

# Radiación de cuerpo negro y efecto fotoeléctrico

## Introducción

A finales del siglo XIX, la física clásica chocó con dos fenómenos inexplicables: la radiación de cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la luz que incide sobre él y, en equilibrio térmico, emite radiación con un espectro de energía que sólo depende de su temperatura. Los intentos por describirlo con las leyes de Maxwell y la estadística clásica conducían a la “catástrofe ultravioleta”, una predicción absurda de energía infinita en frecuencias muy altas. En 1900, Max Planck propuso que la energía emitida por dicho cuerpo negro se podía describir como "vibraciones" u "oscilaciones" de la radiación electromagnética y que esta estaba “cuantizada”. Es decir, estaba compuesta por paquetes de energía discretos proporcionales a su frecuencia  $f$  y con una constante de proporcionalidad que hoy lleva su nombre,  $h$ , a través de la siguiente ecuación  $E = hf$ .

Pocos años después, en 1905, Albert Einstein abordó el otro misterio: al iluminar un metal con luz monocromática (luz que posee una única frecuencia: roja, verde, etc.), los electrones se liberan sólo si la frecuencia supera cierto umbral, y lo hacen de forma instantánea, sin acumular energía. El llamado efecto fotoeléctrico. La física ondulatoria no podía explicar ni ese umbral ni la inmediatez. Einstein propuso que la luz misma estaba compuesta de paquetes discretos de energía  $hf$ , y que cada paquete interactuaba individualmente con un electrón del metal. Con esto, elevó la idea de cuantización de Planck a una propiedad intrínseca de la luz, sentando la base del paradigma cuántico.

## Un poco de historia

La historia comienza en 1859, cuando Gustav Kirchhoff introduce el concepto de cuerpo negro, demostrando que su espectro de emisión depende solo de la temperatura. En 1900, los físicos se enfrentan a una crisis teórica: la ya mencionada catástrofe ultravioleta, cuya solución trajo Max Planck ese mismo año. Aunque su hipótesis resolvía el problema, Planck la consideró inicialmente una herramienta matemática, no una realidad física. Planck es considerado uno de los padres de la teoría cuántica y recibió por ello el premio Nobel en 1918.

En 1887, Heinrich Hertz, al experimentar con ondas electromagnéticas, observa que la luz ultravioleta facilita la chispa entre electrodos. Sin saberlo, estaba observando el primer indicio experimental del efecto fotoeléctrico, en el que la luz induce la emisión de electrones. En 1902, Philipp Lenard demuestra que solo la luz por encima de cierta frecuencia umbral puede liberar electrones, y que su energía depende de la frecuencia, no de la intensidad. Estos hechos contradicen la teoría ondulatoria clásica.

En 1905, Albert Einstein propone que la luz está compuesta por partículas de energía (fotones), explicando el efecto fotoeléctrico. En 1916, Robert Millikan, pese a su escepticismo inicial, confirma experimentalmente la fórmula de Einstein y determina con precisión la constante de Planck, validando la naturaleza cuántica de la luz. El término “fotón” es introducido más tarde, en 1926. Einstein recibiría el Nobel en 1921 por la explicación del efecto fotoeléctrico y no por su famosísima teoría de la relatividad.

## Explicación

Un cuerpo negro es un ideal: un objeto que absorbe toda la radiación (electromagnética) que incide sobre él y, en equilibrio térmico, emite un espectro característico que depende únicamente de su temperatura  $T$ . En la física clásica, se modela dicho cuerpo negro como un conjunto de osciladores cada uno con su correspondiente frecuencia o longitud de onda. Según el teorema de equipartición de mecánica estadística clásica, a cada uno de estos modos le correspondería una cantidad igual de energía de la energía total disponible: la energía térmica dada por la temperatura a la que se encuentra el cuerpo negro,  $k_B T$ . ¿Qué sucede? Imagina una caja de lado  $L$ , los únicos modos estacionarios que caben dentro de la caja son aquellos con longitud de onda  $\lambda \leq 2L/n$  (longitudes de onda para las cuales la intensidad del modo es cero en los bordes de la caja). Este valor  $n$  puede valer como mínimo  $n = 1$ , con lo que la longitud

