Propiedades cuánticas de la luz

Física Clásica del 1890

Mecánica → Galileo (1564-1642)

Newton (1642-1727)

Ley de inercia, Fza, aceleración, ley de acción y reacción

Electromagnetismo → Ecuaciones de Maxwell (1831-1879)

Ley de Gauss, ley de Faraday, ley de Ampere

Leyes de la Termodinámica

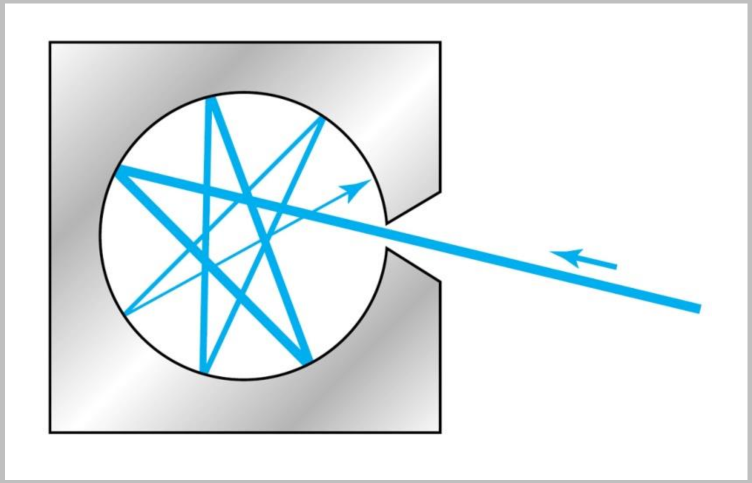
Energía interna, calor, trabajo, equilibrio térmico

Teoría cinética de los gases

Predice, difusión, camino libre medio, frecuencia de colisiones, vel. del s

Radiación de cuerpo negro

Cuando la materia se calienta emite radiación.



Un cuerpo en equilibrio térmico con el ambiente debe absorber energía al mismo ritmo que la emite.

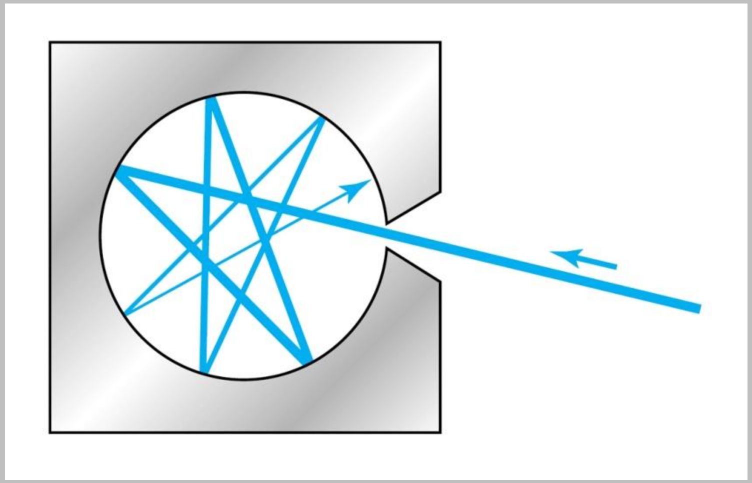
Un ***cuerpo negro*** es un cuerpo ideal que absorbe ***toda*** la energía que incide sobre él

Radiación de cuerpo negro

Objeto hueco con un pequeño orificio donde la radiación entra pero queda atrapada.

La cavidad emite radiación y absorbe la radiación.

La radiación de cuerpo negro es interesante desde el punto de vista teórico ya que sus propiedades **son independientes del material**. Se puede estudiar las propiedades de la intensidad vs. la longitud de onda a temperaturas fijas.

