necesitamos para describir las fuerzas que intervienen al conducir un coche en una curva a toda velocidad o, Dios no lo quiera, al chocar contra él. En cambio, las leyes de Newton no se sostienen para los objetos que se mueven a una velocidad próxima a la de la luz o con masas muy ligeras. En estos casos extremos, la relatividad de Einstein y la ciencia de la mecánica cuántica tienen plena vigencia.

La idea en síntesis: el movimiento capturado

03 Las leyes de Kepler

Johannes Kepler buscaba patrones en casi todo. Escudriñando las tablas astronómicas que describían el movimiento serpenteante de Marte proyectado en el firmamento, descubrió las tres leyes que gobiernan las órbitas de los planetas. Kepler explicó que los planetas siguen órbitas elípticas y que los más distantes giran alrededor del Sol con mayor lentitud. Además de transformar la astronomía, las leyes de Kepler sentaron las bases para la ley de la gravedad de Newton.

En su trayectoria alrededor del Sol, los planetas que están más cerca de él giran más rápido que los que se encuentran más alejados. Mercurio gira alrededor del Sol exactamente en 80 días terrestres. Si Júpiter

se moviera a la misma velocidad tardaría unos 3,5 años terrestres en realizar una órbita completa cuando, en realidad, tarda 12. Mientras todos los planetas pasan uno junto a otro, cuando son observados desde la Tierra parece que algunos retroceden cuando la Tierra los sobrepasa. En la época de Kepler, estos movimientos «retrógrados» constituían un importante misterio. La resolución de este enigma dio a Kepler la idea de desarrollar sus tres leyes del movimiento planetario.

Patrones de polígonos El matemático alemán Johannes Kepler buscaba patrones en la naturaleza. Vivió a finales del siglo XVI y principios del XVII, una época en la que la astrología se tomaba muy en serio y la astronomía como ciencia física estaba aún en su primera infancia. A la hora de desvelar las leyes

«De pronto se me ocurrió que aquel pequeño guisante, hermoso y azul, era la Tierra. Levanté un pulgar y cerré un ojo, y mi pulgar tapó el planeta Tierra. No me sentí como un gigante. Me sentí muy, muy pequeño.»

Neil Armstrong, 1930

Cronología

aprox. 580 a.C.

Pitágoras expuso la teoría de las órbitas planetarias encerradas en esferas cristalinas perfectas

aprox. 150 d.C.

Ptolomeo registra el movimiento retrógrado y sugiere que los planetas se mueven en epiciclos

JOHANNES KEPLER (1571-1630)

A Johannes Kepler le interesó la astronomía desde pequeño: registró en su diario un cometa y un eclipse lunar antes de los diez años. Siendo profesor en Graz, Kepler desarrolló una teoría de la cosmología que fue publicada en el *Mysterium Cosmographicum* (*El sagrado misterio del cosmos*). Más tarde, trabajó como ayudante de Tycho Brahe, el astrónomo, en su observatorio a las afueras de Praga, heredando su puesto de matemático imperial en 1601. Allí Kepler preparó horóscopos para el emperador y analizó las tablas

astronómicas de Tycho, publicando sus teorías de las órbitas no circulares y la primera y segunda leyes del movimiento planetario, en *Astronomia Nova* (*Nueva Astronomía*). En 1620, la madre de Kepler, una curandera, fue acusada de brujería y encarcelada, y sólo obtuvo la libertad gracias a los esfuerzos legales de Kepler. Sin embargo, él logró continuar con su trabajo y la tercera ley del movimiento planetario fue publicada en *Harmonices Mundi* (*Armonía de los Mundos*).

de la naturaleza, las ideas religiosas y espirituales eran tan importantes como la observación. Kepler, un místico que creía que la estructura subyacente del universo se construía a partir de formas geométricas perfectas, dedicó su vida a tratar de descubrir los patrones imaginados de polígonos perfectos ocultos en las obras de la naturaleza.

