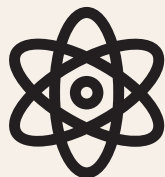


100

Joanne Baker



cosas
que hay
que saber
sobre

FÍSICA

FÍSICA ^y
CUÁNTICA

Ariel

Joanne Baker

100 COSAS
QUE HAY QUE SABER
SOBRE FÍSICA
Y FÍSICA CUÁNTICA

Ariel

Títulos originales:

50 Physics Ideas You Really Need to Know
50 Quantum Physics You Really Need to Know

Primeras ediciones: 2009 y 2013
Primera edición en esta presentación: abril de 2020

© 2007 y 2013, Joanne Baker
© 2008, Blanca Ribera de Madariaga, por la traducción de
50 Physics Ideas You Really Need to Know
© 2013, Joandomènec Ros i Aragonès, por la traducción de
50 Quantum Physics You Really Need to Know

Derechos exclusivos de edición en español:
© Editorial Planeta, S. A.
Avda. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona
Editorial Ariel es un sello editorial de Planeta, S. A.
www.ariel.es

ISBN: 978-84-344-3208-6
Depósito legal: B. 4.755-2020

Impreso en España

El papel utilizado para la impresión de este libro está calificado como papel ecológico y procede de bosques gestionados de manera sostenible.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

Contenido*

50 cosas que hay que saber sobre física

Introducción 7

MATERIA EN MOVIMIENTO

- 01 Principio de Mach 8
- 02 Las leyes del movimiento de Newton 12
- 03 Las leyes de Kepler 16
- 04 La ley de la gravedad de Newton 20
- 05 La conservación de la energía 24
- 06 El movimiento armónico simple 28
- 07 La ley de Hooke 32
- 08 Ley de los gases ideales 36
- 09 Segunda ley de la termodinámica 40
- 10 Cero absoluto 44
- 11 El movimiento browniano 48
- 12 Teoría del caos 52
- 13 La ecuación de Bernoulli 56

LAS ONDAS

- 14 Teoría del color de Newton 60
- 15 Principio de Huygens 64
- 16 La ley de Snell 68
- 17 Ley de Bragg 72
- 18 La difracción de Fraunhofer 76

- 19 El efecto Doppler 80
- 20 La ley de Ohm 84
- 21 La regla de la mano derecha de Fleming 88
- 22 Las ecuaciones de Maxwell 92

ENIGMAS CUÁNTICOS

- 23 La ley de Planck 96
- 24 El efecto fotoeléctrico 100
- 25 La ecuación de ondas de Schrödinger 104
- 26 El principio de incertidumbre de Heisenberg 108
- 27 La interpretación de Copenhague 112
- 28 El gato de Schrödinger 116
- 29 La paradoja EPR 120
- 30 El principio de exclusión de Pauli 124
- 31 Superconductividad 128

LA DIVISIÓN DE LOS ÁTOMOS

- 32 El átomo de Rutherford 132
- 33 Antimateria 136
- 34 Fisión nuclear 140
- 35 Fusión nuclear 144
- 36 El modelo estándar 148
- 37 Diagramas de Feynman 152

* Este volumen reúne dos libros publicados anteriormente: *50 cosas que hay que saber sobre física* y *50 cosas que hay que saber sobre física cuántica*. Por esta razón determinados capítulos retoman los mismos temas aunque abordados y escritos de manera distinta. (N. del E.)

- 38 La partícula divina 156
39 Teoría de cuerdas 160

ESPACIO Y TIEMPO

- 40 Relatividad especial 164
41 Relatividad general 168
42 Agujeros negros 172
43 La paradoja de Olbers 176
44 La ley de Hubble 180
45 El big bang 184

- 46 La inflación cósmica 188
47 La materia oscura 192
48 La constante cosmológica 196
49 La paradoja de Fermi 200
50 El principio antrópico 204

- Glosario 208
Índice 212

50 cosas que hay que saber sobre física cuántica

- Introducción 221

LECCIONES SOBRE LA LUZ

- 01 Conservación de la energía 222
02 La ley de Planck 226
03 Electromagnetismo 230
04 Las franjas de Young 234
05 Velocidad de la luz 238
06 Efecto fotoeléctrico 242

ENTENDER LOS ELECTRONES

- 07 Dualidad onda-partícula 246
08 El átomo de Rutherford 250
09 Saltos cuánticos 254
10 Líneas de Fraunhofer 258
11 Efecto Zeeman 262
12 Principio de exclusión de Pauli 266

MECÁNICA CUÁNTICA

- 13 Mecánica matricial 270
14 Ecuación de onda de Schrödinger 274
15 Principio de incertidumbre de Heisenberg 278

- 16 La interpretación de Copenhague 282
17 El gato de Schrödinger 286
18 La paradoja EPR 290
19 Efecto túnel cuántico 294
20 Fisión nuclear 298
21 Antimateria 302

CAMPOS CUÁNTICOS

- 22 Teoría de campo cuántico 306
23 Desplazamiento de Lamb 310
24 Electrodinámica cuántica 314
25 Desintegración beta 318
26 Interacción débil 322
27 Quarks 326
28 Dispersión inelástica profunda 330
29 Cromodinámica cuántica 334
30 El Modelo Estándar 338

COSMOS CUÁNTICO

- 31 Rotura de simetría 342
32 El bosón de Higgs 346
33 Supersimetría 350

- 34 Gravedad cuántica 354
- 35 Radiación de Hawking 358
- 36 Cosmología cuántica 362
- 37 Teoría de cuerdas 366

IRREALIDAD CUÁNTICA

- 38 Muchos mundos 370
- 39 Variables ocultas 374
- 40 Desigualdades de Bell 378
- 41 Experimentos de Aspect 382
- 42 Borrador cuántico 386

APLICACIONES CUÁNTICAS

- 43 Descohesión cuántica 390
- 44 Cubits 394
- 45 Criptografía cuántica 398
- 46 Puntos cuánticos 402
- 47 Superconductividad 406
- 48 Condensados de Bose-Einstein 410
- 49 Biología cuántica 414
- 50 Consciencia cuántica 418

Glosario 422

Índice 425

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 mostró 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 transmitía 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 confía 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, *Philosophiae 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