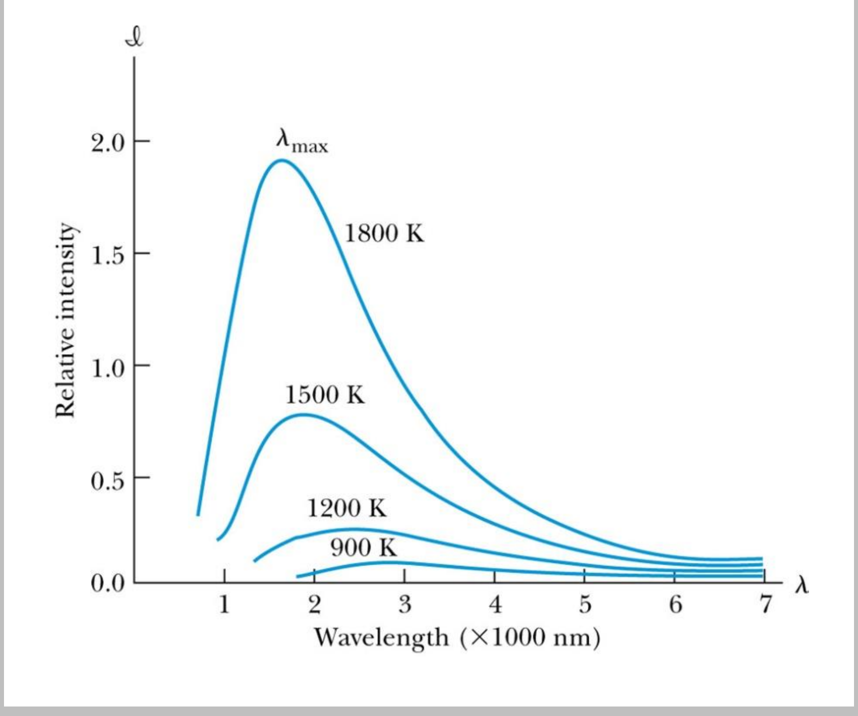


Ley de desplazamiento de Wien

La intensidad espectral J(ν, T) es la potencia total irradiada por unidad de área por unidad de frecuencia de onda a una dada temperatura.

A mayor temperatura mayor radiación

Ley de desplazamiento de Wien: El máximo del espectro se corre hacia menores longitudes de onda a medida que aumenta la temperatura.



$$\lambda_{max} T = 2.898 \times 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot K}$$

Ley de Stefan-Boltzmann

Potencia total irradiada $$e_{total} = \int_0^{\infty} \mathrm{J}\ (\nu, T)\, d\nu$$

Encontró experimentalmente que la potencia total irradiada por un cuerpo aumenta con la temperatura:

$$e_{\mathrm{total}} = a\sigma T^4$$

Ésta se conoce como la **ley de Stefan-Boltzmann**, con la constante σ medida experimentalmente 5.6705 × 10^{-8} W / (m^2 · K^4).

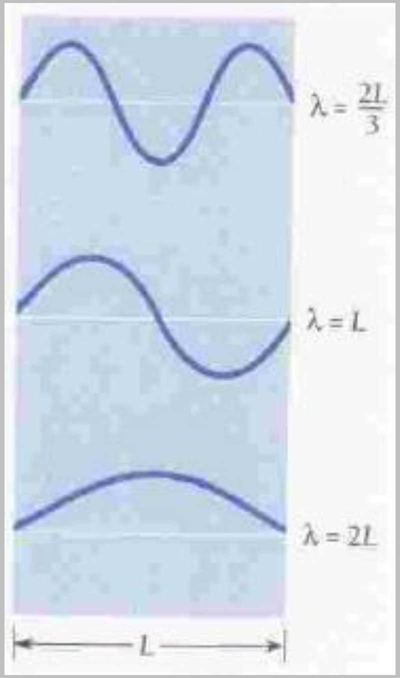
La **emisividad** *a* (*a* = 1 para un cuerpo negro ideal) es simplemente el cociente entre la potencia de emisión de un objeto respecto del cuerpo negro ideal y es siempre menor que 1.