La obra de Kepler se sucedió un siglo después de que el astrónomo polaco Nicolás Copérnico propusiera que el Sol es el centro del universo y que la Tierra gira alrededor de éste, y no al revés. Antes de eso, remontándonos al gran filósofo griego Ptolomeo, se creía que el Sol y las estrellas giraban alrededor de la Tierra, encerrados en esferas de cristal sólidas. Copérnico no se atrevió a publicar su radical idea en vida, por temor a que chocara con la doctrina de la Iglesia, dejando que su colega lo hiciera justo antes de su muerte. Sin embargo, Copérnico causó una gran conmoción al sugerir que la Tierra no era el centro del universo, lo cual implicaba que los seres humanos no eran los más importantes de éste, tal y como propiciaba un dios antropocéntrico.

Kepler adoptó la idea heliocéntrica de Copérnico, pero aun así continuó pensando que los planetas giraban alrededor del Sol siguiendo ór-

1543

Copérnico sugiere que los planetas giran alrededor del Sol

1576

Tycho Brahe traza un mapa de la posición de los planetas

1609

Kepler descubre que los planetas se mueven siguiendo órbitas elípticas

1687

Newton explica las leyes de Kepler con su ley de la gravedad

«Sólo somos una raza avanzada de monos en un planeta menor de una estrella promedio. Pero podemos entender el universo. Eso nos hace muy especiales.»

Stephen Hawking, 1989

distantes estrellas, parece que vayan errantes por el firmamento. Noche tras noche siguen un camino por el cielo. Sin embargo, de vez en cuando, su trayectoria se invierte y realizan unos pequeños bucles hacia atrás. Se creía que estos movimientos retrógrados constituían malos augurios. En el modelo ptolemaico del movimiento planetario, este comportamiento era imposible de comprender, y por ello los astrónomos añadían «epiciclos» o bucles adicionales a la órbita de un planeta que imitaba este movimiento. Pero los epiciclos no funcionaban demasiado bien. El universo copernicano centrado en el Sol precisaba de

menos epiciclos que el posterior modelo geocéntrico, pero seguía sin poder explicar los detalles exactos.

Al tratar de desarrollar un modelo de las órbitas planetarias que respaldara sus ideas geométricas, Kepler utilizó los datos más exactos de que disponía, unas intrincadas tablas de los movimientos planetarios en el cielo, laboriosamente preparadas por Tycho Brahe. En esas interminables columnas de números Kepler descubrió patrones que sugerían las tres leyes.

Kepler realizó su gran descubrimiento desenmarañando los movimientos retrógrados de Marte. Reconoció que los bucles hacia atrás encajarían si las órbitas planetarias alrede-

dor del Sol fueran elípticas y no circulares como se creía. Irónicamente esto significaba que la naturaleza no seguía formas perfectas. Kepler debió de sentirse encantado con su éxito al lograr encajar las órbitas, aunque también conmocionado cuando toda su filosofía de la geometría pura resultó estar equivocada.

Leyes de Kepler

Primera ley. Las órbitas planetarias son elípticas, y el Sol está situado en uno de los focos.

Segunda ley. Un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales mientras gira alrededor del Sol.

Tercera ley. Los períodos orbitales aumentan de forma escalada con el tamaño de las elipses, de tal modo que el cuadrado del período orbital es proporcional al cubo de la distancia media con el Sol.

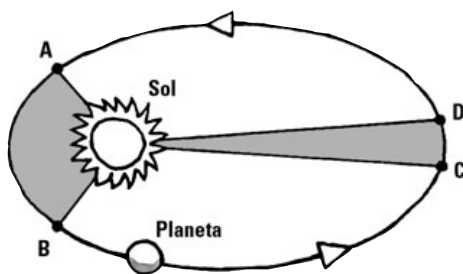
Órbitas En la primera ley, Kepler observó que los planetas se movían siguiendo órbitas elípticas con el Sol en uno de los dos focos de la elipse.

La segunda ley de Kepler describe lo rápidamente que se mueve un planeta alrededor de su órbita. En su trayectoria, el planeta barre un segmento de área igual en un tiempo igual. El segmento se mide utilizando el ángulo formado por el Sol y las dos posiciones del planeta (AB o CD).

Como las órbitas son elípticas, cuando el planeta se acerca al Sol tiene que cubrir una larga distancia para barrer la misma área que cuando está más lejos. Así que el planeta se mueve con mayor rapidez cuando está cerca del Sol que cuando está lejos. La segunda ley de Kepler vincula la velocidad con la distancia del Sol. Este comportamiento se debe en último término a la gravedad que acelera el planeta cuando está cerca de la masa solar.

