


Óptica

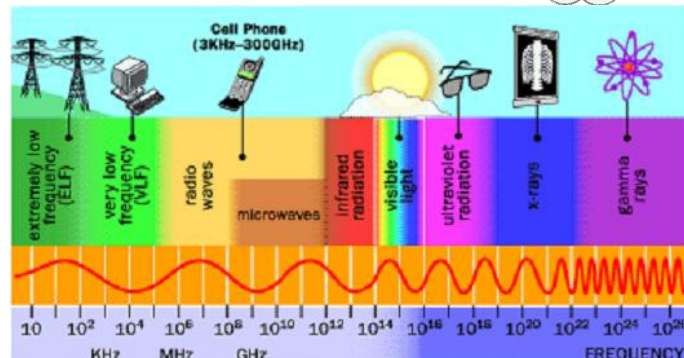
FISICA III
230006 – 230010
II 2010 MAC

La naturaleza dual de la luz

- **C. Huygens** (1678): Teoría Ondulatoria de la Luz
 - La luz son ondas (similares a las de sonido, necesita medio para propagarse)
 - Explica reflexión y refracción
- **I. Newton** (1704): Teoría Corpuscular de la Luz
 - La luz son partículas
 - Explica reflexión y refracción
- **T. Young** (1801): experimento de la doble rendija mostró por primera vez la naturaleza ondulatoria de la luz: interferencia (difracción, polarización)
- **J.C. Maxwell** (1873): muestra que la luz es una onda electromagnética
- **H. Hertz** (1887): creó por primera vez ondas electromagnéticas y encontró un fenómeno incompatible con la naturaleza ondulatoria de la luz: el efecto fotoeléctrico
- **A. Einstein** (1905): explica el efecto fotoeléctrico: fotones

La naturaleza de la luz

- La luz es un caso particular de radiación electromagnética (la parte del espectro electromagnético que podemos ver) 



II 2010 MAC

Física III --- UBB

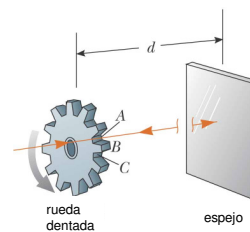
$$c = \lambda f$$

en el vacío

3

La rapidez de la luz

- La rapidez de la luz es constante para cada medio: en el vacío y en el aire su valor es aproximadamente $c = 3 \times 10^8$ [m/s]
- G. Galileo** (1638): fue el primero que intentó determinar la rapidez de la luz: colocó dos observadores separados una distancia de 10 [km] enviándose señales luminosas. El tiempo que tarda la luz es menor que el tiempo de reacción de una persona.
- O. Roemer** (1675): determinó la rapidez de la luz utilizando una luna del planeta Júpiter (lo)
- A. Fizeau** (1849): diseñó un experimento para medir la rapidez de la luz en la Tierra



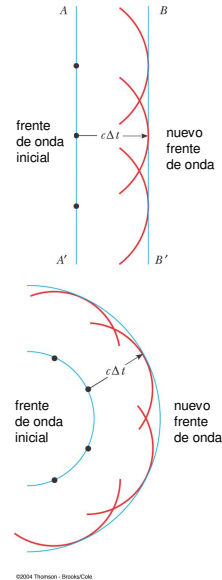
II 2010 MAC

Física III --- UBB

4

Principio de Huygens

- El principio de Huygens fue propuesto en 1678 por Christiaan Huygens.
- Este principio nos permite decir dónde estará un frente de onda dado en algún momento en el futuro si conocemos su posición actual
- *“Todos los puntos de un frente de onda dado pueden considerarse como fuentes puntuales para la producción de ondas esféricas secundarias, las cuales se propagan hacia afuera en el medio con la rapidez de propagación característica en ese medio. Después de que un intervalo de tiempo ha pasado, la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a las ondas secundarias”*



II 2010 MAC

Física III --- UBB

5

Principio de Fermat

- Pierre Fermat (1601-1665) desarrolló un principio general que puede ser usado para determinar el camino que sigue la luz cuando viaja de un punto a otro
- *“Cuando un rayo de luz viaja entre dos puntos el camino que sigue corresponde a aquel que requiere el menor intervalo de tiempo”*
- Una consecuencia de este principio es que los haces de luz viajan en línea recta en un medio homogéneo, dado que una línea recta corresponde al camino más corto entre dos puntos
- ***El principio de Huygens y el principio de Fermat pueden ser usados para derivar las leyes que determinan la trayectoria de un haz de luz cuando se encuentra con una interfase entre dos medios, los fenómenos de reflexión y refracción.***

