

Capítulo 1

¿De qué manera? De las dos: La dualidad onda-partícula

Estábamos dando un paseo, cuando Emmy vio una ardilla y salió disparada tras ella. La ardilla huyó a un patio y rodeó un pequeño arce ornamental. Emmy siguió corriendo en línea recta hacia el árbol y, justo antes de que se golpeará, la detuve con la correa.

—¡Eh! ¿Por qué has hecho eso? —preguntó indignada.

—¿Tú qué crees? Ibas a estrellarte contra ese árbol y te lo he impedido.

—¿Por quién me tomas? No habría chocado. —Volvió a mirar a la ardilla, que ahora estaba a salvo subida a un árbol más grande en el otro lado del patio—. ¿No te das cuenta de que iba a usar la física cuántica?

Reanudamos el paseo.

—Muy bien, vas a tener que explicarme eso último —dije yo.

—Verás, es que se me ha ocurrido un plan —respondió—. Estoy harta de que siempre me pase lo mismo cuando persigo bichos en el patio. Ya sabes, siempre que voy por la derecha del estanque, el bicho se escapa por la izquierda.

—Sí, ya sé que eso no te gusta nada.

—Y otras veces voy por el lado izquierdo y, ¿qué ocurre?, pues que se escapan por la derecha.

—Cierto.

—Bueno, pues para que no me vuelva a pasar, he pensado en una nueva manera de correr para que ningún bichejo se me vuelva a escapar.

—¿Cómo? ¿Vas a ir por el medio del estanque?

Sólo tiene unos 20 centímetros de profundidad y poco más de medio metro de largo.

—No, tonto, iré por ambos lados y atraparé a los conejos en el medio.

—Ya, claro. Desde luego, es una teoría... interesante.

—No es una teoría, aplico la física cuántica. Las partículas de la materia tienen naturaleza de onda, así que pueden difractarse alrededor de los objetos. Si diriges un flujo de electrones contra un obstáculo, lo rodearán por la izquierda y la derecha al mismo tiempo. —Emmy estaba tan absorta en sus razonamientos que ni siquiera se fijó en el gato que tomaba el sol en el patio al otro lado de la calle—. Por tanto, usaré mi naturaleza de onda e iré por ambos lados del estanque.

—Eso está claro, pero sigo sin entender por qué intentabas estrellarte contra un árbol.

—Bueno —dijo un poco avergonzada—, quería intentarlo primero con algo más pequeño. Había cogido carrerilla y estaba a punto de rodear el árbol cuando me detuviste.

—Ya, sigo creyendo que tu teoría es interesante, pero lamento decirte que no funcionará.

—No irás a decirme que no tengo naturaleza de onda, ¿verdad? Porque sí la tengo. Lo pone en tus libros de física.

—Vale, vale, tienes naturaleza de onda. Y también eres Buda...

—¡Oye! ¡Qué te has creído! Soy una perra muy culta.

—Y eso está muy bien, pero mira, un árbol es grande y tu longitud de onda es pequeña. Caminando a esta velocidad, un perro de 20 kilos como tú tiene una longitud de onda de unos 10^{-35} metros. Tu longitud de onda debería ser semejante al tamaño del árbol (de unos 10 cm) para difractarte a su alrededor, así que te faltan unas treinta y cuatro órdenes de magnitud.

—¡Ya lo tengo! Modificaré mi longitud de onda aumentando la velocidad. Ya sabes lo rápido que puedo llegar a correr cuando quiero.

—Buen intento, pero la longitud de onda se acorta conforme aumenta la velocidad. Para conseguir que tu longitud de onda suba hasta el milímetro que necesitas para difractarte alrededor de un árbol, necesitarías moverte a 10^{-30} metros por segundo, y es imposible ir tan lento. Te costaría un billón de años cruzar el núcleo de un átomo a esa velocidad, y, yendo tan lenta, el conejo se escaparía sin remedio.

—Entonces, ¿crees que sería mejor que buscara un nuevo plan?

—Me temo que sí.

Emmy bajó la cola y paseamos en silencio durante unos segundos.

—Oye —dijo ella—, ¿me echas una mano con el plan nuevo?

—Claro, si puedo ayudarte en algo...

—¡Pues claro! Dime cómo puedo usar mi naturaleza de Buda para rodear ambos lados del estanque a la vez.

Justo cuando me di cuenta de que me había dejado sin palabras, un destello de pelaje gris me sacó del aprieto.

—¡Emmy, mira! ¡Una ardilla! —dije.

—¡Oh!

Y salimos corriendo tras ella.

La física cuántica tiene muchos aspectos extraños y fascinantes, pero el descubrimiento que dio inicio a la teoría fue la dualidad onda-partícula, es decir, el hecho de que tanto la luz como la materia tienen propiedades de partícula y de onda. Un rayo de luz, que generalmente se considera una onda, se comporta como una corriente de partículas en algunos experimentos. A la inversa, un rayo de electrones, considerado generalmente una corriente de partículas, se comporta como una onda en algunos experimentos. Las propiedades de partículas y ondas parecen contradictorias, y aun así todo lo que existe en el universo consigue ser a la vez onda y partícula.

El descubrimiento a principios del siglo xx de que la luz se comporta como una partícula es el punto de partida de toda la mecánica cuántica. En este capítulo, explicaremos la historia de cómo los físicos descubrieron esta extraña dualidad. No obstante, para entender la singularidad de este hallazgo, debemos hablar primero sobre las partículas y las ondas que vemos en la vida cotidiana.

Las partículas y ondas que hay a tu alrededor: física clásica

Todo el mundo está familiarizado con el comportamiento de las partículas de la materia. Prácticamente todos los objetos que ves a tu alrededor (huesos, pelotas, juguetes) se comportan como partículas en el sentido clásico, y su movimiento está definido por la física clásica. Aunque tengan formas diferentes, puedes predecir su movimiento esencial imaginando cada una de ellas como

una bola pequeña, sin rasgos distintivos, con cierta masa (una partícula) y aplicando las leyes del movimiento de Newton.¹ Una pelota de tenis y un hueso largo girando en el aire pueden parecer muy diferentes, pero si los lanzas en la misma dirección y con la misma velocidad, caerán en el mismo sitio, y ese lugar puede predecirse mediante la física clásica.

