

La Constante de Planck y la Energía de un Fotón

En 1900, Max Planck estaba trabajando sobre el problema de cómo la radiación emitida por un objeto se relacionaba con su temperatura. El concibió una fórmula que se adecuaba bastante a los datos experimentales, pero la fórmula solo tenía sentido si se asumía que la energía de una molécula vibrante era *quantizada*—esto es, solamente podía tomar ciertos valores. La energía debería ser proporcional a la frecuencia de vibración y parecía llegar en pequeños "bloques" de la frecuencia, multiplicados por una cierta constante. Esta constante llegó a conocerse como la **constante de Planck**, o h y tiene el valor

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Esto nos lleva al aspecto de las unidades. En su clase de matemáticas, los números por sí mismos son suficientes para trabajar, pero en ciencia, un número sin unidades es prácticamente inservible. Intente este problema: un tren de longitud 2, pesando 200, viaja de Denver a Santafé a una velocidad de 15. Cuánto duró el viaje?

Esa es una constante bastante pequeña

Que? 2 kilómetros, 200 toneladas, 15 millas por hora?

Es correcto, no tenemos ni idea, a menos que les pongamos unidades a esos números.

Bueno, pero qué es

La forma en que se construye un sistema de unidades es tener un conjunto fundamental de unidades— cosas como longitud, masa, tiempo y temperatura, para nombrar algunas. En el sistema estandar de unidades usado por los científicos, medimos esas cantidades en metros [m], kilogramos [kg], segundos [s] y grados Kelvin [K], respectivamente.

Ya veo que s significa segundos, pero en dónde entra la J , Dr. Mahan?

Esa J significa Joule, en honor a Sir James Joule, quien examinó la relación entre calor y energía en el siglo XIX. El Joule (o Julio) es la unidad SI de medición de energía. Un joule está relacionado con las unidades fundamentales donde un joule es $1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$. Esto no es nada obvio, pero es similar a medir el área en m^2 (distancia por distancia), o la velocidad en m/s (distancia dividida por tiempo).

Si, pero era una idea extremadamente radical sugerir que la energía solamente podría venir en pequeñas parcelas, aunque estas fueran muy pequeñas. Planck no se dió cuenta, en su tiempo, de todo lo revolucionario que su trabajo había sido; él pensó que había estado forzando la matemática para producir la "respuesta adecuada" y estaba

Entonces

es un Joule segundo. Qué sería eso? Eso no es energía ni es tiempo.

El nombre técnico para lo que representa un Joule es momento angular, pero todo lo que necesita saber es que tiene que ver con cosas que giran, como las ruedas de una bicicleta.

Raro. Y eso tiene algo que ver con fotones?

Si, todavía hay mucho que no le hemos dicho sobre la luz.

convencido de que alguien más debería obtener una mejor explicación de su fórmula.

Me imagino que Einstein debió tomarlo en serio.

Y muy en serio. Basado en el trabajo de Planck, Einstein propuso que la luz también entrega su energía en paquetes; la luz podría, así, estar constituida de pequeñas partículas, o **cuantos**, llamadas **fotones**, cada uno con una energía equivalente a la constante de Planck multiplicada por su frecuencia.

En ese caso la frecuencia de la luz *haría* una diferencia en el efecto fotoeléctrico.

Exactamente. Fotones de alta frecuencia tienen más energía, así que deberían hacer salir los electrones más rápido; entonces, el cambio a una luz con la misma intensidad pero con mayor frecuencia, debería incrementar la energía cinética máxima de los electrones emitidos. Si se deja la misma frecuencia pero se aumenta la intensidad, *más* electrones deben salir (porque hay más fotones para impactarlos), pero no saldrán *más rápido*, porque cada fotón individual todavía tiene la misma energía.

Y si la frecuencia es suficientemente baja, entonces ninguno de los fotones tendrá suficiente energía para desprender un electrón de un átomo. Entonces al usar luz de muy baja frecuencia, no se obtendría *ningún* electrón, no importa la intensidad de la luz. Mientras que si se usa una alta frecuencia, se podrían desprender algunos electrones, aún si la intensidad fuera muy baja.

Totalmente cierto. Por lo tanto, con unas medidas simples, el efecto fotoeléctrico parecía adecuado para decirnos si la luz estaba compuesta de partículas o de ondas.

Y alguien hizo el experimento? Que pasó?

