

# Física III

## clase 19 (26/05/2011)

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

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

Física III    MAC    I-2011

1

## Radiación Térmica

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

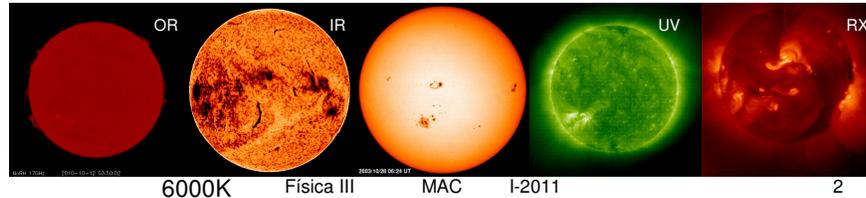


Si la temperatura de un objeto es lo suficientemente elevada ( $T > 0K$ ), éste será capaz de emitir radiación



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

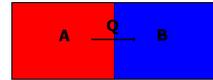


# Radiación Térmica

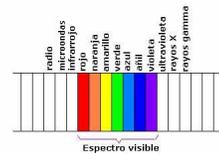
Los cuerpos no sólo emiten radiación térmica, sino que también son capaces de absorberla de su entorno



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



El espectro de radiación térmica de un cuerpo sólido caliente es continuo, y depende de la temperatura

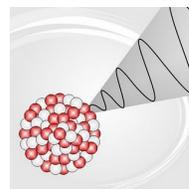
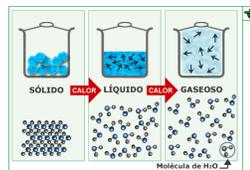


EL ESPECTRO DE LA RADIACION

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

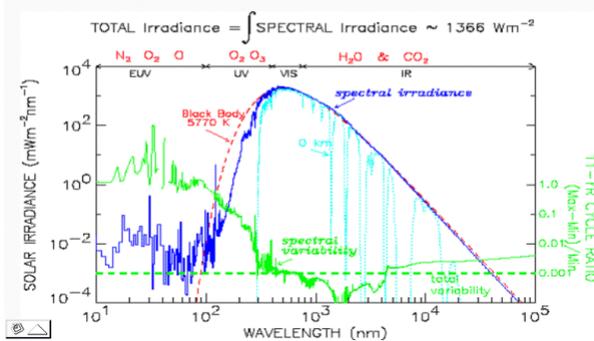


## Radiación Térmica

- 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

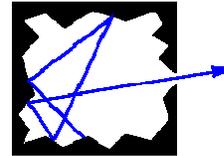
## Espectro del Sol

### SOLAR SPECTRUM, VARIABILITY and ATMOSPHERIC ABSORPTION

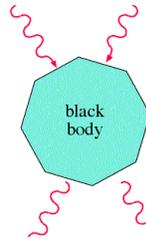


## Radiación de cuerpo negro

- 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 radia 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

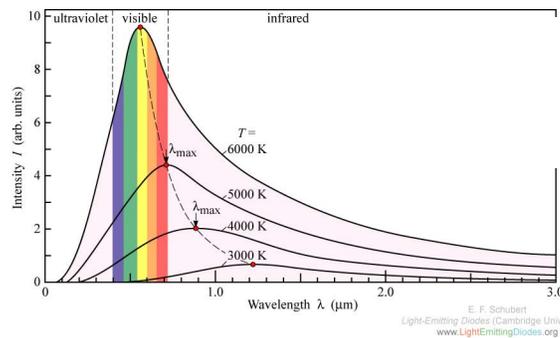


Emite todas las radiaciones posibles

Física III    MAC    I-2011

7

## Espectro de la radiación de cuerpo negro



Física III    MAC    I-2011

8

## Propiedades de la radiación de cuerpo negro (experimentales)

- **Ley de Stefan-Boltzmann:** La potencia total irradiada por unidad de área de la abertura de la cavidad, sumada para todas las longitudes de onda, se denomina **intensidad irradiante**  $I(T)$ :

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

donde  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4\text{)]}$  es la constante de Stefan-Boltzmann

- Los objetos calientes ordinarios irradian siempre menos eficientemente de lo que lo hacen los cuerpos negros:

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

donde  $\epsilon$  se denomina emisividad de la superficie.  $\epsilon$  es igual a 1 para un cuerpo negro y menor que uno para objetos ordinarios. Casi siempre es función de la temperatura

