



Física III (sección 1) (230006-230010) Ondas, Óptica y Física Moderna

Profesor: M. Antonella Cid
Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Universidad del Bío-Bío

Carreras: Ingeniería Civil Civil, Ingeniería Civil
Mecánica, Ingeniería Civil Industrial

Radiación Térmica

Gran parte de los objetos que podemos observar en la Tierra reflejan la luz, la parte visible del espectro electromagnético



310K

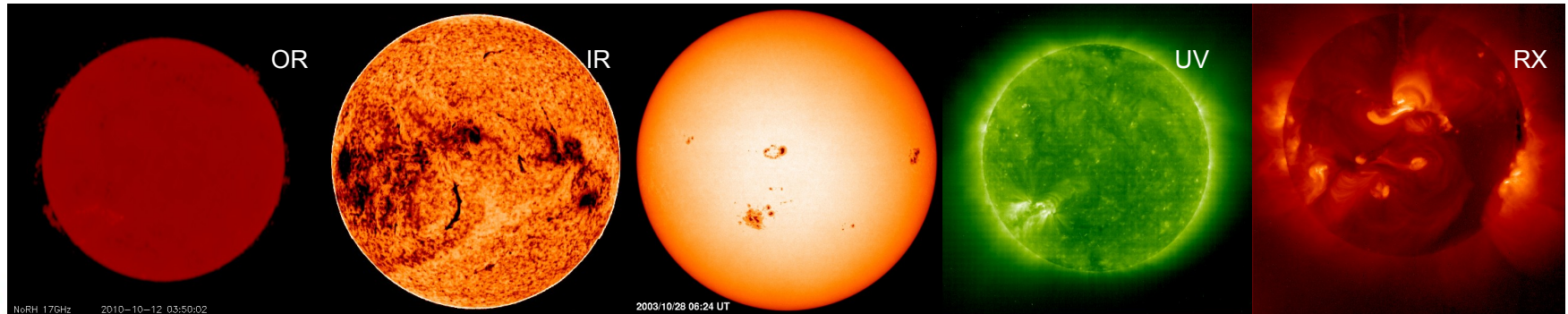


Si la temperatura de un objeto es lo suficientemente elevada ($T > 0K$), éste será capaz de emitir radiación



Los objetos a temperatura ambiente no emiten radiación en la parte visible del el espectro electromagnético

La **radiación térmica** es la radiación que emite un objeto debido a su temperatura



6000K

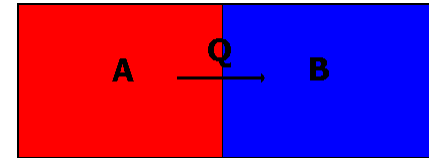


Radiación Térmica

Los cuerpos no sólo emiten radiación térmica, sino que también son capaces de absorberla de su entorno



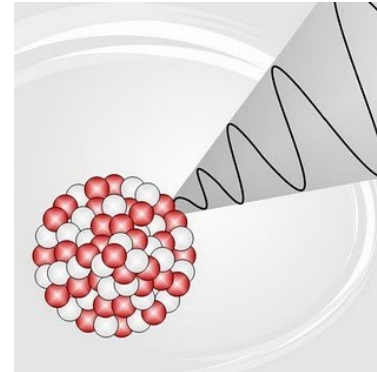
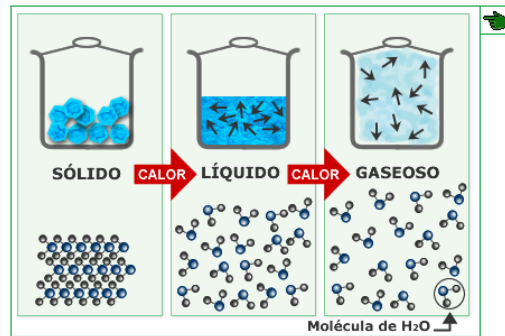
El intercambio de radiación térmica continúa hasta que se alcanza el equilibrio térmico



A temperatura suficientemente alta, un objeto resplandeciente se ve de color blanco

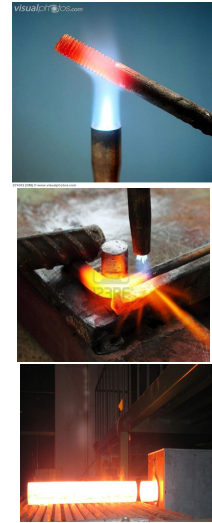
Radiación Térmica

- Si se eleva la temperatura de un cuerpo, la energía cinética de las partículas que componen un el cuerpo aumenta.
- La radiación térmica tiene su origen en las partículas cargadas y aceleradas de los átomos que están cerca de la superficie del cuerpo, estas partículas cargadas emiten radiación como pequeñas antenas