Un objeto que se comporta como una partícula tiene una posición definida (sabes exactamente dónde está), una velocidad definida (sabes lo rápido que se mueve y en qué dirección), y una masa definida (sabes lo grande que es). Si multiplicas la masa por la velocidad, obtienes el momento. Un perro labrador tiene más momento que un caniche francés si ambos se mueven a la misma velocidad; mientras que un ágil border collie tiene más momento que un basset hound de la misma masa, pero que camina torpemente. El momento determina lo que ocurre cuando dos partículas colisionan. Cuando un objeto en movimiento golpea otro que está en reposo, el objeto en movimiento se ralentiza, y pierde momento, mientras que la velocidad del objeto en reposo aumenta y gana momento.

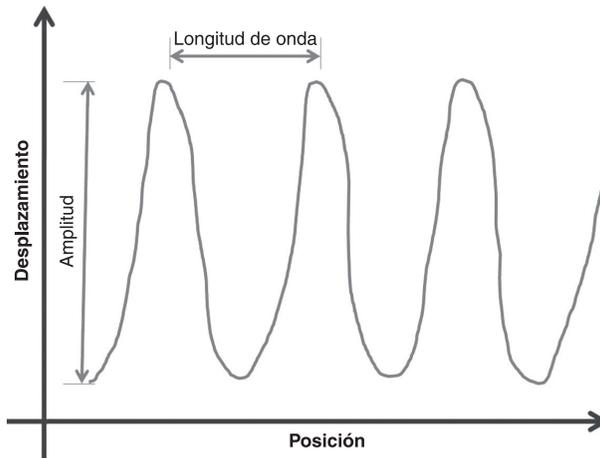
La otra característica notable de las partículas parece casi demasiado obvia: las partículas se pueden contar. Cuando tienes varios objetos, puedes mirarlos y determinar exactamente cuántos tienes (un hueso, dos juguetes, tres ardillas debajo del árbol del patio).

Las ondas, por su parte, son más escurridizas. Una onda es una perturbación que se propaga en algo, como los patrones de crestas y valles que forma el agua al salpicar en el estanque del patio. Las ondas se extienden en cierta región del espacio por su naturaleza, formando un patrón que cambia y se mueve a lo largo del tiempo. Ningún objeto físico se mueve (el agua sigue en el

1. Sir Isaac Newton, el protagonista de la historia de la manzana caída, estableció tres leyes del movimiento que gobiernan el comportamiento de los objetos en movimiento. La primera ley es el principio de inercia, según el cual, los objetos en reposo tienden a permanecer en reposo, y los objetos en movimiento tienden a permanecer en movimiento a menos que actúe una fuerza externa. La segunda ley cuantifica la primera, y usualmente se escribe mediante la ecuación $F = ma$, es decir, la fuerza es igual a masa por aceleración. La tercera ley dice que cualquier acción produce una reacción igual y opuesta: una fuerza de igual magnitud en la dirección opuesta. Estas tres leyes describen el movimiento de objetos macroscópicos a velocidades de la vida diaria, y son el centro de la física clásica.

estanque), pero el patrón de perturbación cambia, y lo vemos como el movimiento de una onda.

Si quieres entender qué es una onda, hay dos maneras de verla que proporcionan información útil. Una es imaginar que tomas una instantánea de toda la onda y que miras el patrón de la perturbación en el espacio. En el caso de una única onda simple, encontrarás un patrón de picos y valles regulares, como éste:



Conforme avanzas en el patrón, verás que el punto medio se mueve arriba y abajo; esa distancia es la «amplitud» de la onda. Si mides la distancia entre dos crestas sucesivas de la onda (o dos valles), habrás medido la «longitud de onda», que es una de las cifras usadas para describir una onda.

Otra posibilidad es tomar un fragmento del patrón de onda, y observarlo durante bastante tiempo (imagínate, por ejemplo, que miras a un pato balanceándose en un lago). Si lo miras atentamente, comprobarás que la perturbación se hace más grande y más pequeña de manera muy regular (a veces el pato está más alto, a veces más bajo) y que describe un patrón en el tiempo muy similar al patrón en el espacio. Puedes medir cada cuánto se repite la onda en un tiempo determinado (cuántas veces el pato alcanza su altura máxima en un minuto, por ejemplo) y obtendrás la «frecuencia» de la onda, otra cifra necesaria para describirla. La longitud de onda y la frecuencia están relacionadas entre sí (una mayor longitud de onda implica una frecuencia más baja, y viceversa).

Por tanto, las diferencias entre ondas y partículas son evidentes: en primer lugar, las ondas no tienen una posición. La longitud de onda y la frecuencia describen el patrón en su conjunto, pero no hay ni un solo lugar que se pueda señalar e identificar como la posición de la onda. La onda en sí misma es una perturbación que se extiende en el espacio, y no una cosa física con una posición y velocidad definidas. Del mismo modo, puedes asignar una velocidad al patrón de onda observando cuánto tarda una onda en moverse de una posición a otra, pero, de nuevo, es una propiedad del patrón en su conjunto.

En segundo lugar, tampoco es posible contar ondas como se cuentan las partículas: puedes decir cuántas crestas y valles hay en un área particular, pero todas ellas forman parte de un solo patrón de onda. Las ondas son continuas, mientras que las partículas son sencillas; es decir, puedes afirmar que tienes una, dos o tres partículas, pero o tienes ondas o no las tienes. Las ondas individuales pueden tener amplitudes más o menos grandes, pero no se pueden dividir como las partículas.

Por otra parte, las ondas ni siquiera se suman del mismo modo que las partículas. Así, en ciertas ocasiones, al sumar dos ondas, se obtiene una tercera onda mayor que las iniciales, pero en otras puedes quedarte sin ninguna onda. Imagina que tienes dos fuentes de ondas diferentes en la misma área (por ejemplo, dos piedras que caen en el agua al mismo tiempo). El resultado de la suma de las dos ondas dependerá de cómo se alineen. Si se suman de manera que las crestas de una onda caigan sobre las crestas de la otra, y los valles de una onda caigan sobre los valles de la otra (es decir, «en fase»), obtendrás una onda mayor que las dos que tenías al principio. Por el contrario, si sumas dos ondas de manera que las crestas de una onda caigan en los valles de la otra, y viceversa (es decir, «fuera de fase»), ambas se anularán y no habrá ninguna onda. Este fenómeno se llama *interferencia* y probablemente sea la diferencia más drástica entre ondas y partículas.

