

Sobre la Naturaleza de la Luz.

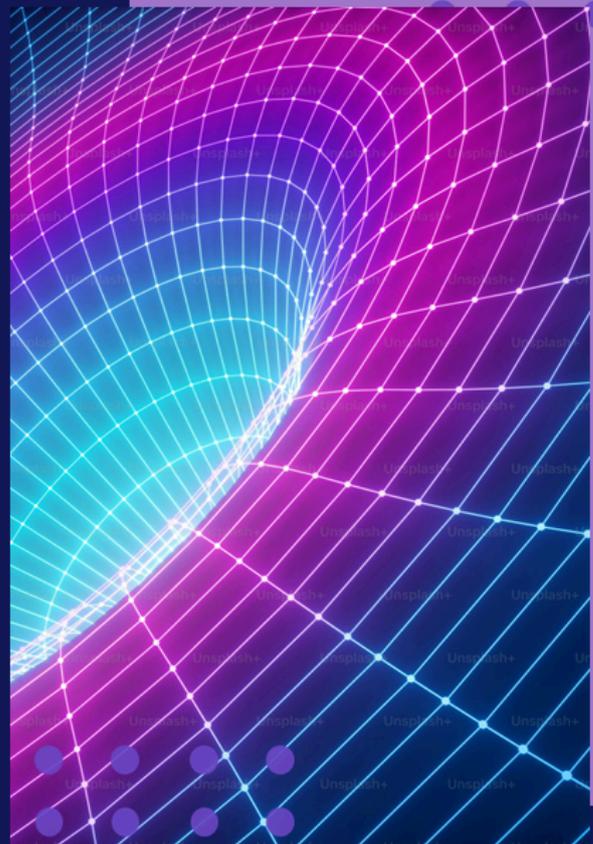
El Efecto Fotoeléctrico

Escrito por Luis Alberto Torres Luna

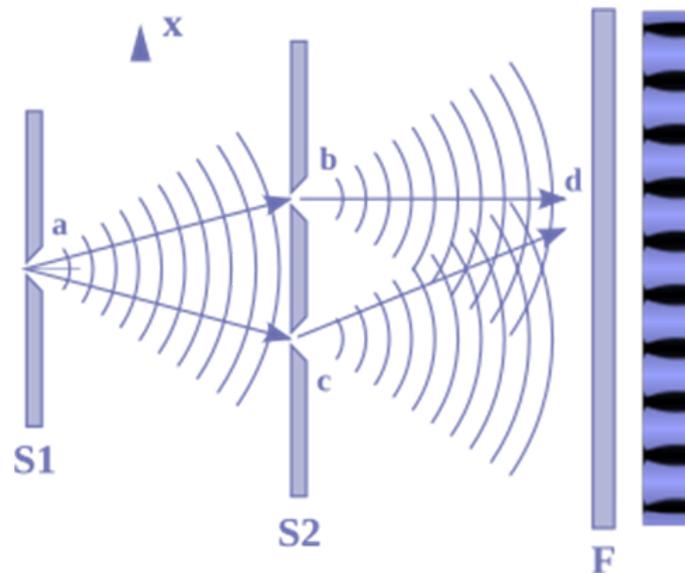
*¿Qué es la luz? ¿Cuál es su naturaleza?
¿Cómo interactúa la radiación con la
materia?*

En 1905, Albert Einstein propondría un mecanismo de interacción entre radiación y materia y toda una serie de fenómenos en su trabajo titulado “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz” que pondría en jaque a la electrodinámica clásica de Maxwell y reforzaría una novedosa teoría propuesta por Max Planck en el año 1900. Se avecinaba una nueva física, la física cuántica.