En 1913, R.A. Millikan hizo una serie de extremadamente cuidadosos experimentos con el efecto fotoeléctrico. Encontró que todos sus resultados coincidían perfectamente con las predicciones de Einstein sobre los fotones, no con la teoría de las ondas. Einstein ganó el premio Nobel por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico y no por su más famosa teoría de la relatividad.

Entonces la luz *está hecha* de partículas! Pero un momento...qué pasa entonces con el experimento de la doble hendidura? No veo cómo la luz podría hacer un patrón de interferencia como ese, a menos que fuera hecha de ondas.

Si, me temo que es un poco más complicado que eso. Algunos resultados experimentales, como este, parecen probar más allá de toda duda, que la luz consiste en partículas; otros insisten, en forma igualmente irrefutable, que es ondas. Solamente podemos concluir que la luz es de alguna manera ambos, ondas y partículas--o que es algo que no podemos visualizar y que se nos muestra como una u otro, dependiendo de cómo la miremos.

Dualidad onda–corpúsculo

El cuanto de luz, o fotón, propuesto por Einstein, puso sobre la mesa el debate acerca de la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz cien años después de que Fresnel hubiese dado por zanjado el asunto a favor del modelo ondulatorio. En 1923, A.H. Compton realizó un experimento cuyos resultados sólo pueden ser entendidos como un choque entre electrones y fotones, como si de bolas de billar se tratase. Para mayor sorpresa, un aristócrata francés, L. de Broglie, presentó en 1924 la revolucionaria idea de que la materia también tiene cualidades de onda y de partícula. Esta sorprendente hipótesis fue comprobada en 1927 por G. P. Thomson mediante experimentos de difracción de electrones. La masa del electrón se ha medido hasta la saciedad, es decir, tiene características de partícula, pero presenta interferencias, como las ondas en la superficie de un estanque. Esta dualidad onda–partícula es uno de los aspectos más extraños de la teoría cuántica. La respuesta cuántica es sutil: si en un experimento con electrones no los intentamos ver individualmente, permitimos que sus «características ondulatorias» interfieran, dando lugar a la difracción, por ejemplo. Si, en cambio, intentamos «ver» a los electrones individuales, por ejemplo usando fotones para detectarlos, los perturbamos, destruyendo así los fenómenos ondulatorios. En palabras de R. P. Feynman, este misterio no es «ni comportamiento ondulatorio ni comportamiento corpuscular, sino comportamiento cuántico».

Ondas de materia

Diagrama de difracción de electrones de una muestra policristalina de oro, que evidencia la naturaleza dual (ondulatoria en este caso) de las partículas materiales. Cada anillo de difracción es debido a la dispersión causada por planos de átomos específicos del material.

En esta actividad se estudia de forma cuantitativa la absorción de la luz al atravesar el espesor variable de un material que presenta cierto grado de transparencia. Este tema está presente en el programa de física de primero medio en la unidad La Luz, dentro del contenido Propagación de la Luz.

Se aborda el concepto de absorción con un enfoque cuantitativo, lo que complementa y enriquece la forma en que se presenta dicho tema en el programa oficial del Ministerio de Educación, permitiendo destacar la importancia de las mediciones en la física en un caso de aplicación práctica de la vida cotidiana.

El tema se introduce a través del planteamiento de un problema que exige para su solución algunos cálculos matemáticos sencillos, elementos de análisis comparativo y la realización de un estudio experimental de materiales de uso cotidiano, lo que contribuye al cumplimiento de un objetivo transversal fundamental como es el desarrollo de habilidades del pensamiento en su dimensión de resolución de problemas. En esta actividad se abordan los conceptos de reflexión, especialmente la difusa, y absorción de la luz al incidir sobre objetos opacos. Se realiza un estudio experimental de la reflexión y la absorción de la luz blanca al incidir sobre cuerpos con distintos colores.

Estos conceptos se encuentran dentro de la unidad La Luz, específicamente en los contenidos que se presentan en La Propagación de la Luz. En esta actividad se estudia la reflexión y la absorción de la luz en su relación con la energía aplicando un enfoque cuantitativo que refuerza el punto de vista fenomenológico del programa