—No sé... no acabo de entenderlo, es bastante raro. ¿Podrías poner algún otro ejemplo de interferencia? ¿Alguno más perruno?

—En realidad, no. Ésa es la cuestión: las ondas son completamente diferentes de las partículas. Los perros no tienen nada que ver con ese comportamiento de las ondas.

—¡Espera! Creo que tengo una idea. A ver si lo he entendido: la interferencia es como cuando entra una ardilla en el patio tra-

sero, después un perro y, al cabo de un minuto, ya no hay ninguna ardilla en el patio.

—Eso no es interferencia, sino persecución de presa; pero, bueno, ya que quieres usar ardillas para poner ejemplos de interferencia, sería más bien así: pones una ardilla en el patio trasero, y un segundo después pones otra; al cabo de un momento descubrirás que ya no hay ninguna ardilla; ahora bien, si esperaras dos segundos antes de poner la segunda ardilla, encontrarás cuatro ardillas.

—Vale, la verdad es que todo esto de la interferencia es muy raro.

—Eso intentaba explicarte.

—Genial, y entonces, ¿por qué hablamos de ello?

—Bueno, si de verdad quieres entender la física cuántica, antes necesitas tener unas cuantas cosas claras sobre las ondas.

—Sí, pero todo esto que cuentas suena a mates, y no me gustan las mates. ¿Cuándo vamos a hablar de física?

—Ya lo estamos haciendo. La física usa las matemáticas para describir el universo.

—¡Buf! ¿Y de qué me sirve describir el universo? Ya te lo he dicho: ¡yo lo que quiero es cazar ardillas!

—Bueno, Emmy, es que describir el universo mediante las matemáticas te ayudaría a cazar ardillas. Si tienes un modelo matemático de dónde están las ardillas ahora, y sabes las reglas que gobiernan su comportamiento, puedes usar el modelo para predecir dónde estarán después. Y si puedes predecir dónde estarán...

—¡Puedo cazarlas! ¡Genial!

—Exactamente.

—Vale, vale, quizá las mates no estén tan mal después de todo. Aunque sigo sin ver adónde nos lleva todo este galimatías de las ondas...

—Eso es fácil: nos sirve para explicar las propiedades de las ondas de la luz y el sonido. Y a eso vamos.

Las ondas en la vida cotidiana: luz y sonido

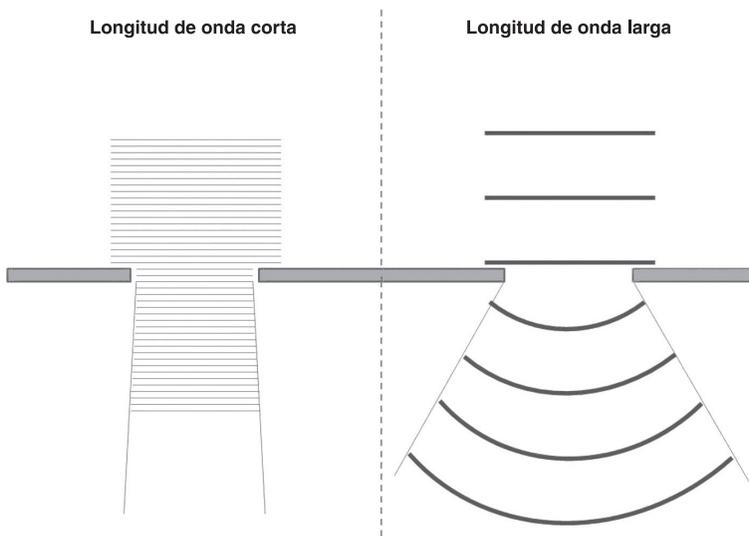
En la vida cotidiana, tratamos con dos tipos de ondas: la luz y el sonido. Aunque ambos son ejemplos de ondas, se comportan de manera muy diferente. Las razones de esas diferencias nos per-

mitirán arrojar algo de luz (perdón por el juego de palabras) a la cuestión de por qué no vemos perros rodeando un árbol por ambos lados al mismo tiempo.

Las ondas de sonido son ondas de presión en el aire. Cuando un perro ladra, expulsa aire por su boca y crea una vibración que viaja por el aire en todas direcciones. Este sonido llega hasta otro perro y provoca vibraciones en su tímpano; el cerebro las transforma en señales que se procesan como sonidos; el segundo perro reacciona ante ellos poniéndose a ladrar y produciendo a su vez más ondas, mientras los humanos que están con ellos acaban hartos de tanto ruido.

La luz es un tipo de onda muy diferente, un campo eléctrico oscilante y magnético que viaja por el espacio, incluso por el vacío del espacio exterior, lo que nos permite ver estrellas lejanas y galaxias. Cuando las ondas de luz llegan a la parte de detrás del ojo, se convierten en señales que el cerebro procesa para obtener una imagen del mundo que nos rodea.

La diferencia más importante entre luz y sonido en la vida cotidiana reside en su comportamiento cuando se topan con un



A la izquierda, una onda de longitud corta se encuentra con una abertura mucho más grande que su longitud de onda, de manera que las ondas continúan más o menos en línea recta. A la derecha, una onda con una longitud larga se encuentra con una abertura comparable a la longitud de onda, así que las ondas se difractan en un amplio abanico de direcciones.

obstáculo. Las ondas de luz viajan sólo en línea recta, mientras que las ondas de sonido parecen doblarse alrededor de los obstáculos. Por esta razón, un perro puede oír desde el comedor cómo una patata frita golpea contra el suelo de la cocina aunque no pueda verla.