$$\mathrm{J}(\nu, T) = u(\nu, T)\, c/4$$

Energía por unidad de volumen por unidad de frecuencia

Fórmula de Rayleigh-Jeans

Lord Rayleigh usó la teoría clásica del electromagnetismo y la termodinámica para encontrar la distribución espectral del cuerpo negro



Ondas electromagnéticas estacionarias → dist de entre las paredes es un número entero de 1/2λ

El número de o. estacionarias entre ν y dν por u. de volumen es $G(\nu)d\nu = \dfrac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3}$

Ppio. de equipartición → en. por grado de libertad → $\dfrac{1}{2}k_B T$

$k_B = 1.381\times10^{-23}\,J/K \longrightarrow$ ***constante de Boltzman***

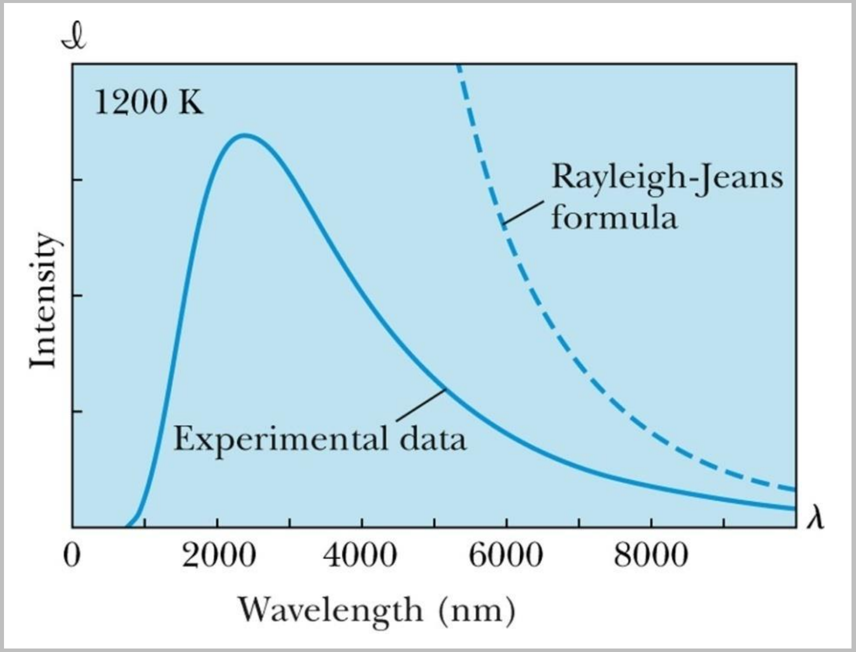
Para oscilador armónico → $\bar{\varepsilon} = k_B T$

$$\boxed{u(\nu)d\nu = \bar{\varepsilon}G(\nu)d\nu = \frac{8\pi k_B T}{c^3}\nu^2 d\nu}$$

Fórmula de Rayleigh-Jeans

$$\boxed{u(\nu)d\nu = \frac{8\pi kT}{c^3}\nu^2 d\nu}$$

$$\nu \rightarrow \infty \qquad energía \rightarrow \infty$$



Se aproxima a los datos experimentales a grandes longitudes de onda pero falla para longitudes de ondas cortas. Este problema se lo conoce como **la catástrofe ultravioleta** y es una de las grandes excepciones que la física clásica no puede explicar.

Ley de radiación de Planck

Planck supuso que la radiación en la cavidad era emitida (y absorbida) por una clase de "osciladores". Usó la estadística de Boltzman para llegar a la siguiente fórmula que describe los datos experimentales de la radiación de cuerpo negro.

$$\boxed{u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h}{c^3}\frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/k_B T}-1}}$$

Ley de radiación de Planck

donde $h = 6.6261\times10^{-34}$ J·s es la llamada constante de Planck

Planck realizó dos modificaciones a la teoría clásica:

Los osciladores (de origen electromagnético) solo pueden tener ciertos valores discretos de energía, $E_n = nh\nu$, donde n es un entero, ν es la frecuencia.

