

50

COSAS
QUE HAY QUE
SABER SOBRE

FÍSICA CUÁNTICA

JOANNE BAKER

Ariel



Joanne Baker

50 COSAS
QUE HAY QUE SABER
SOBRE FÍSICA CUÁNTICA

Traducción de
Joandomènec Ros

Ariel



Primera edición: enero de 2016
Edición anterior: octubre de 2013

Título original:
50 quantum physics ideas you really need to know
Quercus

Realización: Atona, S. L.

© 2013 by Joanne Baker
Derechos exclusivos de la edición en español reservados para todo el mundo:
© 2013 y 2016: Editorial Planeta, S. A.
Avda. Diagonal, 662-664 - 08034 Barcelona
Editorial Ariel es un sello editorial de Planeta, S. A.
www.ariel.es

ISBN: 978-84-344-2314-5
Depósito legal: B. 28.342 - 2015
Impreso en España por Limpergraf

El papel utilizado para la impresión de este libro
es cien por cien libre de cloro
y está calificado como **papel ecológico**.

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

Contenidos

Introducción 7

LECCIONES SOBRE LA LUZ

- 01 Conservación de la energía 8
- 02 La ley de Planck 12
- 03 Electromagnetismo 16
- 04 Las franjas de Young 20
- 05 Velocidad de la luz 24
- 06 Efecto fotoeléctrico 28

ENTENDER LOS ELECTRONES

- 07 Dualidad onda-partícula 32
- 08 El átomo de Rutherford 36
- 09 Saltos cuánticos 40
- 10 Líneas de Fraunhofer 44
- 11 Efecto Zeeman 48
- 12 Principio de exclusión de Pauli 52

MECÁNICA CUÁNTICA

- 13 Mecánica matricial 56
- 14 Ecuación de onda de Schrödinger 60
- 15 Principio de incertidumbre de Heisenberg 64
- 16 La interpretación de Copenhague 68
- 17 El gato de Schrödinger 72
- 18 La paradoja EPR 76
- 19 Efecto túnel cuántico 80
- 20 Fisión nuclear 84
- 21 Antimateria 88

CAMPOS CUÁNTICOS

- 22 Teoría de campo cuántico 92
- 23 Desplazamiento de Lamb 96

- 24 Electrodinámica cuántica 100
- 25 Desintegración beta 104
- 26 Interacción débil 108
- 27 Quarks 112
- 28 Dispersión inelástica profunda 116
- 29 Cromodinámica cuántica 120
- 30 El Modelo Estándar 124

COSMOS CUÁNTICO

- 31 Rotura de simetría 128
- 32 El bosón de Higgs 132
- 33 Supersimetría 136
- 34 Gravedad cuántica 140
- 35 Radiación de Hawking 144
- 36 Cosmología cuántica 148
- 37 Teoría de cuerdas 152

IRREALIDAD CUÁNTICA

- 38 Muchos mundos 156
- 39 Variables ocultas 160
- 40 Desigualdades de Bell 164
- 41 Experimentos de Aspect 168
- 42 Borrador cuántico 172

APLICACIONES CUÁNTICAS

- 43 Descohesión cuántica 176
- 44 Cubits 180
- 45 Criptografía cuántica 184
- 46 Puntos cuánticos 188
- 47 Superconductividad 192
- 48 Condensados de Bose-Einstein 196
- 49 Biología cuántica 200
- 50 Consciencia cuántica 204

Glosario 208

Índice 210

01 Conservación de la energía

La energía alimenta el movimiento y el cambio. Es un desfasador de la forma que adopta muchos aspectos, desde el calor que se libera al quemar madera hasta la velocidad que adquiere el agua al fluir cuesta abajo. Puede pasar de un tipo a otro. Pero la energía no se crea ni se destruye. En conjunto, siempre se conserva.

La idea de la energía como la causa de las transformaciones era familiar para los antiguos griegos: *energeia* significa actividad en griego. Sabemos que esta magnitud se escala en función de la fuerza que aplicamos y la distancia a la que cambia un objeto sometido a ella. Pero la energía es todavía un concepto resbaladizo para los científicos. Las ideas de la física cuántica se originaron mientras se investigaba la naturaleza de la energía.