La tercera ley de Kepler nos informa de cómo aumentan de forma escalada los períodos orbitales para las elipses de diferentes tamaños en un rango de distancias del Sol. Afirma que el cuadrado de los períodos orbitales es inversamente proporcional al cubo del eje más largo de la órbita elíptica. Cuanto mayor es una órbita elíptica, más lento es el tiempo que tarda en completar una órbita. Un planeta cuya órbita está el doble de lejos del Sol que la Tierra tardará ocho veces más en realizarla. Así pues, los planetas que están más alejados del Sol giran más lentamente que los más cercanos. Marte tarda casi 2 años terrestres en girar alrededor del Sol, Saturno 29 años y Neptuno 165 años.

Con estas tres leyes, Kepler describió todas las órbitas planetarias de nuestro sistema solar. Sus leyes se aplican igualmente a cualquier cuerpo que gire alrededor de otro, desde cometas, asteroides y lunas de nuestro sistema solar hasta planetas que giran alrededor de otras estrellas. Kepler logró unificar con éxito los principios en leyes geométricas, aunque no sabía por qué se sostenían esas leyes. Creía que se originaban en los patrones geométricos subyacentes de la naturaleza. Estas leyes no se unificaron en una teoría universal de la gravedad hasta Newton.



« Medí los cielos y ahora mido las sombras, el espíritu estaba en el cielo, el cuerpo reposa en la tierra. »

Epitafio de Kepler, 1630

La idea en síntesis: ley de los mundos

04 La ley de la gravedad de Newton

Isaac Newton dio un paso de gigante cuando estableció la relación entre el movimiento de las balas de cañón y el de la fruta que caía de los árboles con los movimientos de los planetas. Su ley de la gravedad continúa siendo una de las ideas más poderosas de la física, que explica en gran medida el comportamiento físico de nuestro mundo. Newton sostenía que todos los cuerpos se atraen entre sí por medio de la fuerza de la gravedad, y la intensidad de esa fuerza decae con el cuadrado de la distancia.

«**La gravedad no es un hábito fácil de dejar.**»

Terry Pratchett, 1992

Se cuenta que la idea de la gravedad se le ocurrió a Isaac Newton cuando observó una manzana que caía de un árbol. No sabemos con seguridad si esto es cierto o no, pero Newton hizo un alarde de imaginación para extender su concepción del movimiento terrestre al celeste para desarrollar su ley de la gravedad.

Newton percibía que los objetos eran atraídos hacia el suelo por alguna fuerza aceleradora (véase pág. 12). Si las manzanas caen de los árboles, ¿qué ocurriría si el árbol fuera aún más alto? ¿Y si llegara hasta la Luna? ¿Por qué no cae la Luna a la Tierra como una manzana?

Todo cae La respuesta de Newton se fundamentaba en primer lugar en sus leyes del movimiento que vinculaban fuerza, masa y aceleración. Una bala lanzada desde un cañón viaja a una cierta distancia antes de caer al suelo. ¿Qué ocurriría si fuera disparada con mayor rapidez? Pues que viajaría más lejos. Si fuera disparada con la rapidez

Cronología

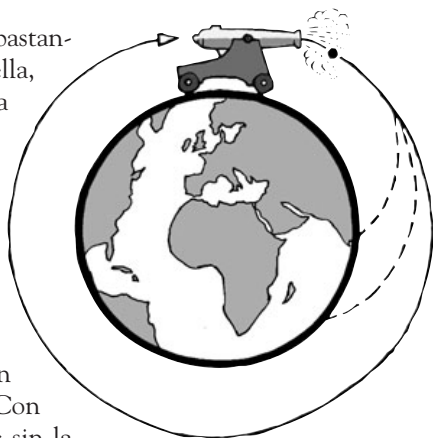
350 a.C.

Aristóteles se pregunta por qué caen los objetos

1609 d.C.

Kepler desvela las leyes de las órbitas planetarias

suficiente como para viajar en línea recta lo bastante lejos para que la Tierra se curvara debajo ella, ¿dónde caería? Newton se percató de que sería atraída hacia la Tierra, pero entonces seguiría una órbita circular. Igual que un satélite es atraído constantemente, pero sin alcanzar jamás el suelo.