Los osciladores pueden absorber o emitir energía en múltiplos de una cantidad fundamental de energía dada por:

$$\boxed{\Delta E = h\nu}$$

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h}{c^3}\frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/k_BT}-1}$$

cuando $h\nu >> k_BT$

$$e^{h\nu/k_BT} \to \infty$$

$$u(\nu)d\nu \to 0$$

cuando $h\nu << k_BT$ $\quad h\nu/k_BT << 1$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots$$

$$si \quad x << 1 \quad e^x \approx 1 + x$$

$$e^{h\nu/kT} \approx 1 + \frac{h\nu}{k_BT}$$

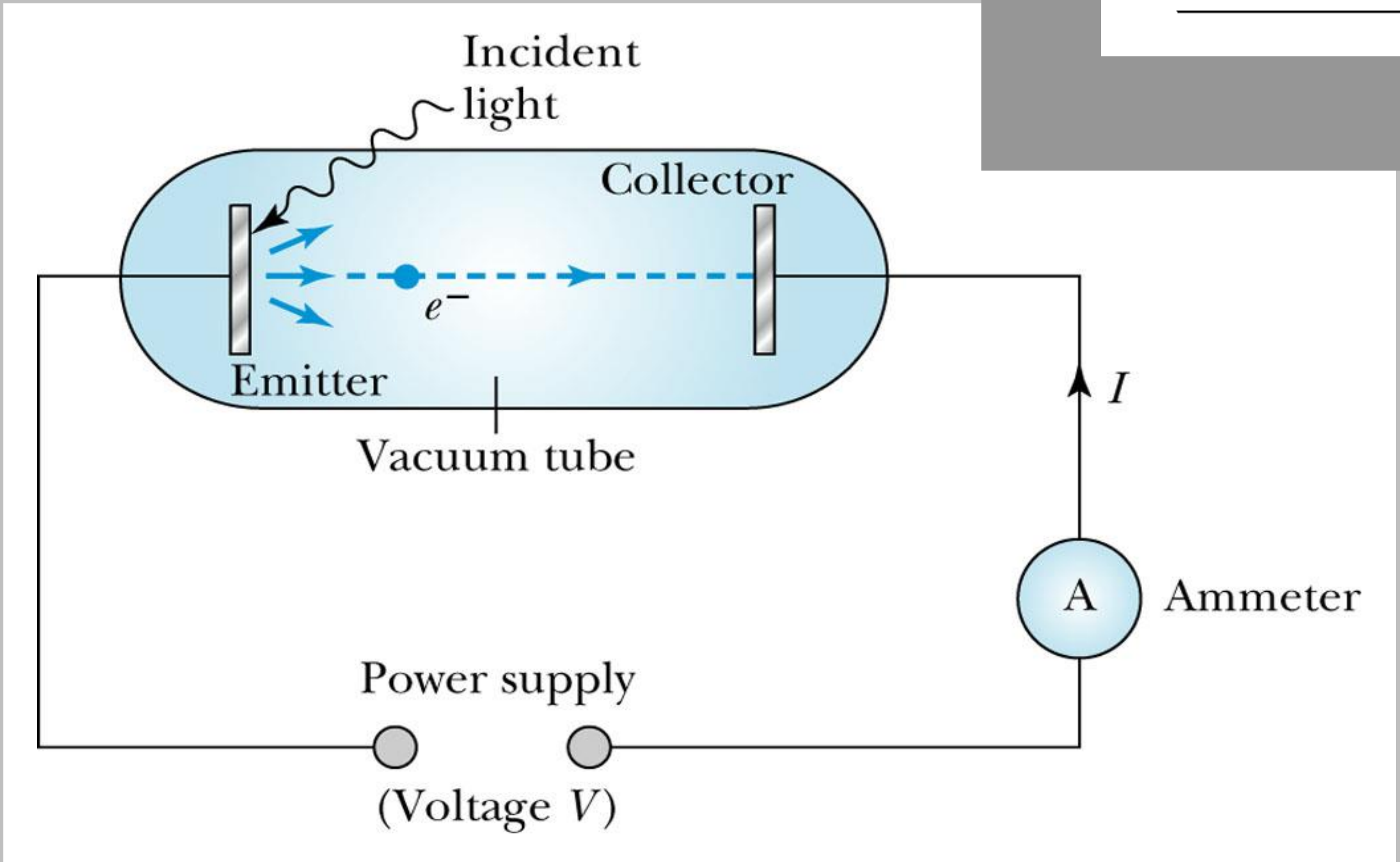
$$u(\nu)d\nu \approx \frac{8\pi h}{c^3}\nu^3\left(\frac{k_BT}{h\nu}\right) = \frac{8\pi k_BT}{c^3}\nu^2 d\nu$$