La capacidad de las ondas de sonido para doblarse alrededor de las esquinas es un ejemplo de *difracción*: el comportamiento característico de las ondas al encontrarse con un obstáculo. Cuando una onda alcanza una barrera con una abertura, como una pared con una puerta abierta de la cocina al comedor, las ondas que pasan por la abertura no se limitan a avanzar en línea recta, sino que se abren en abanico hacia diferentes direcciones. La rapidez con la que se extiendan dependerá de la longitud de la onda y del tamaño de la abertura por la que tengan que pasar. Si la abertura es mucho más grande que la longitud de onda, habrá muy poca curvatura, pero si la abertura es semejante a la longitud de onda, las ondas se abrirán en abanico ocupando todo el ámbito disponible.

Asimismo, si las ondas de sonido se encuentran con un obstáculo como una silla o un árbol, se difractarán a su alrededor, siempre y cuando el objeto no sea mucho más grande que la longitud de onda. Por eso se necesita una pared gruesa para amortiguar el sonido de los ladridos de un perro, ya que las ondas de sonido se doblan alrededor de obstáculos más pequeños y llegan hasta las personas o los perros que están detrás de ellos.

Las ondas de sonidos en el aire tienen una longitud de onda de un metro más o menos, similar al tamaño de los obstáculos típicos, como puertas, ventanas o muebles. Como resultado, las ondas se difractan mucho y el sonido nos llega incluso a la vuelta de esquinas estrechas.

Por otro lado, las ondas de luz tienen una longitud de onda muy corta, de menos de la milésima parte de un milímetro. En un cabello, cabrían un centenar de longitudes de onda de luz visible. Cuando las ondas de luz se topan con los objetos cotidianos apenas se doblan, y por eso los objetos sólidos arrojan sombras oscuras. En los bordes del objeto se produce una pequeña difracción, y por este motivo los bordes de las sombras siempre son borrosos, pero la luz viaja mayoritariamente en línea recta, sin difracción visible.

Si no vemos que la luz se difracta como una onda, ¿cómo sabemos que es una onda? No vemos difracción en torno a los objetos cotidianos porque son demasiado grandes en comparación

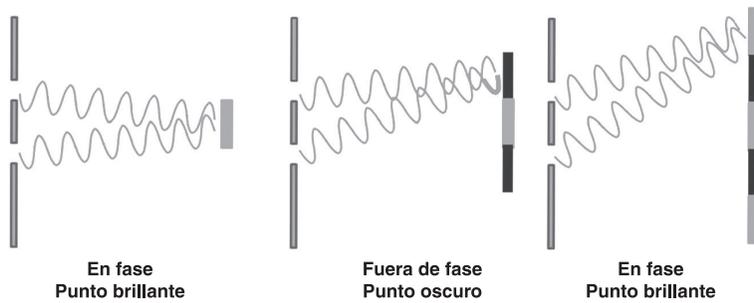


Ilustración de la difracción por una doble rendija. A la izquierda, las ondas de las dos rendijas diferentes recorren exactamente la misma distancia y llegan en fase para formar un punto brillante. En el centro, la onda de la rendija más baja recorre media longitud de onda extra (línea oscura), y llega fuera de fase con la onda de la rendija superior. Las dos se anulan y crean un punto oscuro en el patrón. A la derecha, la onda de la rendija más baja viaja una longitud de onda extra completa, y de nuevo se suma a la onda de la rendija superior para formar un punto brillante.

con la longitud de onda de la luz. No obstante, si observamos un obstáculo lo suficientemente pequeño, podremos apreciar evidencias inconfundibles de un comportamiento ondulatorio.

En 1799, un físico inglés llamado Thomas Young llevó a cabo el experimento definitivo para demostrar que la luz tenía naturaleza ondulatoria. Young enfocó un rayo de luz hacia una tarjeta con dos rendijas. Al observar la luz al otro lado de la tarjeta, no sólo vio una imagen de las dos rendijas, sino también un patrón de puntos brillantes y oscuros alternados.

El experimento de la doble rendija es una clara demostración de la difracción y la interferencia de las ondas de luz. La luz que pasa por cada una de las rendijas se difracta en diferentes direcciones, y las ondas de las dos rendijas se superponen. En cualquier punto dado, las ondas de las dos rendijas han recorrido diferentes distancias y han pasado por diferentes números de oscilaciones. En los puntos brillantes, las dos ondas están en fase, y se suman para dar una luz más brillante que la luz de cada una de las rendijas por sí mismas. En los puntos oscuros, las ondas están fuera de fase y se anulan mutuamente.

Antes del experimento de Young, se había debatido mucho sobre la naturaleza de la luz, ya que algunos físicos afirmaban que la luz era una onda, y otros (como Newton) defendían que la luz era un haz de pequeñas partículas. No obstante, la interferencia y

la difracción son fenómenos que sólo ocurren con ondas, así que después del experimento de Young (y los experimentos posteriores que realizó el físico francés Augustin Fresnel), todo el mundo se convenció de que la luz era una onda. Y nadie lo discutió en los cien años siguientes.

* * *

—Sigo sin entender qué tiene que ver todo eso con mi plan de correr por ambos lados de un árbol. No me interesa pasar por rendijas, lo que quiero es cazar conejos.

—Emmy, te aseguro que tiene mucho que ver. Piensa en lo que ocurre cuando colocas pequeños obstáculos sólidos delante de un haz de luz: se produce el mismo proceso básico. Quizá te resulte más fácil si te imaginas la luz que va por la izquierda y la luz que va por la derecha del obstáculo como si fueran las ondas de dos rendijas diferentes. Toman dos caminos hacia su destino, y así pueden estar en fase o fuera de fase cuando llegan. Obtienes un patrón de puntos brillantes y oscuros, igual que cuando usas rendijas.

—Ya. Supongo que eso tiene sentido. Entonces, ¿simplemente necesito conseguir que los conejos permanezcan, en los lugares donde están, en fase conmigo?

—No, debido a lo de la longitud de onda. Llegaremos a eso en un minuto. Primero necesito hablar sobre las partículas.

—De acuerdo, tendré paciencia, pero ¡intenta ir al grano!