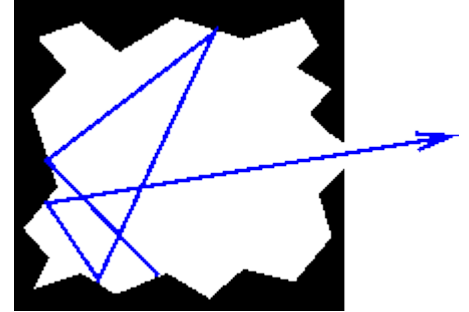
Radiación Térmica

- Si quisiéramos elevar uniformemente la temperatura de un cuerpo notaríamos:
 - a mayor temperatura mayor radiación térmica emite el cuerpo (al principio se ve oscuro, luego resplandece)
 - a mayor temperatura más corta es la longitud de onda de la parte del espectro que irradia más intensamente (rojo a amarillo)
- Puesto que las características del espectro dependen de la temperatura, se puede calcular la temperatura a partir de la radiación que emite un cuerpo
- La radiación emitida depende también del material, forma y naturaleza de la superficie

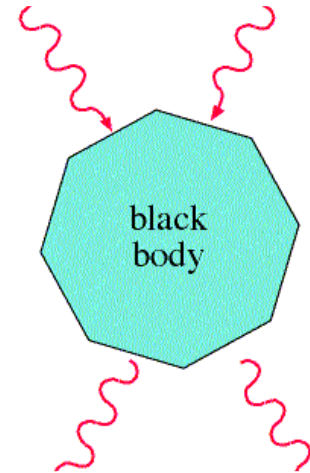


Radiación de cuerpo negro

- Para simplificar el problema consideramos un cuerpo cuyo espectro de radiación térmica sea ideal, es decir, sólo depende de la temperatura
- Fabricamos este cuerpo que radía idealmente con una cavidad dentro de un cuerpo y manteniendo las paredes de la cavidad a temperatura uniforme. Perforamos un pequeño agujero en la pared de la cavidad por donde escapa la radiación que está dentro de la cavidad
- Esta radiación se conoce como ***radiación de cuerpo negro*** y únicamente depende de la temperatura



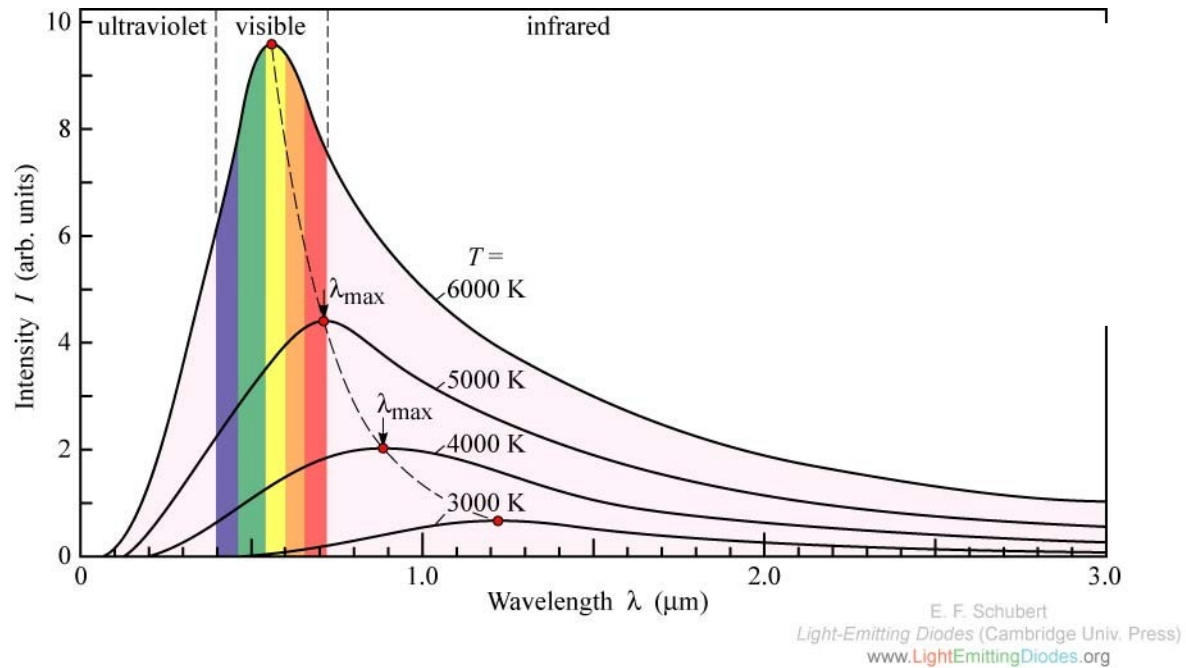
Toda la radiación incidente es absorbida