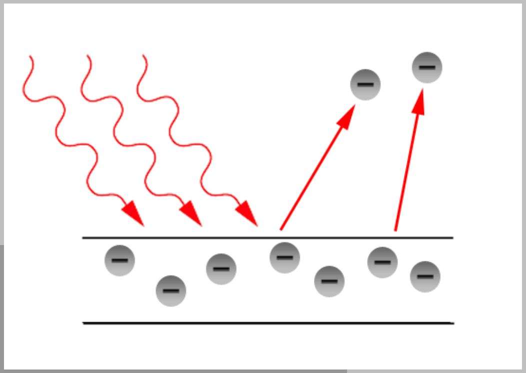
$$\varepsilon_n = nh\nu \qquad n = 1, 2, 3\ldots$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_BT}-1}$$

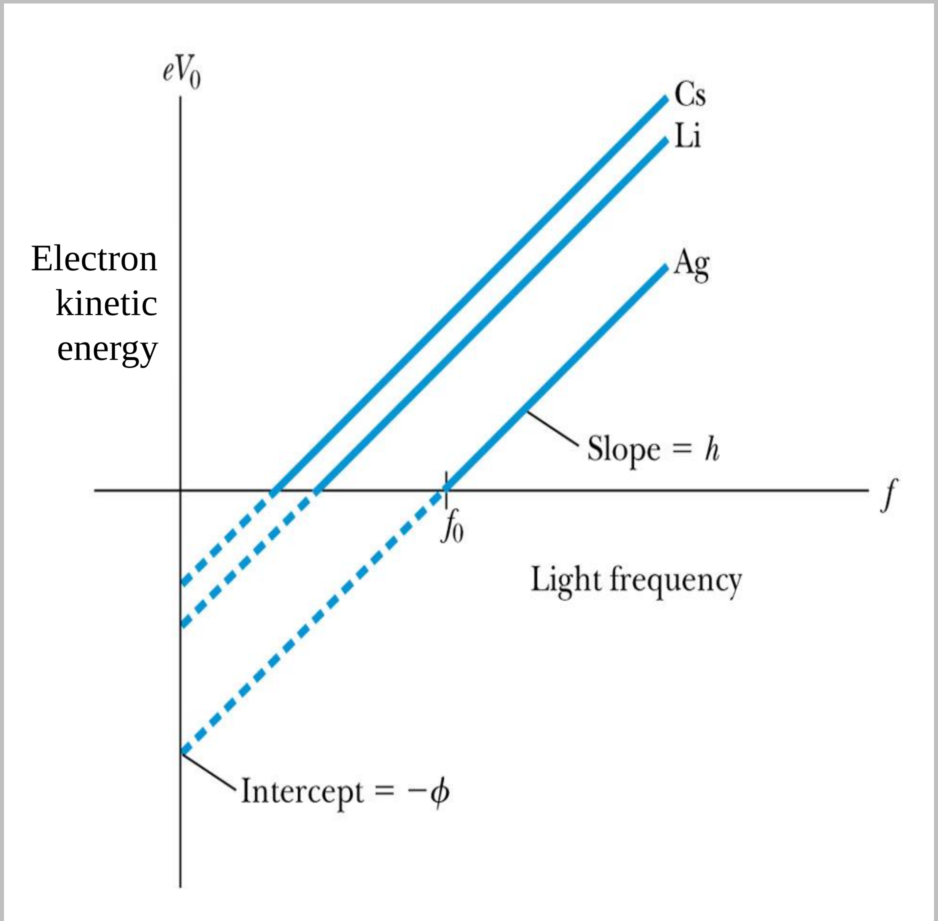
Efecto fotoeléctrico

Arreglo experimental





Observaciones en el efecto fotoeléctrico



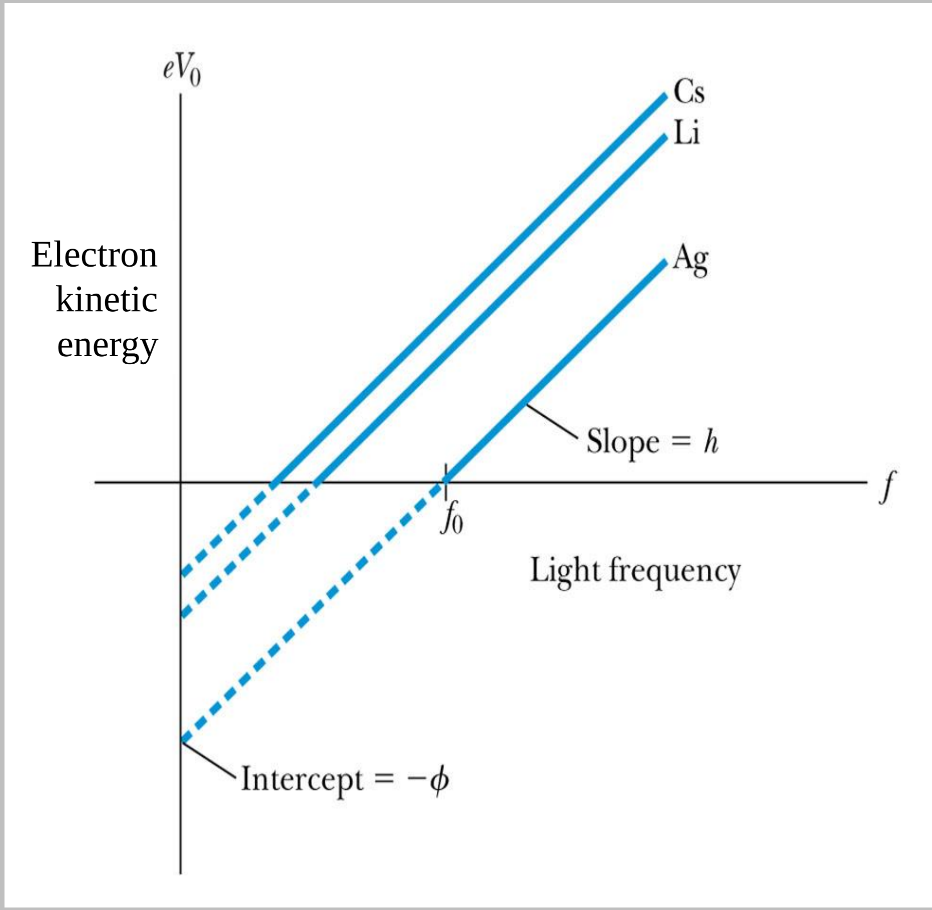
La energía cinética de los fotoelectrones es **independiente de la intensidad de la luz**.

La energía cinética de los fotoelectrones, para un determinado material emisor, depende sólo de la **frecuencia** de la luz.

Clásicamente, la energía cinética de los fotoelectrones debería aumentar con la intensidad y no depender de la frecuencia.