Remontémonos a la segunda mitad del s. XVII, Isaac Newton había sentado las bases de su tratado sobre los fenómenos ópticos. Él pensaba que la luz era un conjunto de chorros de corpúsculos que viajaban por el medio, aunque anterior a Newton, científicos como Huygens y Hooke se oponían postulando que la luz era más bien una perturbación del medio, una onda. Entonces, ¿la luz es un corpúsculo o una onda? Los fenómenos ópticos de la difracción dejaban claro que la luz tenía comportamientos ondulatorios, el experimento de la doble rendija de Thomas Young a principios del s. XIX hacía ver cómo



la luz que pasaba por dos placas paralelas cada una con rendijas estrechas dejaba ver en una pantalla detrás de estas placas franjas brillantes u oscuras, como si la luz, al difractarse, se comportara como ondas que interferían constructiva y destructivamente, superponiéndose unas con otras en ciertos lugares del espacio.



Esquema del experimento de Young. Se bosquejan dos rendijas, como en el experimento moderno de la doble rendija.

Colaboradores de los proyectos Wikimedia. (2004, 27 de octubre). Experimento de la doble rendija - Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.m.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_la_doble_rendija

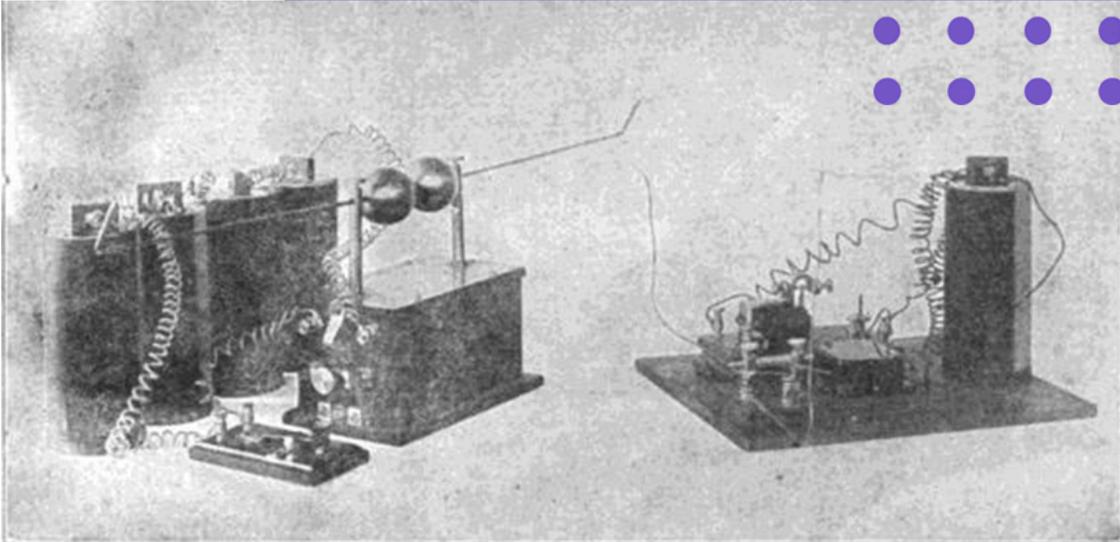
Años más tarde, en el estudio de la electricidad y el magnetismo, el trabajo de científicos como Ørsted, Ampère, Faraday, Ohm, Henry, Maxwell y Hertz, culminó en la conclusión de que se necesitaba de un medio de comunicación para los fenómenos electromagnéticos, se sabía que cuando los campos eléctrico o magnético cambian a lo largo del tiempo, uno afecta al otro y viceversa, como se relacionan en los principios de Ampère-Maxwell y de Faraday-Lenz. Por esto, Maxwell pensó que las perturbaciones mutuas entre los campos eléctricos y magnéticos a lo largo del tiempo generaban una perturbación combinada que se propagaría como una “reacción en cadena”, y al percatarse de que estos campos tenían comportamientos propios de una onda, la velocidad de propagación de estas ondas era una conocida, ¡la velocidad de la luz! Aproximadamente $2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$.



Una vez más se tenía un fuerte argumento para la postura de que la luz era una onda, esta vez la luz era radiación causada por campos eléctricos y magnéticos que se mueven y evolucionan a lo largo del tiempo como lo hace una onda en algún medio, en este caso, como una onda electromagnética.