Cuando empujamos un carrito de supermercado, avanza porque le suministramos energía. El carrito es accionado por las sustancias químicas que se queman en nuestro cuerpo, que producen energía que transmitimos mediante la fuerza de nuestros músculos. Cuando lanzamos un balón convertimos también energía química en movimiento. El calor del Sol procede de la fusión nuclear, en la que núcleos atómicos son aplastados unos contra otros, y en el proceso liberan energía.

La energía se presenta en muchas formas: desde balas disparadas hasta relámpagos. Pero su origen siempre se puede hacer remontar a otra clase. La pólvora creó el disparo del arma. Movimientos moleculares estimularon la electricidad estática en una nube, que se liberó en la enorme chispa. Cuando la energía cambia de un tipo a otro, hace que la materia se mueva o cambie.

Puesto que simplemente cambia de forma, la energía no se crea ni se destruye nunca. Se conserva: la cantidad total de energía en el uni-

Cronología

c. 600 a.C.

Tales de Mileto reconoce que los materiales cambian de forma

1638 d.C.

Galileo advierte el intercambio de energía en un péndulo

1676

Leibniz llama a la energía *vis viva*

1807

Young propone el término «energía»

verso, o en cualquier sistema completamente aislado, permanece constante.

Conservación En la antigua Grecia, Aristóteles fue el primero en darse cuenta de que la energía parecía conservarse, aunque no tenía medios de comprobarlo. Pasaron siglos hasta que los primeros científicos (conocidos entonces como filósofos naturales) comprendieran las diferentes formas de energía de manera individual, y después que relacionaran unas con otras.

A principios del siglo xvii, Galileo Galilei experimentó con un péndulo oscilante. Advirtió que había un equilibrio entre lo rápido que se movía el peso en el centro de su recorrido y lo alto que se elevaba al final. Cuanto más alto se soltaba el peso, más rápidamente hacía el recorrido, y al final del mismo se elevaba casi hasta la misma altura. A lo largo de todo el ciclo, la energía cambiaba desde «potencial gravitatorio» (asociado con la altura sobre el suelo) hasta energía «cinética» (velocidad).

Gottfried Leibniz, matemático del siglo xvii, se refería a la energía como *vis viva*, o fuerza vital. A principios del siglo xix, el físico y erudito Thomas Young introdujo el término energía en el sentido en el que lo usamos ahora. Pero lo que es exactamente la energía sigue siendo algo escurridizo.

Aunque actúa sobre cuerpos enormes, desde una estrella hasta incluso todo el universo, en su esencia la energía es un fenómeno a pequeña escala. La energía química surge cuando átomos y moléculas redistribuyen su estructura durante las reacciones. La luz y otras formas de energía electromagnética se transmiten como ondas, que interactúan con los átomos. El calor refleja vibraciones moleculares. Un muelle de acero comprimido retiene energía elástica dentro de su estructura.

La energía está íntimamente ligada a la naturaleza de la materia misma. En 1905, Albert Einstein reveló que masa y energía son equivalentes. Su famosa ecuación $E = mc^2$ dice que la energía (E) liberada por la destrucción de una masa (m) es m veces la velocidad de la luz (c) al cuadrado. Puesto que la luz viaja a 300 millones de metros por segundo (en el espacio vacío), aplastar aunque sea unos pocos átomos

1850

Rudolf Clausius define la entropía y la segunda ley

1860

Maxwell postula su diablillo

1901

Max Planck describe los «cuantos» de energía

1905

Einstein demuestra que masa y energía son equivalentes

libera una enorme cantidad de energía. Nuestro Sol y las centrales de energía nuclear liberan energía de esta manera.

Otras reglas Las propiedades relacionadas con la energía también pueden conservarse. Una es el momento. El momento lineal, el producto de la masa por la velocidad, es una medida de lo difícil que es reducir la velocidad de un cuerpo en movimiento. Un carrito de supermercado lleno tiene más momento que uno vacío, y es difícil de detener. El momento tiene una dirección, a la vez que un tamaño, y ambos aspectos se conservan juntos. Esto se aprovecha en el billar: si se golpea una bola estacionaria con otra que se mueve, las trayectorias finales de ambas se sumarán para dar la velocidad y la dirección de la primera bola en movimiento.