Cuando los lanzadores olímpicos de martillo giran sobre sus talones, es la fuerza de la cuerda lo que mantiene al martillo girando. Sin esta fuerza el martillo saldría volando en línea recta, como ocurre cuando lo sueltan. Con la bala de cañón de Newton pasa lo mismo: sin la fuerza dirigida hacia el centro de la Tierra que mantiene unido el proyectil a ésta, aquél saldría volando hacia el espacio. Al pensarlo un poco más, Newton razonó que la Luna también está suspendida en el firmamento porque está sujeta por el lazo invisible de la gravedad. Sin la gravedad, ella también saldría despedida por el espacio.

Ley de la inversa del cuadrado Entonces Newton trató de cuantificar sus predicciones. Demostró que la gravedad sigue la ley de la inversa del cuadrado: la fuerza de la gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia de un cuerpo. De modo que si nos alejamos el doble de distancia de un cuerpo, su gravedad es cuatro veces menor; la gravedad ejercida por el Sol será cuatro veces menor para un planeta en una órbita el doble de lejos de ésta que la Tierra, o un planeta tres veces más lejos experimentará una gravedad nueve veces menor.

Esta ley explicaba en una ecuación las órbitas de todos los planetas como se describen en las tres leyes de Johannes Kepler (véase pág. 16). La ley de Newton predecía que viajaban más rápido cerca del Sol a medida que seguían sus trayectorias

« Todos los objetos del universo atraen a todos los demás objetos del universo a lo largo de una línea recta formada por los centros de los objetos, proporcional a la masa de cada objeto e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los objetos. »

Isaac Newton, 1687

1640

Galileo enuncia el principio de inercia

1687

Se publican los *Principia* de Newton

1905

Einstein publica la teoría de la relatividad especial

1915

Einstein publica la teoría general de la relatividad

elípticas. Un planeta experimenta una fuerza gravitatoria mayor del Sol cuando viaja más cerca de éste, lo cual le hace ir más rápido. A medida que su velocidad aumenta, el planeta se aleja del Sol nuevamente, volviendo a perder gradualmente velocidad. De este modo, Newton integró todos los trabajos anteriores en una teoría fundamental.

Ley universal Generalizando de una forma audaz, Newton propuso que su teoría de la gravedad se aplicara a todos los objetos del universo. Cualquier cuerpo ejerce una fuerza gravitatoria proporcional a su masa y esa fuerza decae al mismo tiempo que la inversa del cuadrado de su distancia. Por lo tanto, dos cuerpos cualesquiera se atraen entre sí. Pero como la gravedad es una fuerza débil sólo podemos observar realmente esto para los cuerpos de gran masa, como por ejemplo, el Sol, la Tierra y los planetas.

En la superficie de la Tierra, la aceleración debida a la gravedad, g , es de 9,8 metros por segundo al cuadrado.

Es posible observar minúsculas variaciones en la intensidad local de la gravedad en la superficie terrestre. Como las montañas y rocas masivas de diferente densidad pueden elevar o reducir la fuerza de la gravedad cerca de ellas, es posible utilizar un instrumento de medición de la gravedad para trazar un mapa de los terrenos geográficos y conocer la estructura de la corteza terrestre. Los arqueólogos también utilizan los pequeños cambios gravitatorios para determinar los emplazamientos enterrados. Recientemente, los científicos han utilizado satélites espaciales que miden la gravedad para registrar la cantidad (decreciente) de hielo que cubre los polos de la Tierra y también detectar los cambios en la corteza terrestre después de terremotos importantes.

Newton vertió todas sus ideas sobre la gravedad en un libro, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, conocido como *Principia*. La gravedad universal de Newton explicaba no sólo los movimientos de los

El descubrimiento de Neptuno

El planeta Neptuno fue descubierto gracias a la ley de la gravedad de Newton. A principios del siglo XIX, los astrónomos observaron que Urano no seguía una órbita simple, sino que actuaba como si otro cuerpo la alterara. Se realizaron numerosas predicciones basadas en la ley de Newton y en 1846 Neptuno fue descubierto cerca de la posición

esperada. Posee una masa 17 veces mayor que la de la Tierra y es un «gigante gaseoso» con una densa y tupida atmósfera de hidrógeno, helio, amoníaco y metano que recubren un núcleo sólido. El color azulado de las nubes de Neptuno se debe al metano. Sus vientos llegan a alcanzar los 2.500 kilómetros por hora.