El nacimiento de la física cuántica: la luz como una partícula

En 1900, el físico alemán Max Planck dio la primera pista de que existía un problema con el modelo ondulatorio de la luz. Planck estudiaba la radiación térmica emitida por todos los objetos. La emisión de la luz de los objetos calientes es un fenómeno muy común (el ejemplo más conocido es el resplandor rojo de una pieza de metal candente) y, por tanto, su explicación debería resultar sencilla. No obstante, llegó el siglo xx y los mejores físicos del siglo anterior no habían podido dar una solución al problema de cuánta luz de diferentes colores se emitía; es decir, todavía no se había explicado el «espectro» de la luz.

Planck sabía que el espectro tenía una forma muy particular, con mucha luz emitida a bajas frecuencias y muy poca a altas, y

cuantos, tres cuantos y demás, pero nunca uno y medio o dos y un cuarto. El nombre de estas unidades persistió y se aplicó a toda la teoría que surgió del truco desesperado de Planck.

Aunque a menudo se le otorga el mérito por inventarse la idea de los cuantos de luz, Planck nunca creyó realmente que la luz se propagara en cuantos discretos, y siempre esperó que alguien encontrara una manera más inteligente de derivar su fórmula sin tener que recurrir a un truco.

La primera persona que habló seriamente sobre la luz como una partícula cuántica fue Albert Einstein en 1905, que la usó para explicar la partícula fotoeléctrica. El *efecto fotoeléctrico* es otro efecto físico que aparentemente no debería costar describir: al iluminar un material metálico, se liberan electrones. Este hecho es la base de los sensores de luz simples y de los detectores de movimiento: cuando la luz recae sobre un sensor, libera los electrones del metal, que fluyen por un circuito. Cuando la cantidad de luz que recae sobre el sensor cambia, el circuito realiza alguna acción, como encender las luces cuando oscurece o abrir la puerta cuando un perro pasa por delante de un sensor.

El efecto fotoeléctrico es fácil de entender si se piensa en la luz como una onda que agita los átomos hasta que libera los electrones, igual que un perro agita una bolsa de golosinas hasta que salen despedidas por toda la cocina. Por desgracia, el modelo de onda resultó completamente erróneo, ya que predice que la energía de los electrones que salen de los átomos debería depender de la intensidad de la luz; es decir, cuanto más brillante es la luz, más fuerte es la agitación, y más rápidos deberían moverse los trozos que se desprenden. No obstante, los experimentos han demostrado que la energía depende de la frecuencia, la cual, según el modelo de onda, no debería importar. A bajas frecuencias, nunca se libera ningún electrón, por muy intensa que sea la agitación; mientras que a altas frecuencias, incluso una agitación suave produce electrones con bastante energía.

* * *

—¡Ay que ver! ¡Qué tontos sois los físicos!
—¿Pe... Perdona? ¿Y ahora por qué te da por llamarnos tontos?
—Bueno, ¡es evidente! Cualquier perro sabe eso. Cuando tienes una bolsa llena de golosinas, hay que agitarla tan rápido y fuerte como puedas. Así consigues sacarlas.

—Sí, bueno, ¿qué puedo decir? Los perros tienen un gran conocimiento intuitivo de la teoría cuántica.

—Te honra reconocerlo, y no te olvides de que también somos muy monos.

—Por supuesto que sí, Emmy, pero recuerda que el objetivo de los físicos es comprender por qué las golosinas salen despedidas cuando lo hacen.

—Allá vosotros. Los perros nos conformamos con poder comerlos.

Einstein explicó el efecto fotoeléctrico aplicando la fórmula de Planck a la luz. Describió un rayo de luz como una corriente de pequeñas partículas, cada una con una energía igual a la constante de Planck multiplicada por la frecuencia de la onda de luz (la misma regla usada para los «osciladores» de Planck). Cada fotón, nombre que se da ahora a estas partículas de luz, proporciona siempre una cantidad de energía fija según la frecuencia; y se requiere una cantidad mínima de energía para liberar un electrón. Si la energía de un solo fotón es mayor del mínimo requerido, se liberará el electrón y se llevará el resto de la energía del fotón con él. Cuanto más alta sea la frecuencia, más elevada será la energía de un solo fotón y más energía tendrán los electrones cuando se liberen, exactamente como demuestran los experimentos. Si la energía de un solo fotón es más baja que el mínimo necesario para liberar un electrón, no ocurre nada, lo que explica la falta de electrones en bajas frecuencias.²

Describir la luz como una partícula resultó muy controvertido en 1905, ya que contradecía cien años de estudios de física y planteaba un concepto totalmente diferente de la luz. Por tanto, en lugar de concebirla como una onda continua, semejante al agua servida en el cuenco de un perro, la luz es una corriente de partículas discretas, más similar a una ración de pienso servida en un cuenco. No obstante, cada una de esas partículas sigue teniendo una frecuencia asociada y de alguna manera se suman para dar un patrón de interferencia, como haría una onda.

En 1905, otros físicos discutieron el modelo de Einstein, y su aceptación planteó numerosas dificultades. El físico norteameri-

2. Es posible que te preguntes por qué dos fotones de baja energía juntos no proporcionan suficiente energía para liberar un electrón. Para eso sería necesario que los dos fotones golpearan el mismo electrón a la vez, lo que no ocurre prácticamente nunca.

cano Robert Millikan detestaba la idea de Einstein; así que, en 1916, realizó una serie de experimentos de efecto fotoeléctrico extremadamente precisos, con la intención de demostrar que Einstein se equivocaba.³ No obstante, sus resultados acabaron confirmando las predicciones de Einstein, pero tampoco consiguió que se aceptara la idea del fotón. En 1923, por fin se aceptó mayoritariamente esta concepción del fotón cuando Arthur Holly Compton realizó una famosa serie de experimentos con rayos X que demostraron sin lugar a dudas que la luz se comporta como una onda: demostró que los fotones transportan momento, y que ese momento se transfiere a otras partículas en colisiones.

Si tomamos la fórmula de Planck para obtener la energía de un solo fotón y la combinamos con ecuaciones de la relatividad especial de Einstein, llegamos a la conclusión de que un fotón de luz debería transportar una pequeña cantidad de momento, según la siguiente fórmula:

$$p = h/\lambda$$

donde p es el símbolo del momento y λ es la longitud de onda de la luz.

* * *

—¡Buf! ¡Y ahora a qué viene eso! ¿No decías que en este libro no hablaríamos de relatividad?