El momento también se conserva para objetos en rotación. Para un objeto que gira alrededor de un punto, se define el momento angular como el producto del momento lineal del objeto por su distancia desde aquel punto. Los patinadores sobre hielo conservan el momento angular cuando giran. Remolinean lentamente cuando brazos y piernas se hallan extendidos; aumentan su velocidad al acercar sus extremidades al cuerpo.

Otra regla es que el calor siempre pasa de los cuerpos cálidos a los fríos. Esta es la segunda ley de la termodinámica. El calor es una medida de la vibración atómica, de modo que los átomos zangolotean de manera cada vez más desordenada en el interior de los cuerpos calientes que en los más fríos. Los físicos denominan «entropía» a la cantidad de desorden, o aleatoriedad. La segunda ley dice que la entropía siempre aumenta en cualquier sistema cerrado sin influencias externas.

«Es un hecho extraño que podamos calcular un número determinado y que cuando terminamos de observar a la naturaleza realizar sus trucos y calculamos de nuevo el número, este sea el mismo.»

Richard Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, 1961

Y, entonces, ¿cómo funcionan los frigoríficos? La respuesta es que crean calor como subproducto, como se puede notar si se acerca la mano a su parte posterior. Los frigoríficos no violan la segunda ley de la termodinámica, sino que operan con ella, creando más entropía al calentar el aire que extraen para enfriar. De promedio, si se tiene en cuenta tanto el frigorífico como las moléculas de aire, la entropía aumenta.

Muchos inventores y físicos han intentado pensar en maneras de confundir la segunda ley, pero ninguno lo ha conseguido. Se ha pensado en proyectos de máquinas de movimiento continuo, desde una copa que se vacía y se vuelve a llenar hasta una rueda que impulsa su propia rotación haciendo caer pesos a lo largo de sus ra-

dios. Pero cuando se observa detenidamente su funcionamiento, todas pierden energía, en forma de calor o de ruido, pongamos por caso.

El físico escocés James Clerk Maxwell diseñó en la década de 1860 un experimento mental que podía crear calor sin un aumento de entropía... aunque nunca se ha conseguido que funcione sin una fuente externa de energía. Maxwell imaginó dos cajas conectadas llenas de gas, ambas a la misma temperatura, unidas por un pequeño agujero. Si un lado se calienta, las partículas en este lado se mueven más deprisa. Normalmente, algunas de ellas pasarán a través del agujero al otro lado, con lo que gradualmente uniformizarán la temperatura.

Pero Maxwell imaginó que sería posible lo contrario, mediante algún mecanismo, que representaba como un diminuto demonio o diablillo (conocido como «diablillo de Maxwell»). Si pudiera diseñarse un tal mecanismo, podría hacer pasar las moléculas rápidas del lado más frío a la caja más caliente, violando así la segunda ley de la termodinámica. No se ha descubierto nunca ningún medio de hacerlo, de modo que la segunda ley se mantiene.

Las ideas y reglas acerca de cómo mover y compartir la energía, junto con un conocimiento creciente de la estructura atómica, condujeron al nacimiento de la física cuántica a principios del siglo xx.

**La idea en síntesis:
energía que cambia
de forma**

02 La ley de Planck

Al resolver el problema de por qué el resplandor del carbón es rojo y no azul, el físico alemán Max Planck inició una revolución que condujo al nacimiento de la física cuántica. Mientras buscaba describir tanto la luz como el calor en sus ecuaciones, Planck repartió la energía en pequeños paquetes, o cuantos, y en el proceso explicó por qué los cuerpos calientes emiten tan poca radiación ultravioleta.

Es invierno y tenemos frío. Imaginamos el agradable resplandor de un fuego crepitante, los carbones rojos y las llamas amarillas. Pero ¿por qué brillan de color rojo los carbones? ¿Por qué la punta de un atizador de hierro colocado sobre el fuego también se vuelve roja al calentarse?

Los fragmentos de carbón que queman alcanzan cientos de grados Celsius. La lava volcánica es más caliente, y se acerca a los 1.000 °C. La lava fundida brilla más intensamente y puede parecer anaranjada o amarilla, como ocurre con el acero fundido a la misma temperatura. Los filamentos de tungsteno de las bombillas eléctricas se calientan todavía más. Con temperaturas de miles de grados Celsius, parecidas a las de la superficie de una estrella, brillan con un color blanco.