Emite todas las radiaciones posibles

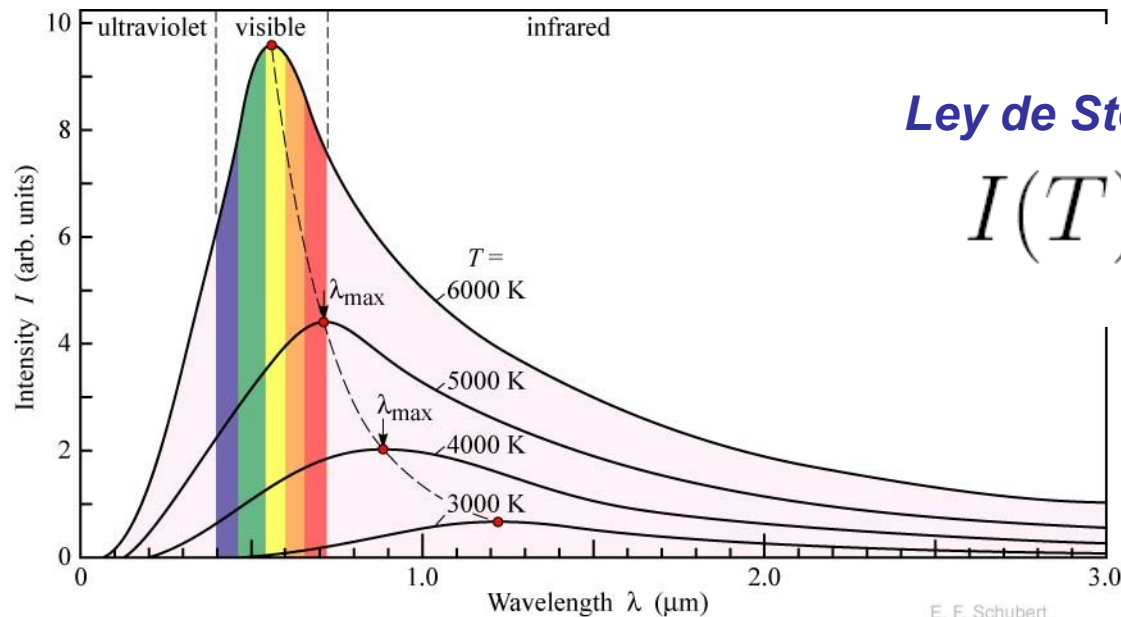
Espectro de la radiación de cuerpo negro

$$I(T) = \sigma T^4$$





Espectro de la radiación de cuerpo negro



Ley de Stefan-Boltzmann:

$$I(T) = \sigma T^4$$

Ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{max} T = 2898 [\mu m K]$$

E. F. Schubert

Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)

www.LightEmittingDiodes.org

constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} [W/(m^2 K^4)]$$

- Las propiedades anteriores son resultados experimentales para la radiación de cuerpo negro
- ¿Cuál es el fenómeno físico detrás de la emisión de esta radiación?
- Una teoría adecuada debe ser capaz de predecir la forma de las curvas y el comportamiento observado

Ley de Rayleigh-Jeans

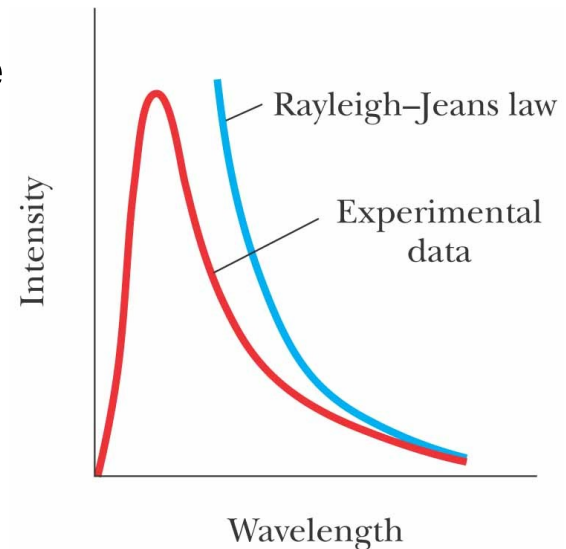
- El cuerpo negro se representa como un orificio que conduce a una cavidad que contiene muchos modos de oscilación del campo electromagnético, causados por cargas aceleradas en las paredes de la cavidad, lo cual da como resultado la emisión de OEM en todas las longitudes de onda.
- La energía promedio de cada longitud de onda de los modos de ondas estacionarias se supone proporcional a $k_B T$, con base en el teorema de equipartición de la energía (equilibrio térmico)
- Se presenta la catástrofe ultravioleta

