

El efecto fotoeléctrico y la naturaleza dual de la materia

Gerardo Costea

En general, a todos nos parece una obviedad que una partícula y una onda son cosas claramente distintas y que poco tienen que ver la una con la otra. Una partícula es una entidad con una masa (generalmente), y que se desplaza en el espacio siguiendo una trayectoria determinada cuando se mueve a una velocidad dada y rebota cuando choca contra otra partícula. Podríamos comparar una pelota o una piedra con una partícula. De hecho están formadas de partículas. Nosotros estamos formados de partículas. En cambio, una onda es algo claramente diferente de una partícula. Una onda es una perturbación, tiene una longitud de onda, una frecuencia, puede interferir con otras ondas, difractarse al hallar un obstáculo... El sonido es una onda, podemos ver ondas recorriendo una cuerda cuando movemos el cabo de arriba abajo con una frecuencia determinada. Se ve que son cosas diferentes.

La luz... ¿onda o partícula?

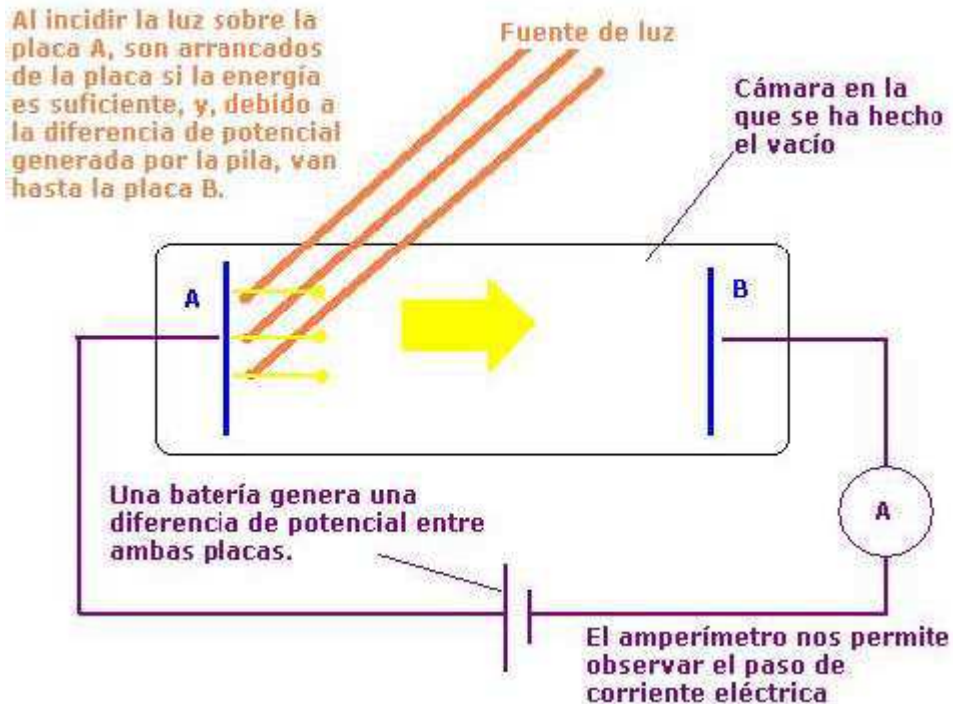
La naturaleza de la luz fue uno de los grandes enigmas de la ciencia hasta hace menos de un siglo. Hubo quienes defendieron que un rayo de luz está compuesto por partículas, como Isaac Newton, otros defendían que era una onda, y postulaban un medio llamado éter a través del cual ésta podría desplazarse. La gran autoridad de Newton implicó que durante mucho tiempo se aceptara la naturaleza corpuscular de la luz (es decir, se creía que estaba hecha de partículas), pero experimentos posteriores refutaron, al menos aparentemente, esa teoría: se lograron reproducir fenómenos como la difracción, propios de ondas. Esta teoría sería la más difundida cuando Einstein entró en escena.

A principios del siglo pasado había un problema relacionado con la luz que traía de cabeza a los físicos de la época. Se trataba de un fenómeno para el cual nadie lograba hallar explicación: el efecto fotoeléctrico. Se observó que es posible “arrancar” electrones a metales irradiándolos con ondas electromagnéticas. Esto se debe a que las radiaciones transmiten una energía a dichas partículas, de modo que al irradiar al electrón, éste acumularía la energía necesaria desprenderse del metal. No obstante el fenómeno tenía algunas extrañezas inexplicables. Los electrones sólo saltaban si se les irradiaba con luz de una frecuencia determinada o superior. Cuanto mayor sea la frecuencia de la luz, más energética es. Era de esperar que al irradiar electrones con luz poco energética durante el tiempo suficiente, estos fueran acumulando energía hasta tener la suficiente para poder dar el saltito hacia la libertad. Pero esto no ocurría. Y además, para complicar la cosa, la intensidad lumínica no influía en la energía transmitida a los electrones. Los electrones saltaban a la misma velocidad (es decir, con la misma energía) independientemente de la intensidad de la luz, fuera bajísima o fuera altísima, siempre y cuando la frecuencia fuera la adecuada. Sin embargo la intensidad era proporcional a la cantidad de electrones que eran arrancados del metal.