Radiación de cuerpo negro Los cuerpos emiten luz a frecuencias cada vez más elevadas a medida que son calentados. Especialmente para materiales oscuros tales como el carbón y el hierro (que son eficientes a la hora de absorber y emitir calor), la extensión de las frecuencias radiadas a una temperatura determinada tiene una forma similar, conocida como «radiación de cuerpo negro».

La mayor parte de energía luminosa irradia alrededor de una frecuencia «pico», que en función de la temperatura pasa del rojo al azul. La

Cronología

1860

Kirchhoff utiliza el término «cuerpo negro»

1896

Wien presenta su ley de la radiación de alta frecuencia

1900

Rayleigh presenta su ley de la catástrofe del ultravioleta

1901

Planck publica la ley de la radiación del cuerpo negro

energía también se desparra a cada lado, aumentando en intensidad hacia el pico a bajas frecuencias, y reduciéndose por encima de este. El resultado es un espectro en forma de «colina» asimétrica, conocido como «curva de cuerpo negro».

Un carbón que resplandece puede producir la mayor parte de su luz en la gama del anaranjado, pero también emite un poco de rojo de baja frecuencia y algo de amarillo de una frecuencia algo mayor, pero apenas nada de azul. El acero fundido muy caliente hace que este patrón aumente de frecuencia, para emitir sobre todo luz amarilla, con algo de anaranjado y una pizca de verde.

La catástrofe del ultravioleta A finales del siglo XIX, los físicos ya conocían la radiación del cuerpo negro y habían medido su patrón de frecuencias. Pero no podían explicarlo. Diferentes teorías podían describir parte del comportamiento, pero no todo. Wilhelm Wien fraguó una ecuación que predecía la rápida amortiguación a las frecuencias azules. Mientras tanto, lord Rayleigh y James Jeans explicaban el aumento del espectro rojo. Pero ninguna fórmula podía describir ambos extremos.

La solución de Rayleigh y Jeans a la parte creciente del espectro era particularmente problemática. Sin un medio para reducir su crecimiento, su teoría predecía una liberación infinita de energía a las longitudes de onda ultravioleta y más cortas. Este problema se conocía como la «catástrofe del ultravioleta».

La solución llegó de la mano del físico alemán Max Planck, quien en aquella época intentaba unificar la física del calor y la de la luz. A Planck le gustaba pensar matemáticamente y abordar los problemas de la física desde el principio, co-

Temperatura del color

El color de una estrella delata su temperatura. El Sol, a 6.000 kelvin, aparece amarillo, mientras que la superficie más fría de la gigante roja Betelgeuse (en la constelación de Orión) tiene una temperatura que es la mitad de esta. La superficie abrasada de Sirio, la estrella más brillante del cielo, que brilla azul-blanco, alcanza los 30.000 kelvin.

«El descubrimiento científico y el conocimiento científico solo los han conseguido quienes los han buscado sin pretender ningún tipo de propósito práctico.»

Max Planck, 1959

1905

Einstein identifica el fotón y refuta la catástrofe del ultravioleta

1918

Max Planck recibe el Premio Nobel

1994

El equipo del COBE publica el espectro de cuerpo negro de la radiación cósmica de fondo de microondas (CFM)

2009

Lanzamiento de la nave espacial Planck

MAX PLANCK (1858-1947)

En la escuela, en Múnich, Alemania, el primer amor de Max Planck era la música. Cuando le preguntó a un músico dónde debería ir para estudiarla, se le dijo que sería mejor que hiciera otra cosa si tenía que hacer esta pregunta. Se quiso dedicar a la física, pero su profesor se lamentó de que la física era una ciencia completa: ya no se podía descubrir nada más. Por suerte, Planck no le hizo caso y se dedicó a desarrollar el concepto de cuantos. Planck soportó la pérdida de su esposa y de dos hijos, muertos en las dos guerras mundiales. Permaneció en Alemania y pudo reconstruir la investigación allí después de la última guerra. Hoy en día, los prestigiosos institutos de investigación Max Planck llevan su nombre.