$$R(T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

$$k_B = 1.381 \times 10^{-23} [J/K]$$

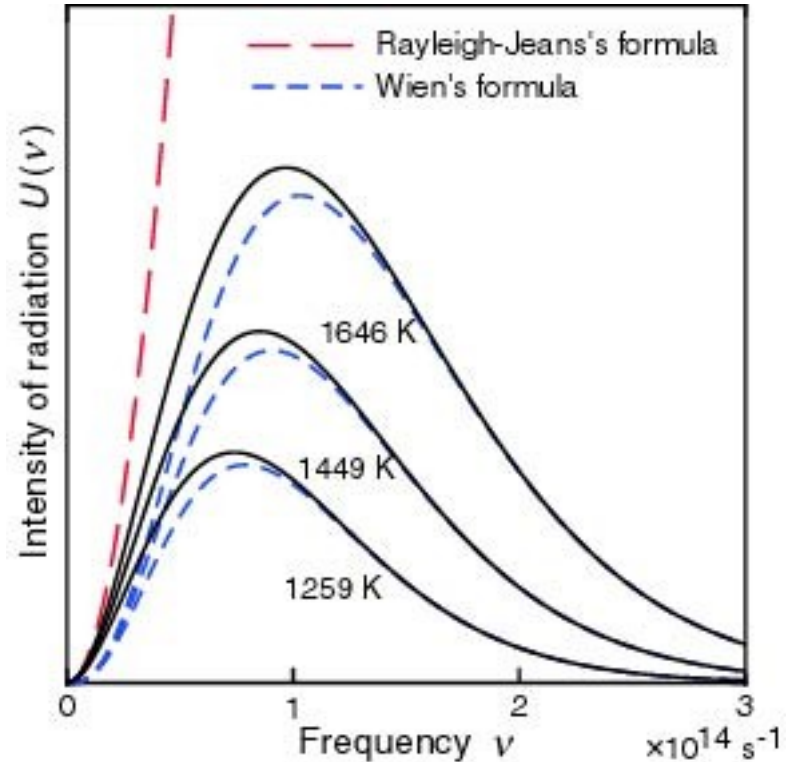
constante de Boltzmann

$$I(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda$$



Ley de Wien

- Se basó en la conjetura de que existe una analogía entre las curvas de la radiancia espectral y las curvas de distribución de velocidades de las moléculas de un gas ideal
- Esta ley falla para longitudes de onda grandes



Ley de Planck

- La radiación provenía de los osciladores atómicos en las paredes de la cavidad pero consideró hipótesis controversiales acerca de cómo radian los osciladores:

- La energía de un oscilador sólo puede tener ciertos valores discretos :

$$E_n = nhf$$

n son enteros positivos, f es la frecuencia de oscilación y h es la constante de Planck $h = 6.626 \times 10^{-34} [Js]$

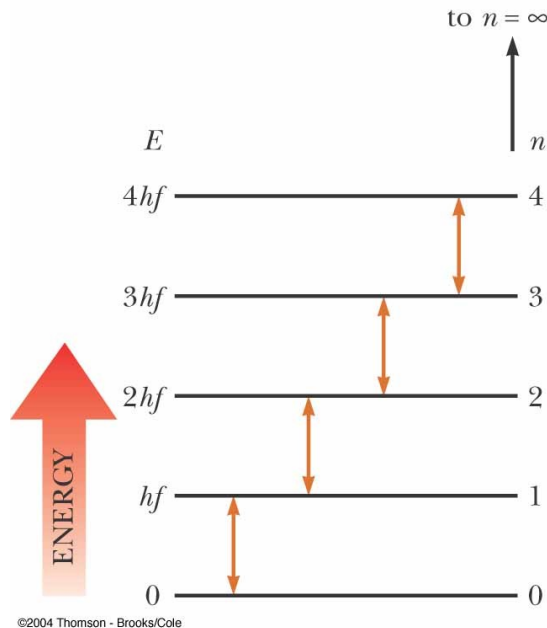
$$R(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$

n se denomina número cuántico y se dice que la **energía está cuantizada**

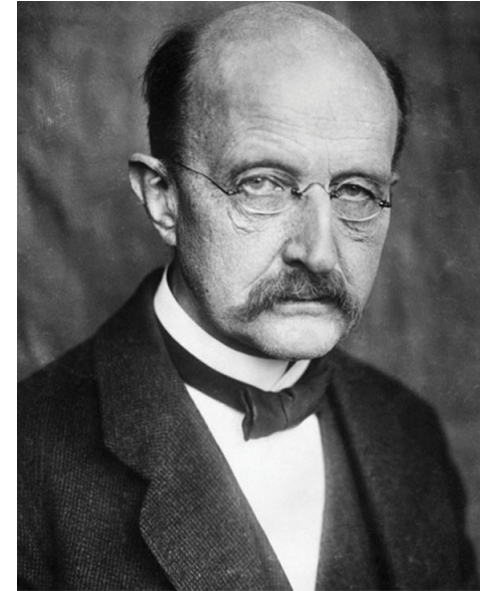


Ley de Planck

Los osciladores emiten o absorben energía cuando realizan una transición de un estado cuántico a otro. Toda la diferencia de energía entre los estados inicial y final de la transición es emitida o absorbida como un **cuanto de radiación o un fotón** (una partícula sin masa)



©2004 Thomson - Brooks/Cole

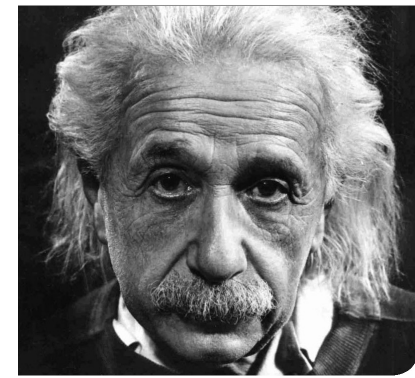


© 2004 Thomson - Brooks/Cole

Nobel de Física 1918

$$R(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$

Relatividad Especial



- Postulados de Einstein
 - Principio de relatividad: la física es la misma para todos los SRI
 - La rapidez de la luz es constante, para todos los observadores es c
- Consecuencias:
 - transformaciones de Lorentz

$$x'(t) = \gamma(x - vt); \quad t' = \gamma(t - vx/c^2); \quad \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