## Propiedades de la radiación de cuerpo negro (experimentales)

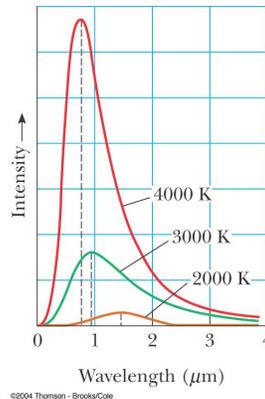
- **Radiancia espectral:** nos dice cómo varía la intensidad de la radiación del cuerpo negro con la longitud de onda para una determinada temperatura. Se define de modo que  $R(\lambda)d\lambda$  corresponde a la potencia irradiada por unidad de superficie entre  $\lambda$  y  $\lambda+d\lambda$
- Podemos encontrar la intensidad radiante  $I(T)$  para cualquier temperatura integrando la radiancia espectral para el rango de longitudes de onda consideradas

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

## Propiedades de la radiación de cuerpo negro (experimentales)

- **Ley de desplazamiento de Wien:** la longitud de onda para la cual la radiancia espectral es máxima disminuye a medida que aumenta la temperatura. Wilhelm Wien dedujo que:

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



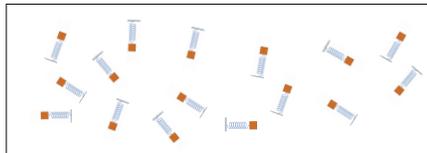
## Ejemplos

- Determine la longitud de onda máxima de la radiación de un cuerpo negro emitida por:
  - El cuerpo humano a 35 °C
  - El filamento de tungsteno de una ampollita a 2000K
  - El sol, con una temperatura superficial aproximada de 5800K

## Ejemplo

- El radio de nuestro Sol es de  $6.96 \cdot 10^8$  [m] y su energía total emitida es de  $3.77 \cdot 10^{26}$  [W]. Suponiendo que la superficie del Sol radia como un cuerpo negro, calcule la temperatura de la superficie y determine  $\lambda_{\max}$

- Todas las propiedades anteriores son resultados experimentales para la radiación de cuerpo negro
- ¿Qué teoría describe la física detrás de la emisión de esta radiación?
- Una teoría adecuada debe ser capaz de predecir la forma de las curvas y el comportamiento observado

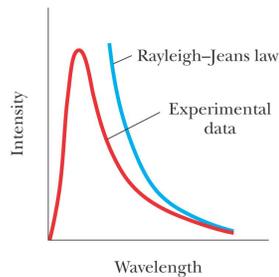


## Ley de Rayleigh-Jeans

- 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

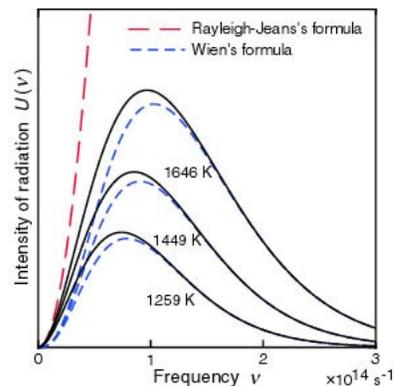
$$R(T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

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



## 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 :

$$E_n = nhf$$

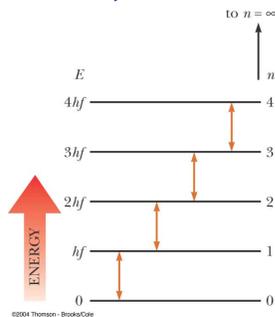
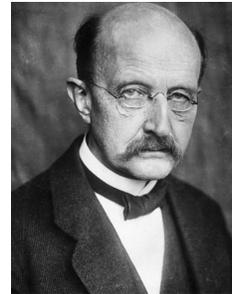
$n$  son enteros positivos,  $f$  es la frecuencia de oscilación y  $h$  es la constante de Planck  $h = 6.626 \times 10^{-34} [Js]$

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

$n$  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, un fotón**



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

## Ejemplo

- Un cuerpo de 300 [g] unido a un resorte cuya constante de fuerza  $k$  es de 3 [N/m] oscila con una amplitud de 10 [cm]. Trate este sistema como un oscilador clásico y calcule la energía asociada y la frecuencia de oscilación.
- Conforme disminuye la amplitud de las oscilaciones, la teoría cuántica predice que la energía caerá “a saltos”, ¿cuál será el número cuántico asociado al sistema? ¿qué tamaño tendrán los cuantos de energía?