—No, no. Lo que dije exactamente es que este libro no es sobre la relatividad, que no es lo mismo. Pero tenemos que tratar algunas ideas de la teoría de la relatividad porque son importantes para entender la física cuántica.

—¿Sí? Pues yo no acabo de ver qué tiene que ver la relatividad con todo esto.

—Bueno, lo que dice la relatividad es que, como un fotón tiene energía, debe tener momento, aunque no tenga masa.

—Entonces... ¿tiene algo que ver con lo de $E = mc^2$?

—No, exactamente, pero es similar. Los fotones tienen mo-

3. Millikan pensó que el modelo de Einstein carecía de «cualquier tipo de fundamentos teóricos satisfactorios», y describió su éxito como «puramente empírico», lo que resulta bastante desagradable para cualquier físico. Irónicamente, estas citas son del primer párrafo del artículo en el que confirma las predicciones de la teoría.

mento por su energía del mismo modo que los objetos tienen energía debido a su masa. Por cierto, me has impresionado al referirte a esa ecuación.

—Por favor, cualquier perro de tres al cuarto conoce la fórmula de $E = mc^2$. ¡Cómo no voy a saberla yo, que soy una perra excepcional!

Un fotón con una longitud de onda pequeña tiene mucho momento, mientras que uno con una longitud de onda grande tiene muy poco. Esto significa que la interacción entre un fotón de luz y un objeto estacionario debería ser igual que una colisión entre dos partículas: el objeto estacionario gana algo de energía y de momento, y el fotón en movimiento, por contra, pierde una parte de ellos. No obstante, no llegamos a percibirlo porque el momento involucrado es muy bajo (la constante de Planck es un número muy pequeño), pero si observamos un objeto con una masa muy pequeña (como un electrón) y fotones con una longitud de onda muy corta (y, por tanto, con un momento relativamente alto), podemos detectar el cambio en el momento.

En 1923, Compton proyectó rayos X (que son sólo luz con una longitud de onda excepcionalmente corta, comparados con unos 500 nm de luz visible) con una longitud de onda inicial de 0,0709 nanómetros⁴ sobre un objetivo sólido. Cuando estudió la dispersión de los rayos X del objetivo, descubrió que su longitud de onda había aumentado, lo que indicaba una pérdida de momento (así, por ejemplo, los rayos X que se desviaban 90° de su dirección original tenían una longitud de onda de 0,0733 nm). Precisamente, esta pérdida de momento indica que la luz se comporta como una partícula: cuando un fotón de rayos X choca con un electrón más o menos estacionario de un objetivo, entrega parte de su momento al electrón, que empieza a moverse. Después de la colisión, el fotón tiene menos momento y, por tanto, una longitud de onda más larga, exactamente como observó Compton.

El momento que pierde también depende del ángulo en el que se desvía el fotón; de este modo, un fotón que colisiona contra un electrón no pierde demasiado momento, mientras que uno que rebota casi directamente hacia atrás pierde mucho. Cuando Compton midió la longitud de onda de fotones con diferentes

4. Un nanómetro es 10^{-9} metros, o la milmillonésima parte de un metro (0,000000001 m).

ángulos, comprobó que sus resultados encajaban con la predicción teórica, lo cual confirmó que el cambio se debía a las colisiones con los electrones, y no a ninguna otra causa.

Einstein, Millikan y Compton ganaron el Premio Nobel por demostrar que la luz tenía una naturaleza de partícula. Considerados conjuntamente, los experimentos de efecto fotoeléctrico de Millikan y los experimentos de dispersión de Compton fueron suficientes para que la mayoría de los físicos aceptaran la idea de que la luz está conformada como una corriente de partículas.⁵

No obstante, si la idea de que la luz tenía naturaleza de partícula resultó muy extraña, lo que vino después todavía lo fue más.

Electrones entrometidos: partículas como ondas

También en 1923, un estudiante de doctorado francés llamado Louis Victor Pierre Raymond de Broglie⁶ planteó una hipótesis radical al argumentar que debía existir una simetría entre luz y materia, y que, por tanto, una partícula material como un electrón debería tener longitud de onda. Al fin y al cabo, si la luz se comporta como partícula, ¿no deberían las partículas comportarse como ondas?

De Broglie sugirió que igual que un fotón tiene un momento determinado por su longitud de onda, un objeto material como un electrón debería tener una longitud de onda determinada por su momento:

$$\lambda = h/p$$

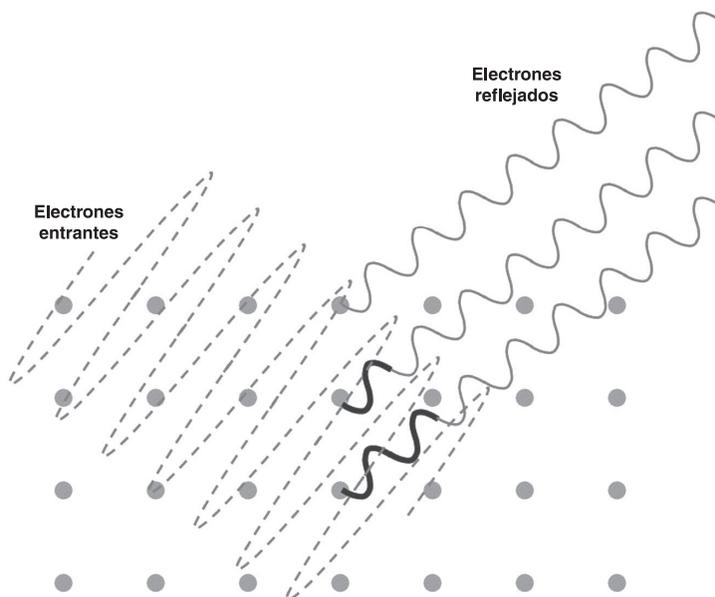
5. Unos cuantos teóricos se seguían resistiendo a la idea de los fotones, porque incluso el efecto Compton puede explicarse sin ellos, aunque resulta muy complicado. No obstante, en 1977, Kimble, Dagenais y Mandel realizaron un experimento para estudiar la luz emitida por átomos simples, y supuso la prueba irrefutable de la existencia de fotones. El intervalo de 72 años entre la propuesta de Einstein y su aceptación final demuestra la resistencia de los físicos a aceptar ideas nuevas. De hecho, puede ser tan difícil conseguir que un físico renuncie a un modelo aceptado como quitarle un hueso a un perro.