– La energía y el momentum son ahora: $E = \gamma mc^2; \quad p = \gamma mv$

En. Cinética $K = (\gamma - 1)mc^2$



$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

energía en reposo ($p=0$)

momentum para fotones ($m=0$)



Longitud de onda de De Broglie

Para FOTONES:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Einstein: } E = pc \\ \text{Planck: } E = hf \end{array} \right\} \lambda = \frac{h}{p}$$



Nobel de Física 1929

HIPOTESIS:

De Broglie sugirió que las partículas materiales que tengan una cantidad de movimiento p tienen una longitud de onda característica, la longitud de onda de De Broglie

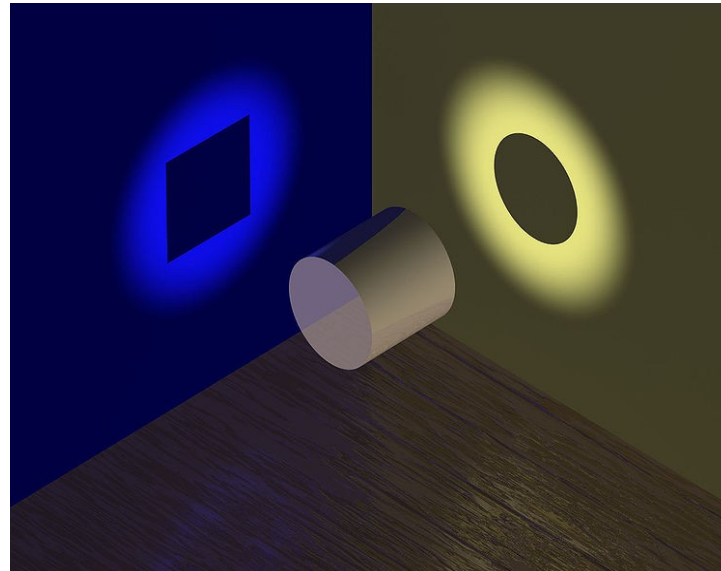
$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$



Dualidad onda-partícula

Partícula

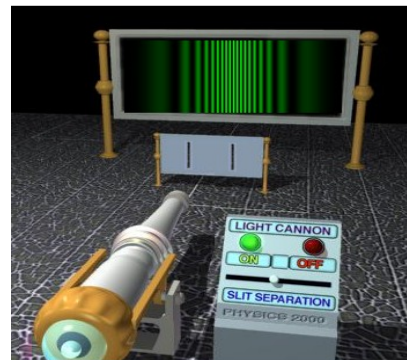
- ✓ Posición determinada
- ✓ Tiene masa



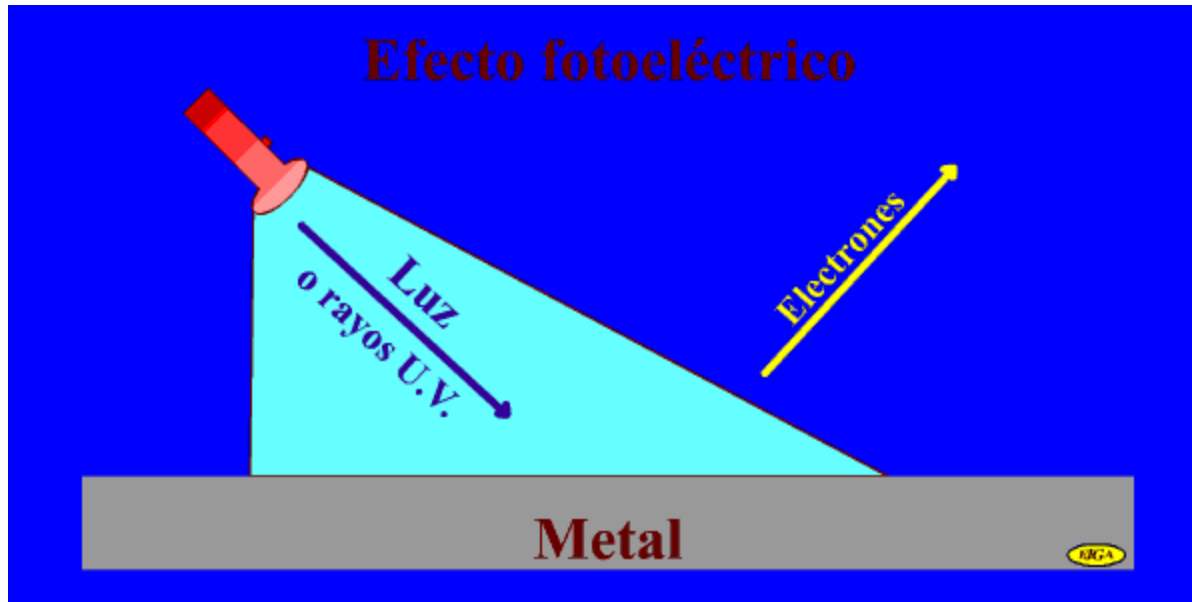
Onda

- ✓ Viaja por el espacio
- ✓ No tiene masa

La hipótesis de De Broglie fue comprobada en el experimento de Davisson-Germer



Efecto fotoeléctrico



Los metales iluminados con radiación de una determinada frecuencia emiten “fotoclectrones”
Esto fue observado a finales del siglo XIX por Hertz y Hallwachs.