de onda máxima es  $\lambda = 2L$ . Esto explica por qué la catástrofe no ocurre en el infrarrojo: la física clásica ya impone un límite máximo en las longitudes de onda largas (frecuencias cortas, energía pequeña). Pero, a priori, el valor de  $n$  puede valer todo lo que quiera, hasta infinito. Como hay muchos más modos con longitud de onda corta (infinitos, de hecho) que longitud de onda larga, la teoría clásica predice una intensidad infinita para estas longitudes cortas (frecuencias largas, ultravioleta & Co.). Aquí es donde llega Planck y su cuantización de la energía. Según esto, no se puede intercambiar cualquier valor de energía, si no solo en paquetes de  $E = hf$ . Resulta que, al hacer los cálculos de acuerdo a la termodinámica, esto modifica la situación que encontramos en física clásica. Ahora, al estar cuantizados los niveles de energía, los estados a los que puede acceder el sistema están limitados por la energía térmica que tiene el cuerpo. Es decir, a mayor energía, menos probabilidad tendrá el sistema de encontrarse en dicho estado. Esta probabilidad la define la temperatura de acuerdo a la expresión que derivó Planck:

$$E = \frac{hf}{\exp(hf/k_B T) - 1}$$

Cuando  $hf \ll k_B T$  (infrarrojo),  $E \sim k_B T$  y ambas predicciones, clásica y cuántica, coinciden. Pero, cuando  $hf \gg k_B T$  (ultravioleta),  $E \sim hf e^{-hf/k_B T}$  y la contribución de frecuencias altas decae exponencialmente. Salvados de la catástrofe. La longitud de onda "mínima" que tiene una contribución apreciable en la intensidad queda marcada por la temperatura a la que se encuentra el cuerpo.

Hay que notar que en nuestro día a día no experimentamos que las cosas tengan niveles de energía cuantizados (no vamos dando pasos al caminar "a cachos") porque la constante de Planck es *muuy* pequeña:  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . Por tanto, estos efectos solo son apreciables cuando las frecuencias características del sistema son comparables a la energía aportada por la temperatura. Normalmente a temperaturas muy bajas.

Planck consideraba su cuantización de la energía como un truco matemático, con que todavía se creía en aquel entonces que la luz no podía ser otra cosa que una onda electromagnética clásica. Sin embargo, en 1905, Einstein dio el siguiente paso (aunque tampoco muy convencido sobre las implicaciones que tendría). El fenómeno que trató de explicar consistía en el efecto fotoeléctrico. En él, se observó que al iluminar la superficie de un metal con luz compuesta por una única frecuencia (monocromática), se emitían electrones de forma instantánea al sobrepasar una cierta frecuencia umbral,  $f_0$ . Resulta además que, al medir la energía cinética máxima de los electrones emitidos por el metal  $K_{max}$ , se obtiene que solo depende de la frecuencia de la luz incidente y no de su intensidad:

$$K_{max} = hf - W$$

donde  $W$  es el trabajo de extracción del metal (energía necesaria para arrancarle un electrón). Por tanto, si la frecuencia de la luz incidente da una energía superior a dicho trabajo, tendremos emisión instantánea de electrones y si no, no. Fue Einstein quien razonó que los cuantos de energía, propuestos inicialmente por Planck, aplicaban también a la luz. De esta manera, la radiación electromagnética estaba compuesta por lo que más tarde se bautizaría como fotones. Cada fotón tiene una energía  $E = hf$  que cede al chocar con un electrón del metal. Parte de dicha energía se gasta en vencer el trabajo  $W$  y el resto se emplea en dar energía cinética al electrón.

### ¿Y esto para qué sirve?

La comprensión de la radiación de cuerpo negro abrió la puerta al diseño de sensores térmicos capaces de medir temperaturas con gran precisión, incluso a distancia. Esto sirve hoy en día para determinar la temperatura de las estrellas o los planetas que las orbitan. Del mismo modo, el efecto fotoeléctrico dio lugar a toda una revolución tecnológica. La idea de que la luz puede liberar electrones tiene una importantísima aplicación práctica: las células fotoeléctricas que transforman la luz en corriente eléctrica. También los sensores CCD y CMOS de cámaras, telescopios y escáneres basan su funcionamiento en la fotoemisión semiconductor.