de física de primero medio del MINEDUC. En esta actividad se abordan los conceptos velocidad de propagación, período, frecuencia y longitud de onda. Requiere que se hayan realizado antes los ejemplos, con un enfoque fenomenológico, indicados en el Programa de Estudio de Física, primer año medio. Esta actividad debe contribuir a consolidar el conocimiento sobre la relación entre las magnitudes señaladas mediante la realización de un laboratorio de simulación de la ecuación $v = \lambda / T$ con el programa *Excel*. Usando la simulación, los estudiantes determinan los valores de la longitud de onda y de la frecuencia, trabajando con los gráficos que se presentan. Posteriormente obtiene y estudia la representación gráfica de la relación entre la longitud de onda y el período, así como también entre la frecuencia y el período con ayuda del programa *Graphical Analysis*. Finalmente se realiza un experimento con el sensor de sonido para ver la relación de la frecuencia con la longitud de la cuerda que produce el sonido. Este laboratorio se caracteriza por combinar el uso de planilla de cálculo y mediciones con sensor para evidenciar relaciones entre magnitudes del movimiento ondulatorio que resultan muy difíciles de observar directamente. Este laboratorio debe facilitar la comprensión de las similitudes entre sonido y luz, como manifestaciones del movimiento ondulatorio, que se aborda posteriormente en la unidad La Luz en los temas Propagación de la luz y Naturaleza de la luz.

Física del Sonido I. La consonancia, la disonancia y el ciclo de luz

En esta actividad se aborda la física del sonido con un enfoque musical, es decir, se vinculan las características físicas del sonido con la apreciación personal del mismo. El objetivo fundamental de la actividad es evidenciar la existencia de una forma objetiva de distinguir entre ruido o disonancia y sonido agradable o consonancia mediante el uso del sensor de sonido y de la transformada de Fourier para el análisis de los registros.

Se hace una introducción histórica sobre el origen de las notas y las escalas musicales y se explica el concepto de acorde musical. Se estudian las cualidades del sonido como intensidad o volumen, altura o tono y timbre con un enfoque fenomenológico que involucra la apreciación personal en contraste con la detección y registro instrumental y la valoración y visualización matemática de los datos obtenidos a partir de distintos sonidos. Esta actividad debe contribuir a la consolidación de los vínculos entre los conceptos intuitivos y la apreciación personal del sonido y su representación matemática mediante las magnitudes físicas que lo caracterizan.

Física de la Luz II. Sobre la absorción de la luz

En esta actividad se estudia de forma cuantitativa la absorción de la luz al atravesar el espesor variable de un material que presenta cierto grado de transparencia. Este tema está presente en el programa de física de primero medio en la unidad La Luz, dentro del contenido Propagación de la Luz.

Se aborda el concepto de absorción con un enfoque cuantitativo, lo que complementa y enriquece la forma en que se presenta dicho tema en el programa oficial del Ministerio de Educación, permitiendo destacar la importancia de las mediciones en la física en un caso de aplicación práctica de la vida cotidiana.

El tema se introduce a través del planteamiento de un problema que exige para su solución algunos cálculos matemáticos sencillos, elementos de análisis comparativo y la realización de un estudio experimental de materiales de uso cotidiano, lo que contribuye al cumplimiento de un objetivo transversal fundamental como es el desarrollo de habilidades del pensamiento en su dimensión de resolución de problemas.

Física de la Luz I. ¿Por qué se pueden ver los objetos bajo la luz?

En esta actividad se abordan los conceptos de reflexión, especialmente la difusa, y absorción de la luz al incidir sobre objetos opacos. Se realiza un estudio experimental de la reflexión y la absorción de la luz blanca al incidir sobre cuerpos con distintos colores.

Estos conceptos se encuentran dentro de la unidad La Luz, específicamente en los contenidos que se presentan en La Propagación de la Luz. En esta actividad se estudia la reflexión y la absorción de la luz en su relación con la energía aplicando un enfoque cuantitativo que refuerza el punto de vista fenomenológico del programa de física de primero medio del MINEDUC.

Electricidad. La ley de Ohm

En esta actividad se abordan los conceptos de corriente, resistencia y voltaje. Este tema está presente en el programa de física de primero medio en la unidad La Electricidad, dentro del contenido Carga y Corriente Eléctrica.

Se estudian las magnitudes mencionadas con un enfoque cuantitativo, lo que complementa y enriquece la forma en que se presenta dicho tema en el programa oficial del Ministerio de Educación, permitiendo destacar la importancia de las mediciones en la física y de valorar la influencia del error, tanto desde el punto de vista de la medición como de la información sobre un producto industrial como es la resistencia eléctrica de carbón.

El tema se introduce a través del planteamiento de un problema que exige para su solución elementos de análisis comparativo y la realización de un estudio experimental, lo que contribuye al cumplimiento de un objetivo transversal fundamental como es el desarrollo de habilidades del pensamiento en su dimensión de resolución de problemas en situaciones de la vida cotidiana.