Efecto fotoeléctrico

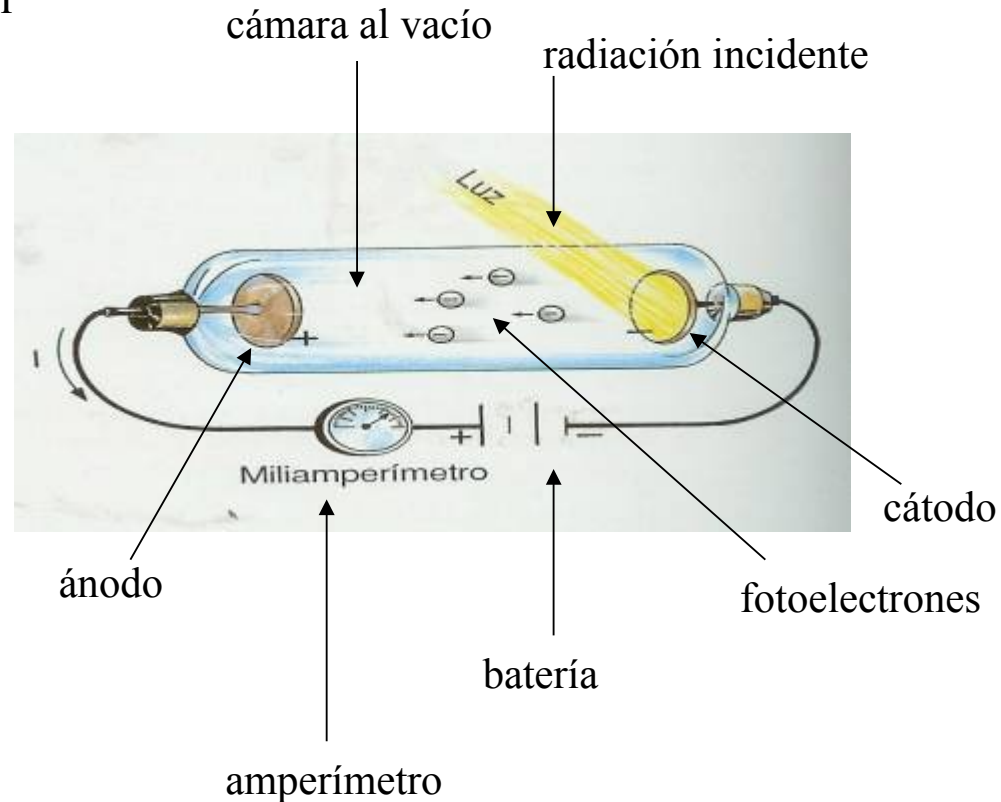
Dos placas metálicas a diferente potencial son colocadas en un tubo al vacío.

Sobre la placa metálica conectada a la terminal positiva se hace incidir REM.

Para determinadas frecuencias esta placa emite electrones.

Debido a la diferencia de potencial entre las dos placas metálicas, los electrones son acelerados hacia la placa positiva.

Esta corriente de electrones es detectada por el amperímetro conectado al circuito

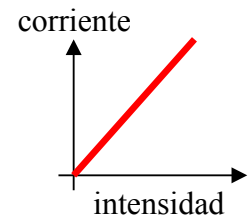


Efecto fotoeléctrico

- Existe una **frecuencia de corte**: si la frecuencia de la radiación incidente es menor no se liberan electrones de la placa (el amperímetro marca 0), independiente de la intensidad incidente.