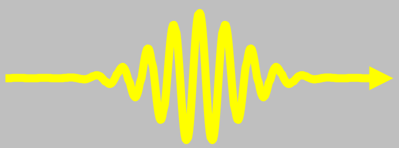
Observaciones en el efecto fotoeléctrico

Existe una **frecuencia umbral** de la luz, debajo de la cual no hay fotoelectrones eyectados (relacionado con la función trabajo del material emisor).



La existencia de una frecuencia umbral es completamente inexplicable en la teoría clásica.

Teoría de Einstein: Fotones



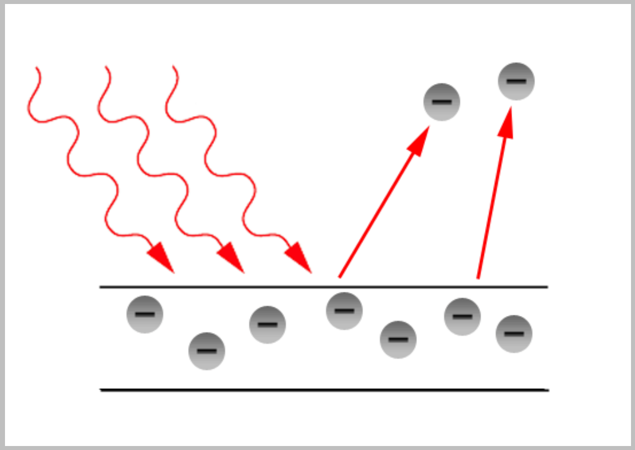
Einstein sugirió que la radiación electromagnética está cuantizada en partículas llamadas **fotones**. Cada fotón tiene un cuanto de energía:

$$\boxed{E = h\nu}$$

donde ν es la frecuencia de la luz y h es la constante de Planck.

$$\boxed{E = \hbar\omega} \quad \text{donde:} \quad \boxed{\hbar \equiv h/2\pi}$$

Teoría de Einstein



La conservación de la energía da :

Energía antes (fotón)=energía después (electrón)

$$\boxed{h\nu = \phi + \tfrac{1}{2} m\mathrm{v}^2}$$

donde ϕ es la función trabajo del metal (energía potencial que debe superar para que un electrón pueda escapar).

A partir de datos experimentales tenemos: $h\nu = \phi + \tfrac{1}{2} m\mathrm{v}^2_{\mathrm{max}}$

Rayos X

Wilhelm Roentgen - 1895

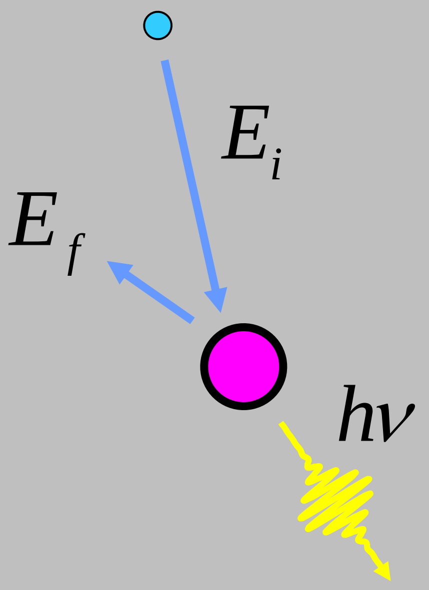
Radiación altamente penetrante, desconocida, producida cuando electrones chocaban con la materia

- Viajan en línea recta
- No se ve afectada por los campos eléctricos y magnéticos
- Atraviesan materiales opacos
- Hacen que materiales fosforescentes brillen
- Exponen placas fotográficas