El gran Heinrich Rudolf Hertz fue el primero en demostrar experimentalmente que las ondas electromagnéticas existen. Para esto, usó una bobina de rumbos, para producir una gran diferencia de potencial eléctrico, que conectó a un dispositivo formado por dos varillas de cobre cada una con una pequeña esfera en un extremo y una esfera de mayor tamaño en el lado contrario, que servían como condensadores para almacenar carga eléctrica.

En cierto momento, la diferencia de potencial eléctrico generaba un chispazo entre las esferas pequeñas, por lo que era evidente que se generaba un campo eléctrico variable en ese lugar, es decir, este dispositivo generaba ondas electromagnéticas, Hertz lo llamó oscilador. Luego, suponiendo que estas ondas electromagnéticas eran generadas y emitidas, construyó un receptor que colocó a cierta distancia del emisor. Cuando recibiera una onda electromagnética el receptor también tenía que generar un chispazo, lo hacía. Tanto los experimento como la teoría indicaban rotundamente que la luz tenía la misma naturaleza que la radiación electromagnética.



Dispositivo experimental de Hertz para la generación y detección de ondas electromagnéticas.
Victor H. Laughter (1909) Operator's Wireless Telegraph and Telephone Handbook, Frederick J. Drake C Co., Chicago, p. 103, fig. 56

Entonces, ¿la luz era definitivamente de carácter ondulatorio? Pues no, la disputa revivió cuando el mismo Hertz descubrió que la carga eléctrica de un objeto cambiaba cuando se irradiaba con luz ultravioleta y que este emitía electrones, esto es el **efecto fotoeléctrico**. ¿Por qué sucedía esto? ¿en qué afectaba esto al problema inicial sobre la naturaleza de la luz? En 1900, al estudiar el problema del cuerpo negro, Max Planck ya proponía que dentro del cuerpo negro los osciladores emitían y absorbían radiación de frecuencia ν en cada ocasión en que se saltaba de un estado energético a otro, y que cada pequeño paquete de energía de la radiación emitida o absorbida $h\nu$ es llamado **cuanto**, de modo que la energía de estas radiaciones estaba dada por $\varepsilon = nh\nu$, que solo puede tomar valores enteros del cuanto $h\nu$.

En ese entonces, la teoría clásica ya comenzaba a fallar, pues sus predicciones sobre el efecto fotoeléctrico no coincidían en absoluto con las observaciones experimentales. Se pensaba que la energía absorbida por los átomos del material irradiado por luz monocromática debía aumentar con la intensidad de la luz, y que la luz de cualquier frecuencia debía ser capaz de provocar la emisión de electrones. Además, según la teoría, los electrones absorbían la energía

de la luz continuamente sin hacer saltos entre niveles de energía, entonces el tiempo en el que se emitían electrones era mayor cuanto menor fuera la intensidad de la luz incidente y viceversa.

Posteriormente, en 1905, Albert Einstein retomaría el problema de Hertz y, casi como un tributo a Planck, daría la siguiente explicación sobre el efecto fotoeléctrico:

Al irradiar un objeto con luz monocromática, esta, como una onda, lleva cuantos de energía localizados puntualmente en el espacio que sólo pueden ser absorbidos o generados como un todo. Estos cuantos son capaces de excitar a los átomos de la superficie del objeto, de manera que si la energía del cuanto debida a la frecuencia de la luz, $h\nu$, era mayor al trabajo necesario ϕ para expulsar un electrón de su átomo y que lleve energía cinética máxima, entonces la radiación incidente causaría la emisión de electrones del objeto, llamados fotoelectrones, provocando la ionización de los átomos del objeto. Tiempo después, el cuanto de luz se llamaría **fotón**, del griego phōs.

Esta propuesta encajaría con la experimentación, coincidiendo en que la emisión de fotoelectrones no depende de la intensidad de la radiación incidente sobre el objeto, sino de su frecuencia, que no se emiten fotoelectrones si la frecuencia de la luz no supera un umbral llamado frecuencia de corte, una cantidad característica de cada material, y que el tiempo de emisión de fotoelectrones es casi instantáneo, del orden de 10^{-9} segundos (un segundo dividido en mil millones partes iguales). Y ahora, ¿la luz qué es, onda o partícula? Pues por raro que suene, es ambas, la luz como onda electromagnética transporta cuantos de energía, fotones, partículas.