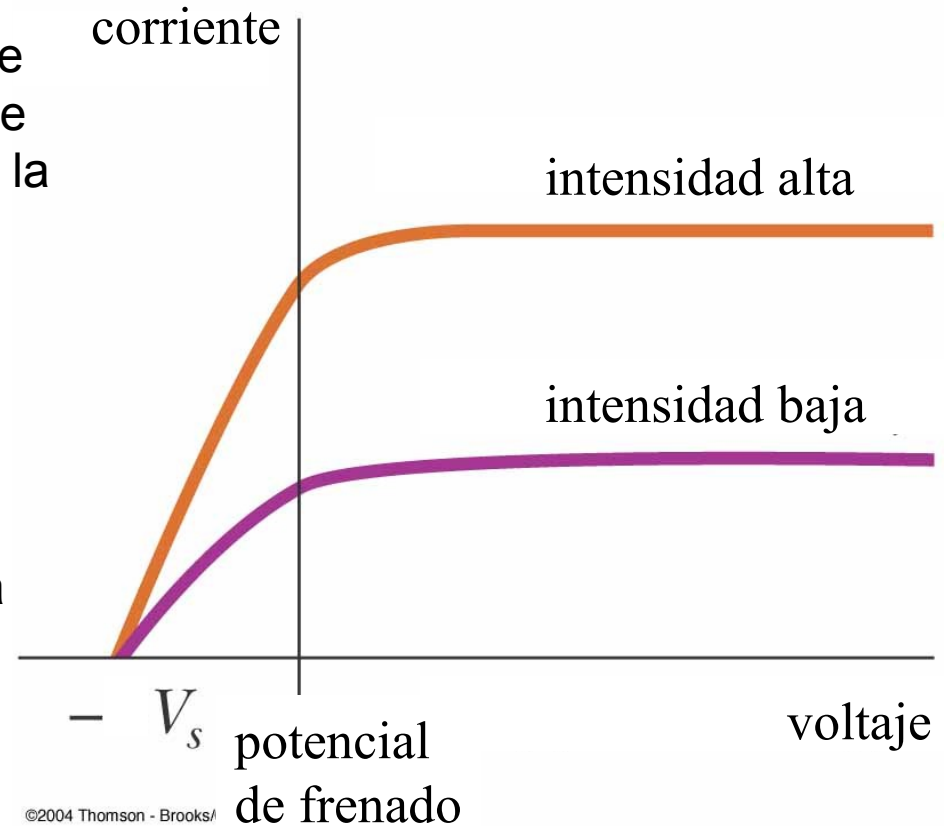
No ocurre el efecto fotoeléctrico.

- Si la frecuencia es mayor que la frecuencia de corte, el número de electrones liberados por segundo (la corriente) es proporcional a la intensidad de la radiación incidente
- Para una frecuencia dada, si la diferencia de potencial en el circuito se incrementa no hay incremento de la corriente.
- Si se invierte la polaridad de la batería, conforme aumenta el valor de la diferencia de potencial, la corriente en el circuito disminuye a cero. Esta observación indica que la carga liberada es negativa y que los electrones tienen una variedad uniforme de energías cinéticas



Efecto fotoeléctrico

- Se denomina potencial de frenado al valor del potencial para el cual la corriente se hace cero, este valor es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación incidente para frecuencias mayores que la frecuencia de corte
- Los electrones liberados aparecen de inmediato (instantáneamente) cuando se ilumina el metal, aún cuando la luz incidente sea de muy baja intensidad.



Efecto fotoeléctrico clásico

- La energía de una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud y frecuencia. Los electrones deben ser capaces de absorber energía de cualquier frecuencia. El efecto fotoeléctrico debe ser independiente de la frecuencia.
- Para bajos niveles de intensidad, el electrón tendría que esperar para “acumular” la cantidad de energía necesaria para poder escapar de la superficie metálica. Debería existir un tiempo de retardo medible, que no se observa



Efecto fotoeléctrico cuántico

- En 1905 Albert Einstein fue capaz de explicar el efecto fotoeléctrico, por lo cual recibió el premio Nobel en 1921
- Einstein asumió que la luz estaba formada por paquetes de energía denominados fotones.
- Cada partícula de luz tenía una energía $E=hf$ (Planck)
- De acuerdo con Einstein, cuando la materia absorbe luz, la partícula de materia absorbe fotones destruyéndolos. La energía se conserva puesto que la partícula de materia tiene ahora la energía del fotón

energía fotón absorbido = trabajo para liberar fotón + energía cinética del electrón

- Dependiendo de las circunstancias particulares de un electrón, éste podría ceder parte o toda su energía adquirida intentando salir del metal



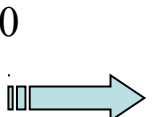
Efecto fotoeléctrico cuántico

- Existen algunos electrones para los cuales la pérdida de energía asociada es mínima, ellos corresponden a los electrones con la máxima cantidad de energía cinética en el escape
- El trabajo mínimo necesario para liberar un electrón de un metal se llama **función trabajo** W del metal: $hf = W + K_{max}$
- Si disminuimos la frecuencia de la luz incidente y por consiguiente la energía de los fotones ($E=hf$), también disminuye la energía cinética máxima de los electrones que abandonan el metal.
- Eventualmente se alcanza una frecuencia para la cual los electrones apenas escapan (energía cinética cero) y $hf_{corte} = W + 0J$
- Para frecuencias menores que la frecuencia de corte la energía de los fotones que llegan no es suficiente para dar al electrón la energía mínima necesaria (W) para escapar del metal.