## 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  $K = (\gamma - 1)mc^2$

$$\Rightarrow E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{energía en reposo } (p=0) \\ \text{momentum para fotones } (m=0) \end{array} \right.$$



## Longitud de onda de De Broglie

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

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

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

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



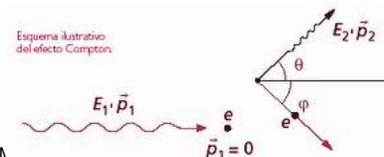
## Efecto Compton

Desplazamiento de la longitud de onda incidente al ser dispersada por un electrón

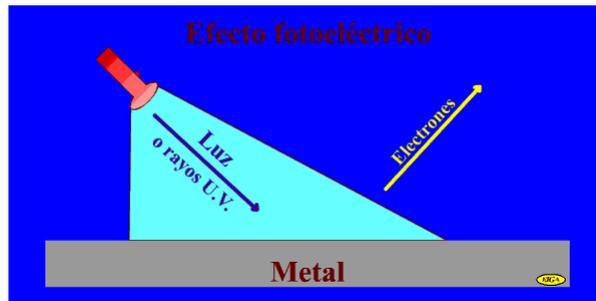
$$\lambda' - \lambda_0 = \underbrace{\frac{h}{m_e c}}_{= 0.00243 \text{ [nm]}} (1 - \cos \theta) \quad \text{Ecuación de desplazamiento de Compton}$$

Si la masa del electrón es reemplazada por la masa de una partícula en el núcleo, el desplazamiento de Compton es despreciable

La deducción utiliza la física en una colisión elástica: conservación momentum y conservación energía



# Efecto fotoeléctrico



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

# El efecto fotoeléctrico

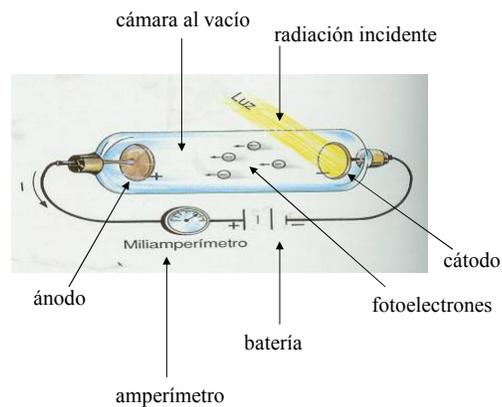
Dos placas metálicas a diferente potencial son colocadas en un tubo al vacío.

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



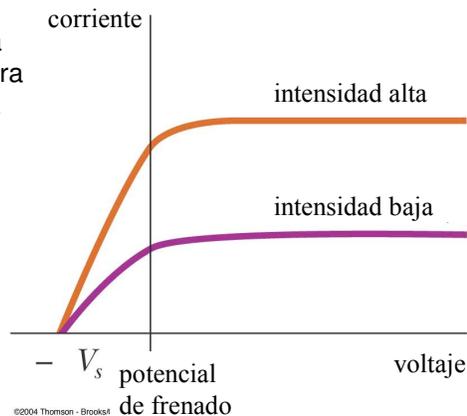
## Efecto fotoeléctrico

- 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

- El valor del potencial de frenado 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.



©2004 Thomson - Brooks

## 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.
- Con el tiempo 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.

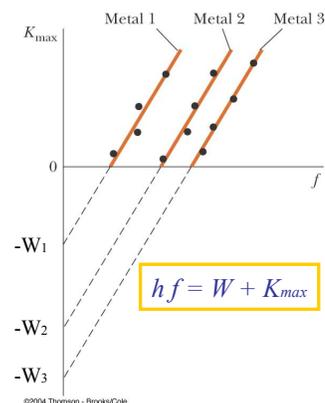


## Efecto fotoeléctrico cuántico

- 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:

$$K_i + U_i = K_f + U_f \quad \Rightarrow \quad K_{max} = eV_s$$

- El potencial de frenado es una medida directa de la energía cinética de los electrones liberados más energéticos.



## Ejercicios

- Un láser de Helio-neón de baja energía tiene una potencia de salida de 1 [mW] de luz cuya longitud de onda es de 632.8 [nm]
  - Calcule la energía de cada fotón
  - Determine el número de fotones emitidos por el láser cada segundo
- El hierro tiene una función de trabajo de 4,7 [eV]. Calcule la longitud de onda de corte correspondiente para el efecto fotoeléctrico en este metal
- Luz UV de 200 [nm] incide sobre una superficie de hierro recién pulida. Encuentre:
  - El potencial de frenado
  - La energía cinética máxima de los electrones liberados
  - La velocidad de estos electrones



## Principio de Incertidumbre

- Siempre que se mida la posición o la velocidad de una partícula en cualquier momento habrá incertidumbres experimentales incluidas en las mediciones
- Los instrumentos podrían mejorarse para obtener una incertidumbre muy pequeña (clásicamente)
- **La teoría cuántica dice que es imposible medir simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula con precisión infinita (1927)**
- Esto se conoce como el principio de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \left( = \frac{h}{4\pi} \right)$$

↑  
 incertidumbre en la posición

↑  
 incertidumbre en el momentum



## Principio de Incertidumbre

- Físicamente es imposible medir de forma simultánea la posición exacta y la cantidad de movimiento exacto de una partícula
- Las incertidumbres se presentan debido a la estructura cuántica de la materia
- Una manera alternativa de escribir el principio de incertidumbre es:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$