La naturaleza terminó con nuestro conflicto y nos mostró que la luz tiene un comportamiento dual, esto es la **dualidad onda-partícula**. Cuando la luz presenta comportamientos ondulatorios no presenta corpusculares y viceversa.

Por el principio de la conservación de la energía, el efecto fotoeléctrico se describe por

$$h\nu = \phi + K_{m\acute{a}x} \quad K_{m\acute{a}x} = h\nu - \phi$$

La energía del fotón incidente se transforma en energía y trabajo para mover al electrón que incide.



Donde $h\nu$ es la energía del fotón que incide con un electrón, ϕ es la llamada función de trabajo del material, que es la cantidad de trabajo necesaria para emitir el electrón incidido y $K_{m\acute{a}x}$ es la energía cinética máxima que puede adquirir el electrón incidido.

Actualmente, la nomenclatura para el efecto fotoeléctrico distingue entre efecto fotoeléctrico interno y externo, pues según la energía del fotón incidente sobre un electrón del material irradiado, sucederá uno u otro fenómeno. El efecto fotoeléctrico interno es cuando la radiación electromagnética incidente sobre la superficie del objeto irradiado excita a los electrones de la banda de valencia y estos se elevan a la banda de conducción, provocando un cambio en la conductividad eléctrica del material sin emisión de fotoelectrones. Este fenómeno natural es llamado fotoconductividad. Por otra parte, es de mayor interés el efecto fotoeléctrico externo, cuando la onda electromagnética incidente tiene una frecuencia ν por encima del umbral de la frecuencia de corte ν_c de modo que el electrón con el que incide adquiere una energía

cinética $K_{\text{máx}} > 0$ y es emitido. Cuando el electrón no adquiere energía cinética significa que la frecuencia de la luz ν es igual a la frecuencia de corte ν_c , entonces $h\nu_c - \phi = 0$ y la frecuencia de corte es $\nu_c = \phi/h$. Para la emisión de fotoelectrones, la frecuencia de la luz debe superar esta frecuencia de corte. Además, es posible medir experimentalmente la energía cinética máxima, pues sabiendo que el trabajo realizado sobre un electrón con carga eléctrica $|e|$ debido a una diferencia de potencial eléctrico V es $W = e\Delta V$ y este trabajo, debido al teorema del trabajo-energía, es igual al cambio de energía cinética de una partícula. Si se construye un dispositivo experimental en el que se suministre una diferencia de potencial que frene completamente a la corriente eléctrica del dispositivo, de modo que cuando se alcance esta diferencia de potencial de frenado V_f , la energía disipada es igual a la energía cinética máxima de los electrones en movimiento, entonces $K_{\text{máx}} = eV_f$. Con esto, obtenemos la ecuación experimental que describe al efecto fotoeléctrico

$$eV_f = h\nu - \phi$$

Finalmente, la luz tiene comportamientos corpusculares y ondulatorios ¡problema resuelto! ¿o no? Siempre hay que tomar una postura falsacionista respecto a nuestras hipótesis, incluso sobre aquello de lo que tengamos “certeza”. ¿Cómo puede ser la luz una partícula y una onda? ¿No es acaso paradójico? Pues por paradójico que parezca, funciona. Es lo que la naturaleza nos ha hecho entender. Los esfuerzos por entender al universo nos han llevado a fuertes teorías como la teoría cuántica de campos (QFT, por sus siglas en inglés), un marco de trabajo que reúne a la física relativista con la mecánica cuántica para describir de manera más precisa lo que, a hombros de gigantes, Newton y el resto de grandes científicos intentaron durante siglos.

La física cuántica fue un gran cambio de paradigma; superconductores, computación cuántica, puntos cuánticos, el láser, la resonancia magnética, el microscopio electrónico... Todo eso y más se puede hacer entendiendo y observando a la naturaleza.