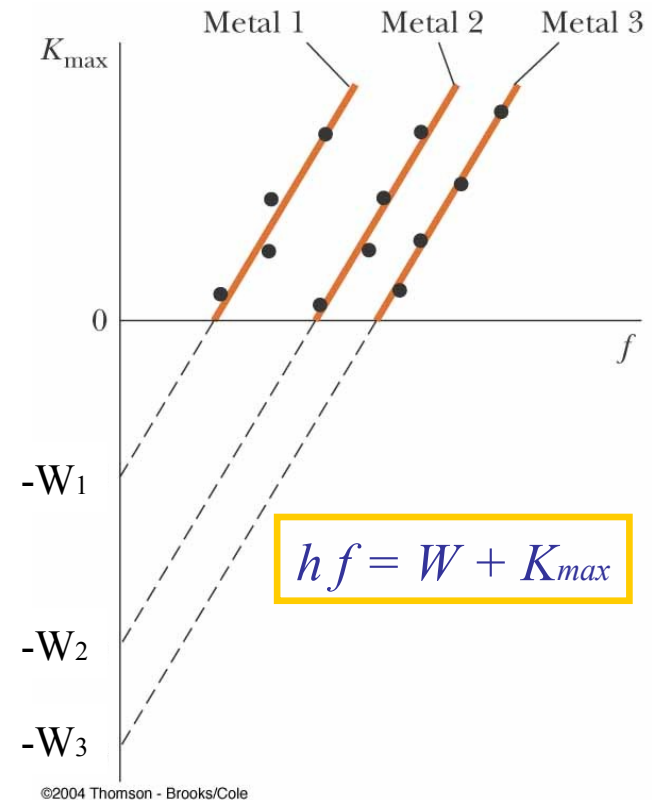
Efecto fotoeléctrico cuántico

- Conforme aumenta la diferencia de potencial desde cero hacia el valor del potencial de frenado, la corriente en el circuito disminuye de manera gradual. Sólo los electrones lanzados con suficiente energía pueden llegar a la placa opuesta
- Por conservación de la energía:

$$K_i + U_i = K_f + U_f$$

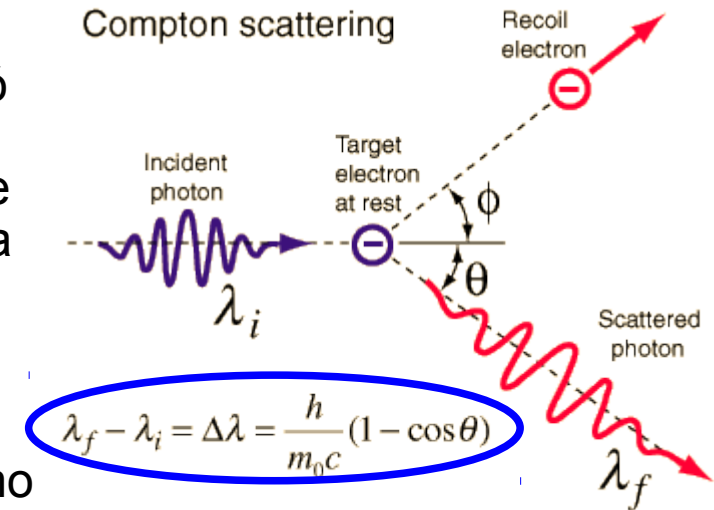


$$K_{max} = eVs$$
- El potencial de frenado es una medida directa de la energía cinética de los electrones liberados más energéticos.



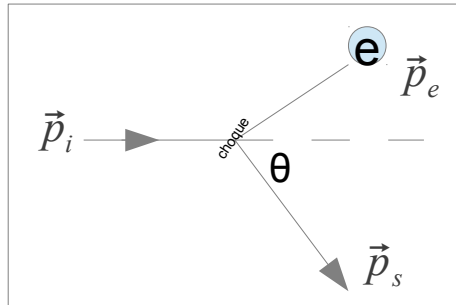
Efecto Compton

- En 1923, Arthur Compton estudiaba la interacción de rayos X con grafito. Él observó que al hacer incidir rayos X sobre grafito, el espectro de rayos X dispersados consistía de dos longitudes de onda, una longitud de onda muy similar a la incidente y una longitud de onda desplazada a un valor mayor
- Si se considera el proceso de dispersión como el choque entre un fotón y un electrón, el electrón debería absorber parte de la energía, por consiguiente el fotón dispersado debería tener menor energía (mayor longitud de onda)



Ecuación de desplazamiento de Compton, corresponde al desplazamiento de la longitud de onda incidente al ser dispersada por un electrón

Efecto Compton



Conservación del momentum

$$\vec{p}_i = \vec{p}_s + \vec{p}_e$$

$$p_e^2 = p_i^2 + p_s^2 - 2 p_i p_s \cos \theta$$

Conservación de la energía

$$E_i + E_{e(i)} = E_s + E_{e(f)}$$

$$p_i c + m_e c^2 = p_s c + \sqrt{p_e^2 c^2 + (m_e c^2)^2}$$

$$\frac{1}{p_s} - \frac{1}{p_i} = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_s - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

- El corrimiento de la longitud de onda depende del ángulo al cual se observan los rayos X dispersados. No se observa corrimiento si $\theta=0^\circ$ y el corrimiento es máximo si $\theta=180^\circ$.