6. La pronunciación correcta del apellido de Louis de Broglie (su retahíla de nombre refleja su origen aristocrático, pues era el séptimo duque de Broglie) causa mucha confusión entre los físicos americanos. He oído opciones como «de-BRO-li», «de-BRO-gli» o «de-BROY-li», entre otros. La correcta pronunciación francesa aparentemente es algo parecido a «de-BROY», haciendo rodar la «r» para que suene francés.

que es simplemente la fórmula para obtener el momento de un fotón (v. p. 31) invertida para obtener la longitud de onda. La idea posee una elegancia matemática que gustó a los físicos teóricos, incluso en 1923; no obstante, también podía parecer una tontería más que evidente, pues no había ningún signo de que los objetos sólidos se comportaran como ondas. Cuando De Broglie presentó su idea como parte de su tesis doctoral, nadie supo cómo reaccionar. Sus profesores ni siquiera estaban seguros de si debían darle el título o no, así que le enseñó su tesis a Einstein, quien la calificó de brillante, y De Broglie consiguió su doctorado. Sin embargo, su teoría de la naturaleza ondulatoria de los electrones tuvo pocos partidarios hasta que dos experimentos a finales de la segunda década del siglo xx aportaron pruebas irrefutables de que los electrones se comportaban como ondas.

En 1927, dos físicos norteamericanos, Clinton Davisson y Lester Germer, realizaron un experimento que consistía en proyectar electrones contra un cristal de níquel para registrar los diferentes ángulos en los que se difractaban. La sorpresa llegó cuando su detector registró que un gran número de electrones se desviaban en un ángulo particular. Este misterioso resultado se explicó con el descubrimiento de la difracción ondulatoria de los electrones, que se difractaban sobre diferentes filas de átomos del cristal de níquel. El haz de electrones penetró en el níquel, parte de los electrones rebotaron sobre la primera serie de átomos del cristal de níquel,⁷ mientras que otros lo hicieron sobre la segunda o la tercera. Los electrones que se difractaban sobre estas filas de átomos se comportaban como ondas, ya que las ondas que rebotaban sobre átomos a más profundidad del cristal recorrían una mayor distancia al salir que las que lo hacían sobre átomos que estaban más cerca de la superficie. Asimismo, estas ondas interferían unas con otras, como las ondas de luz que pasaban a través de las diferentes rendijas del experimento de Young, sólo que en este caso había muchas rendijas, y no sólo dos. En la mayoría de ocasiones, las ondas reflejadas estaban fuera de fase y se anulaban mutuamente. No obstante, en ciertos ángulos, la distancia recorrida fue exactamente la correcta para que las ondas se sumaran en fase y

7. «Cristal», para un físico, denomina cualquier sólido con una disposición regular y ordenada de átomos. Esto incluye las cosas claras y brillantes que normalmente asociamos con la palabra, pero también muchos metales y otras sustancias.



Difracción de electrones sobre un cristal de níquel. Un haz de electrones (línea punteada) penetra en un cristal regular de átomos, y partes de la onda (electrones individuales) rebotan sobre diferentes átomos del cristal. Los electrones que se difractan desde más profundidad recorren una distancia más larga al salir (línea oscura), pero en ciertos ángulos, esa distancia es un múltiplo de una longitud de onda completa, y las ondas que salen del cristal se suman en fase para producir el punto brillante que vieron Davisson y Germer.

produjeran un punto brillante, que Davisson y Germer describieron como un gran incremento en el número de electrones reflejados en ese ángulo. Por tanto, la fórmula de De Broglie predice perfectamente el resultado de los experimentos de Davisson y Germer al asignar una longitud de onda al electrón.⁸

* * *

8. Irónicamente, Davisson y Germer consiguieron tener éxito sólo porque rompieron una pieza de su equipo. No observaron ninguna difracción en los primeros experimentos que realizaron, porque su objetivo de níquel estaba hecho de muchos cristales pequeños, cada uno de los cuales producía un patrón de interferencia diferente, y los puntos brillantes de los diferentes patrones se confundían. Entonces, de forma accidental, dejaron que entrara aire en su sistema de vacío. Al reparar el daño, fundieron el objetivo y volvió a cristalizarse en un solo cristal grande, que produjo un patrón de difracción único y claro. A veces, lo mejor que puede hacer un físico es romper algo importante.

—Espera, no tan rápido. No estoy segura de haber entendido lo último que has dicho. Si hay muchas rendijas, ¿no debería de haber muchos puntos?

—En realidad, no. Cuando sumas dos ondas, sigues obteniendo un patrón de puntos brillantes y oscuros; pero cuando añades más rendijas, los puntos brillantes se vuelven aún más brillantes y estrechos, y los puntos oscuros, más oscuros y anchos.

—Entonces, si atravieso corriendo la valla del patio de los vecinos, ¿seré más brillante y estrecha al otro lado?

—¿Cómo? Bueno, Emmy, si lo hicieras, probablemente serías más estrecha al otro lado, pero no te recomiendo que lo hagas. En cualquier caso, lo importante de todo esto es que las «rendijas» que Davisson y Germer usaban estaban tan cerca unas de otras que sólo podían ver un punto brillante en la región donde pusieron su detector. Con un cristal diferente, o electrones que se hubieran movido más rápido, habrían visto más puntos.