Producción de Rayos-X

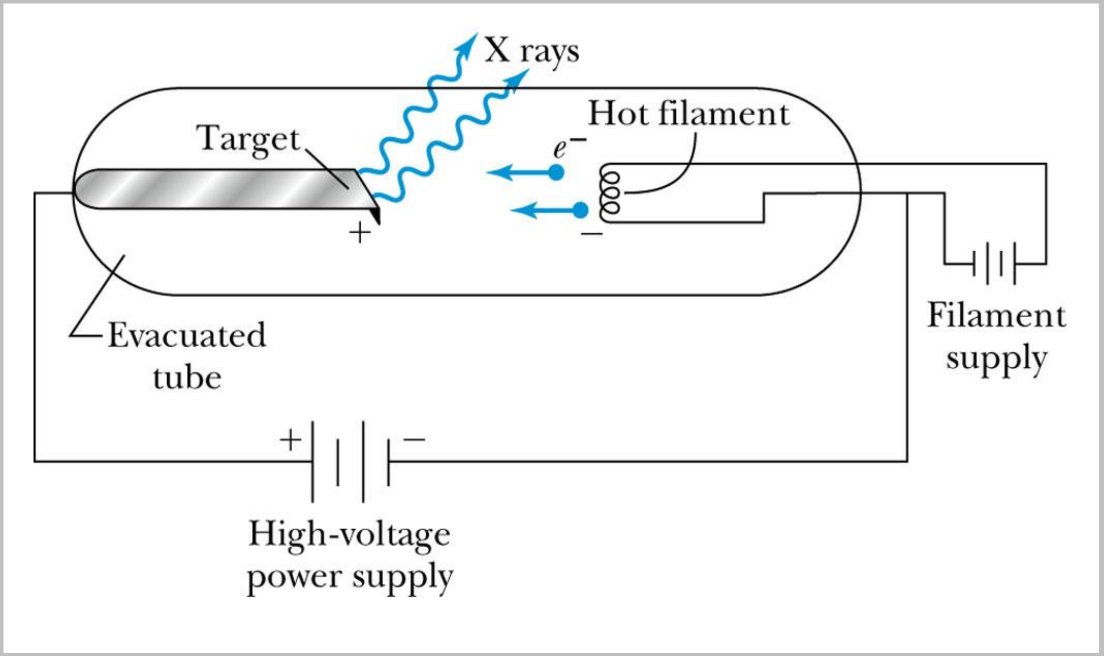
Un electrón de alta energía que pasa a través de la materia irradiará fotones y perderá energía cinética, llamada **bremsstrahlung**.

Como el momento se conserva, el núcleo absorbe poca energía, que se puede despreciar. La energía final del electrón se determina a partir de la conservación de la energía.



$$E_f = E_i - h\nu$$

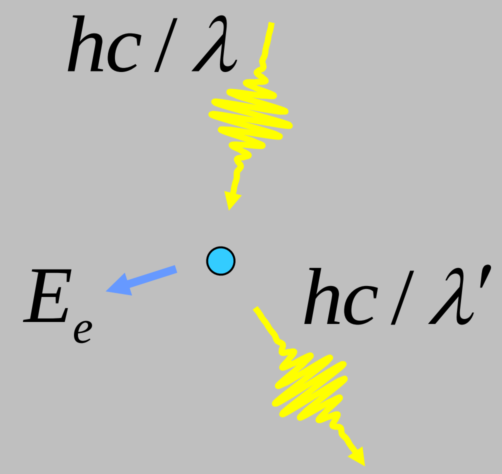
Experimento de producción de Rayos-X



Una corriente que pasa a través de un filamento produce gran número de electrones mediante emisión termoiónica. Si estos electrones se enfocan por una estructura de cátodo en un flujo y se los acelera mediante una diferencia de potencial de miles de volts hasta que inciden en la superficie metálica del ánodo, y se producen rayos x por bremsstrahlung mientras se frenan en el material del ánodo.

Efecto Compton

Cuando un fotón penetra la materia, puede interactuar con algún electrón. Las leyes de conservación de la energía y del momento se aplican, como en una colisión elástica entre partículas.



Esto lleva a un cambio en la longitud de onda del fotón dispersado, conocido como **Efecto Compton**:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}\left(1 - \cos\phi\right)$$