A los porqués surgidos de este problema les puso respuesta en 1905 Albert Einstein, por lo que recibiría más tarde el premio Nobel. Para explicar el efecto fotoeléctrico, Einstein lanzó la teoría de que la luz está formada por partículas sin masa pero con una cantidad de movimiento y energía, y son estas partículas las que transmiten energía al electrón. Esas partículas son los *fonones*, del griego *photos*, luz, y halló que la energía de éstas viene dada por una ecuación llamada “Ecuación de Einstein”:

$$E=hf$$

donde h es un número llamado *Constante de Planck*, con un valor determinado e invariable, y f es la frecuencia de la onda luminosa.



Un electrón sobre el que incide un fotón puede o no absorberlo. Si lo absorbe, tomará toda su energía. El electrón no va absorbiendo energía de la luz de forma constante y continuada, sino que asimila un fotón entero. O todo o nada. Si la energía del fotón basta para arrancar el electrón del átomo, el electrón salta, si no basta, el electrón no salta. Además, si el fotón tiene más energía de la necesaria, el electrón saltará llevando una energía adicional en forma de movimiento (energía cinética), que viene a ser la energía “sobrante”, la que no ha usado para escapar del núcleo pero que el fotón le ha regalado. Así pues, la energía no es acumulativa, como hasta entonces se pensaba: los electrones no van absorbiendo energía de la luz poco a poco hasta tener la suficiente para ser arrancados del metal. La transmisión de energía a un electrón se hace a través de un fotón, y es por ello que es necesario que la luz tenga una frecuencia determinada; porque, como podemos ver en la Ecuación de Einstein, la energía del fotón depende de su frecuencia. Y cuanto más intensa sea la luz, más cantidad de fotones, y por tanto más electrones podrán escapar del metal. Pero lo verdaderamente revolucionario en esta teoría no fué la explicación del fenómeno, sino que Einstein no se limitó a decir que la luz es una partícula. Einstein dijo que la luz posee naturaleza dual: puede ser descrita como onda y como partícula, y, de hecho, en determinadas ocasiones se comporta como la una, y en otras como la otra. Se puede decir que la luz es partícula y onda al mismo tiempo.

¿Y la materia?

No muchos años más tarde, el francés Louis de Broglie propondría en su doctorado que si la luz era una partícula y una onda a la vez, también el resto de partículas podrían serlo. El problema para detectar la onda de las partículas es que la longitud de ésta es inversamente proporcional a la masa y a la velocidad de la partícula. Por tanto, por poco grande que fuera la masa de una partícula, su onda ya era demasiado pequeña para ser observada. No obstante esto se lograría poco después en un experimento con unas partículas lo suficientemente poco masivas como para tener una onda “visible” y bastante manejables: los electrones. En el experimento se observó que los electrones tenían un comportamiento exclusivo de las ondas: la difracción. No explicaré ahora en qué consiste éste fenómeno, pero el caso es que bastó para ver que las partículas también pueden ser descritas como ondas, con su frecuencia y su longitud de onda, demostrándose así la dualidad onda-partícula.

Todo esto no significa que cuando una partícula se mueve está “arrastrando” una onda tras de ella, sino que puede ser descrita como onda: de igual modo que puede describirse asignándole toda

una serie de características propias de las partículas (masa, velocidad...), se puede describir utilizando una función de onda, es decir, también observamos las características de las ondas. Y si resulta que tiene las características que definen a una onda... es que es una onda. Lo que estamos acostumbrados a imaginar como simples partículas son entes de naturaleza dual que se comportarán como onda o como partícula según las circunstancias.

Ejercicio para los curiosos

Si queréis calcular vuestra longitud de onda dividid la *Constante de Planck*, $h=6,63 \times 10^{-34}$ (seis coma sesentaytres por diez elevado a la menos trentaycuatro) entre el número resultante de multiplicar vuestra masa en kg. por vuestra velocidad en metros por segundo. Si vais en un vehículo y leéis vuestra velocidad en km/h, y resulta que el día en que explicaron en el colegio como pasar de km/h a m/s hacíais pellas (no me digáis que estabais enfermos), multiplicad la velocidad por 1.000 (un kilómetro equivale a 1.000 metros) y dividid el resultado entre 3.600 (una hora tiene 3.600 segundos).

Si además os interesa saber cuál es vuestra frecuencia, podeis obtenerla dividiendo la velocidad de la luz, $c= 299792458$ m/s entre vuestra longitud de onda.

El sentido común es el conjunto de los prejuicios que se adquieren antes de los dieciocho años

Albert Einstein