Más o menos en la misma época, en la Universidad de Aberdeen, George Paget Thomson realizó una serie de experimentos en los que lanzó haces de electrones sobre películas delgadas de metal y observó patrones de difracción en los electrones transmitidos, que se producían básicamente del mismo modo que los del experimento de Davisson y Germer. Los patrones de difracción como los de Davisson y Germer y los de Thomson son una característica inconfundible del comportamiento de las ondas, tal y como Thomas Young demostró en 1799. Por tanto, sus experimentos demostraron que De Broglie tenía razón y que los electrones tienen naturaleza ondulatoria. De Broglie ganó el Premio Nobel de Física en 1929 por su predicción, y Davisson y Thomson compartieron un Premio Nobel en 1937 por demostrar la naturaleza ondulatoria de los electrones.⁹

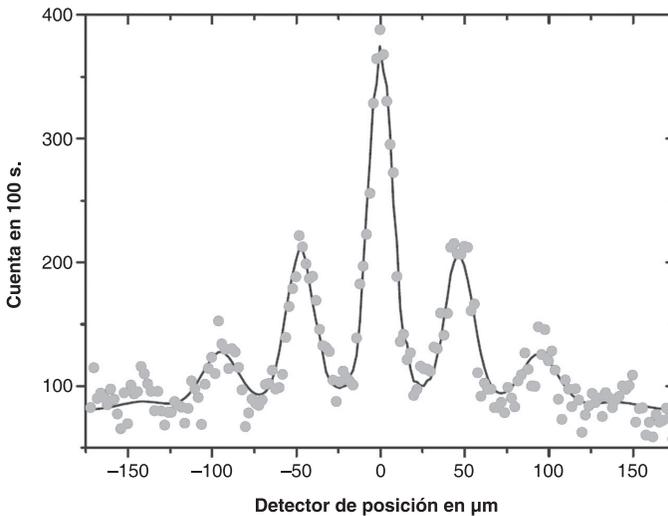
Siguiendo la senda abierta por los experimentos de Davisson y Germer y los de Thomson, la ciencia demostró que todas las partículas subatómicas se comportan como ondas: los rayos de protones y neutrones se difractan del mismo modo que los electrones. De hecho, la difracción de neutrones es ahora una herra-

9. En este sentido, se produce una curiosa anécdota en la historia de los Nobel, ya que el padre de Thomson, J. J. Thomson, de Cambridge, ganó el Premio Nobel de Física en 1906 por haber demostrado la naturaleza de partícula del electrón. Sin duda, las conversaciones de sobremesa en el hogar de los Thomson debían de ser interesantes.

de una mil millonésima parte de la longitud de onda de los electrones de Davisson y Germer. ¿Qué supone esa longitud de onda en relación con el tamaño de un árbol? Pues bien, la longitud de onda de un perro comparada con la distancia que hay entre dos átomos es como la distancia entre dos átomos comparada con el diámetro del sistema solar. Por tanto, es imposible ver la onda asociada a un perro difractarse sobre un cristal de níquel, y mucho menos verlo correr por ambos lados de un árbol al mismo tiempo.

Es evidente que hay mucha diferencia entre un haz de electrones y un perro; no obstante, cabría preguntarse cuál es el objeto material más grande cuyo comportamiento de onda se ha podido observar.

En 1999, el grupo de investigación de la Universidad de Viena dirigido por el doctor Anton Zeilinger observó difracción e interferencia con moléculas compuestas por 60 átomos de carbono unidos formando una especie de pelota de fútbol pequeña, cada uno de ellos con una masa de un millón de veces la de un electrón. Dispararon esas moléculas con forma de pelota de fútbol



*Un patrón de interferencia producido por un haz de electrones al pasar por una selección de rendijas estrechas. Las elevaciones que se aprecian a ambos lados del pico central son el resultado de la difracción y la interferencia de las moléculas al pasar a través de las rendijas. (Reproducido con permiso de O. Nairz, M. Arndt y A. Zeilinger, *Am J Phys.*, 2003; 71: 319. Copyright 2003, American Association of Physic Teachers.)*

contra un detector, y cuando observaron la distribución de moléculas, vieron un único haz estrecho. Entonces, enviaron el haz a través de una placa de silicona con una serie de pequeñas rendijas practicadas en ella, y observaron la distribución de las moléculas tras pasar por las rendijas. Con las rendijas colocadas, el estrecho pico inicial se hizo más ancho, y se formaron algunas «elevaciones» a ambos lados. Esas elevaciones, como los puntos brillantes y oscuros que vio Thomas Young brillando a través de una rendija doble, o los picos de difracción de electrones observados por Davisson y Germer, son una característica inconfundible de comportamiento ondulatorio. Las moléculas que pasan a través de las rendijas se extienden e interfieren unas con otras, igual que las ondas de luz.

En los experimentos siguientes, el grupo de Zeilinger demostró la difracción de moléculas incluso mayores, añadiendo 48 átomos de fluorina a cada una de las moléculas originales de 60 átomos de carbono. Estas moléculas tienen una masa de unos tres millones de veces la masa de un electrón, y todavía ostenta el récord de ser el objeto más grande cuya naturaleza ondulatoria se ha observado directamente.

Por tanto, conforme aumenta la masa de una partícula, su longitud de onda se acorta cada vez más y resulta más difícil ver el comportamiento ondulatorio directamente. Ésta es la razón por la que nadie ha visto a un perro difractarse en torno a un árbol y por la que tardaremos en verlo. No obstante, en términos físicos, un perro no es nada más que una colección de partículas biológicas, iguales a las que el grupo de Zeilinger empleó en sus experimentos, de manera que podemos afirmar que un perro tiene naturaleza de onda, igual que todo lo demás.

—Pero entonces, ¿qué son realmente?

—¿A qué te refieres?

—Bueno, después de todo, sigo sin saber si los electrones son en realidad partículas que actúan como ondas, o si los fotones son ondas que actúan como partículas.

—Pequeña, tu problema es que no haces las preguntas correctas. O, más bien, das respuestas erróneas. Si esto fuera un concurso de la tele, deberías haber elegido la puerta número tres para llevarte el premio: no son ni una cosa ni la otra, los electrones y los fotones son un tercer tipo de objeto, que no es sólo ni una onda ni una partícula, y que tiene propiedades de onda y de partícula a la vez.

—¡Ah! Ya lo entiendo, ¡es un ardillonejo!

—¿Un ardiqué?

—Un ardillonejo..., ¡claro! Un animal mitad ardilla, mitad conejo.

—Ya... me gusta más el nombre de «partícula cuántica», pero al menos creo que has entendido la idea básica. Y no olvides que todo el universo está constituido por esas partículas cuánticas.

—¡Buf! Eso sí que es raro.

—Pues prepárate, esto es sólo el principio...