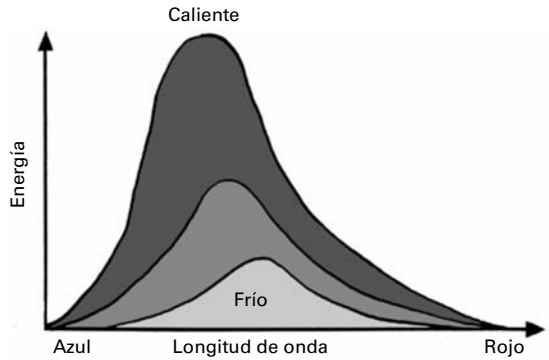
menzando desde lo más básico. Fascinado por las leyes fundamentales de la física, notablemente por la segunda ley de la termodinámica, y por las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, se dispuso a comprobar de qué manera estaban relacionadas.

Cuantos Planck manipulaba fielmente sus ecuaciones, sin preocuparse por lo que aquellos pasos pudieran significar en la vida real. Para conseguir que fuera más fácil trabajar con las matemáticas, inventó un truco ingenioso. Parte del problema era que el electromagnetismo se describe en términos de ondas. En cambio, la temperatura es un fenómeno estadístico, en el que la energía térmica es compartida por muchos átomos o moléculas. De modo que Planck decidió tratar el electromagnetismo de la misma manera que la termodinámica. En lugar de átomos, imaginó campos magnéticos que eran transportados por osciladores diminutos. Cada uno podía tomar una cierta cantidad de energía electromagnética, que era compartida por muchas de estas entidades elementales.

Planck escaló la energía de cada oscilador con la frecuencia, de modo que $E = h\nu$, en la que E es la energía, ν es la frecuencia de la luz y h es un factor constante conocido como constante de Planck. Estas unidades de energía se denominaron «cuantos», del término latino *quantus*, «cuánto».

En las ecuaciones de Planck, los cuantos de la radiación de frecuencia elevada tienen energías correspondientemente altas. Puesto que la cantidad total de energía disponible es limitada, en el sistema no puede haber muchos cuantos de energía elevada. Es un poco como la economía. Si el lector tiene 99 dólares en su cartera, es probable que esta contenga más billetes de denominaciones pequeñas que de grandes. Puede que haya nueve billetes de a dólar, cuatro o más billetes de 10 dólares, pero solo un billete de 50 dólares, si tiene suerte. De forma similar, los cuantos de alta energía son raros.

Planck calculó la gama de energías más probable para un conjunto de cuantos electromagnéticos. De promedio, la mayor parte de la energía se encontraba a medio camino, lo que explicaba la forma puntiaguda del espectro del cuerpo negro. Planck publicó su ley en 1901. Fue muy bien recibida, pues resolvía de manera pulcra el enojoso problema de la «catástrofe del ultravioleta».



El concepto de los cuantos de Planck era totalmente teórico: los osciladores no eran necesariamente reales, pero eran un constructo matemático útil para equiparar la física de las ondas y del calor. Pero al aparecer a principios del siglo xx, una época en la que nuestra comprensión de la luz y del mundo atómico progresaba rápidamente, la idea de Planck tuvo implicaciones más allá de todo lo que él imaginaba. Se convirtió en la base de la teoría cuántica.

El legado de Planck en el espacio El espectro de cuerpo negro que se conoce con más exactitud procede del espacio. Un débil resplandor de microondas con una temperatura exacta de 2,73 K emana de todas las direcciones del cielo. Su origen está en el universo muy temprano, unos cien mil años después del Big Bang, cuando se formaron los primeros átomos de hidrógeno. La energía térmica procedente de aquella época se ha enfriado desde entonces, a medida que el universo se expandía, y ahora tiene un máximo en la parte de microondas del espectro, siguiendo una ley de cuerpo oscuro. Esta radiación cósmica de fondo de microondas se detectó en la década de 1960, pero fue cartografiada en detalle en la de 1990 por el satélite COBE (COsmic Background Explorer) de la NASA. La última misión europea de fondo de microondas lleva el nombre de Planck.

La idea en síntesis:
la economía de la
energía