Las mareas

Newton describió la formación de las mareas oceánicas en la Tierra en su libro *Principia*. Las mareas se producen porque la Luna atrae de forma diferente los océanos en el lado más cercano y el más alejado de la Tierra, en comparación con la propia tierra firme. La diferencia de la fuerza gravitatoria en los lados opuestos de la Tierra hace que la superficie del agua sobresalga hacia la Luna y después se aleje de ella, dando origen a las mareas, que suben y bajan cada 12 horas. Aunque el Sol ejerce una mayor fuerza gravitatoria sobre la Tierra que la

Luna, esta última posee un mayor efecto mareomotriz por hallarse más próxima a la Tierra. La ley de la inversa del cuadrado significa que el gradiente gravitatorio es mucho mayor para la cercana Luna que para el lejano Sol. Durante una luna nueva o una luna llena, la Tierra, el Sol y la Luna están alineados y se producen mareas especialmente altas, llamadas mareas «vivas». Cuando estos cuerpos no se encuentran alineados, sino que forman ángulos de 90 grados uno con otro, se producen las mareas bajas o «muertas».

planetas y las lunas, sino también de los proyectiles, los péndulos y las manzanas. Explicó las órbitas de los cometas, la formación de las mareas y el bamboleo de los ejes de la Tierra.

La ley de la gravedad universal de Newton se ha mantenido vigente durante cientos de años y todavía hoy ofrece una descripción básica del movimiento de los cuerpos. La gravedad newtoniana todavía funciona bien para la mayoría de los objetos visibles y para el comportamiento de los planetas, cometas y asteroides del sistema solar que se extienden a grandes distancias del Sol, donde la relatividad es relativamente débil. Aunque la ley de la gravedad de Newton fue lo bastante poderosa para predecir la posición del planeta Neptuno, fue la órbita de Mercurio la que precisó de nuevos conocimientos físicos posteriores a los de Newton. Así pues, la relatividad general es necesaria para explicar situaciones en las que la gravedad es muy fuerte, como la que se produce cerca del Sol, las estrellas y los agujeros negros.

« Se ha dicho que discutir contra la globalización es como discutir contra las leyes de la gravedad. »»

Kofi Annan, n. 1938

La idea en síntesis: la atracción de las masas

05 La conservación de la energía

La energía es una fuerza vital que hace que las cosas se muevan o cambien. Se presenta bajo numerosas apariencias y se manifiesta como un cambio en la altura o la velocidad, ondas electromagnéticas que se desplazan o vibraciones de los átomos que generan calor. La cantidad total de energía siempre se conserva. No se puede crear más, ni se puede destruir.

Todos estamos familiarizados con la energía como impulso básico. Si estamos cansados, es que nos falta; si saltamos de alegría, es que la poseemos en abundancia. Pero ¿qué es la energía? La energía que pone en marcha nuestro cuerpo procede de la combustión de sustancias químicas, del cambio de moléculas de un tipo a otro, siendo liberada energía en este proceso. Pero ¿qué tipo de energía hace que un esquiador descienda a toda velocidad por una pendiente o que una bombilla se encienda? ¿Son realmente la misma cosa?

Al presentarse bajo tantas apariencias, la energía es difícil de definir. Incluso ahora, los físicos no saben qué es intrínsecamente, aunque son expertos describiendo sus efectos y la forma de manejarla. La energía es una propiedad de la materia y el espacio, una especie de combustible o impulso encapsulado con potencial para crear, mover o cambiar. Remontándonos a los griegos, los filósofos de la naturaleza tenían una vaga noción de la energía como fuerza o esencia que infundía vida a los objetos y esta idea ha pervivido a lo largo de los siglos.

Intercambio de energía El primero en darse cuenta de que la energía se podía transformar fue Galileo. Cuando contemplaba un pé-

Cronología

aprox. 600 a.C.

Tales de Mileto reconoce que los materiales cambian de forma

1638 d.C.

Galileo observa el intercambio de energía cinética y potencial en el péndulo

1676

Leibniz formula el intercambio de energía matemáticamente y lo denomina *vis viva*