II 2010 MAC

Física III --- UBB

6

Óptica

- El estudio de los fenómenos relacionados con la luz considera dos enfoques diferentes:
 - **óptica geométrica:** la luz como un rayo (la trayectoria de una partícula de luz)
 - Es útil para estudiar los fenómenos de reflexión y refracción
 - Es útil para describir la interacción de la luz con lentes y espejos
 - **óptica física:** la luz como una onda
 - Describe los fenómenos de interferencia difracción y polarización

II 2010 MAC

Física III --- UBB

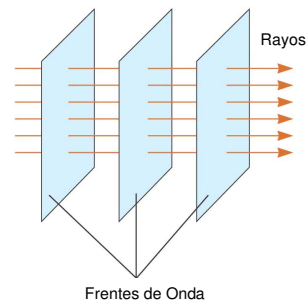
7

Óptica Geométrica

- Estudia la propagación de la luz asumiendo que, en un medio uniforme, ésta viaja en una dirección fija en línea recta
- Cuando la luz se encuentra con la superficie de un medio diferente o cuando las propiedades ópticas del medio cambian, la luz cambia de dirección

- **Rayos y Frentes de Onda:**
Los rayos son rectas imaginarias que apuntan en la dirección en la cual se propaga la luz. Los frentes de onda son superficies perpendiculares a los rayos.

Frentes de onda planos (rayos paralelos entre sí)
Frentes de onda esféricos o circulares (rayos radiales)



II 2010 MAC

Física III --- UBB

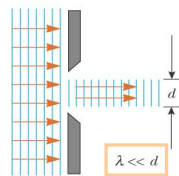
©2004 Thomson - Brooks/Cole

8

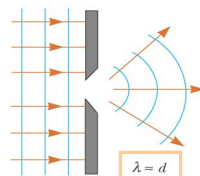
Óptica Geométrica

Si la luz encuentra en su camino una barrera con un agujero pueden presentarse tres situaciones:

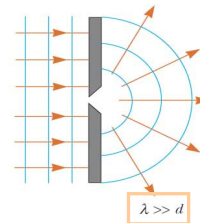
El frente de onda continúa moviéndose en la dirección original después de atravesar el agujero



El frente de onda se deforma debido al fenómeno de difracción. Los rayos cambian de dirección.



El frente de onda plano se transforma en una fuente puntual, el frente de onda es ahora circular



Podemos usar óptica geométrica

II 2010 MAC

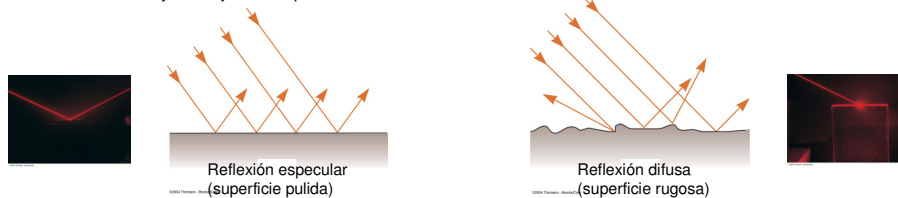
Física III --- UBB

9

Reflexión

- El fenómeno de reflexión se presenta cuando un haz de luz se encuentra con un obstáculo en su camino (una interfase entre medios diferentes)
- Parte de la luz incidente es reflejada (cambia de dirección)
- La dirección del rayo reflejado es en un plano perpendicular a la superficie reflectante que contiene al rayo incidente

Los rayos reflejados son paralelos entre sí



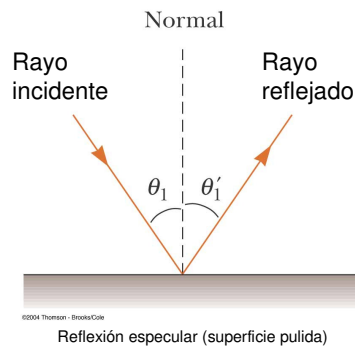
Una superficie se comporta como especular cuando las imperfecciones en su superficie son más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente

II 2010 MAC

Física III --- UBB

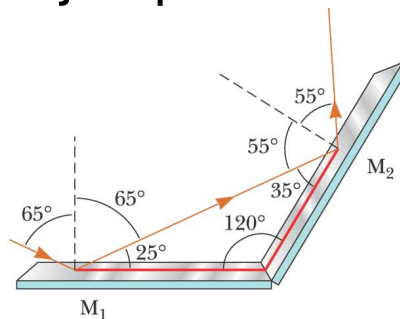
10

Ley de reflexión



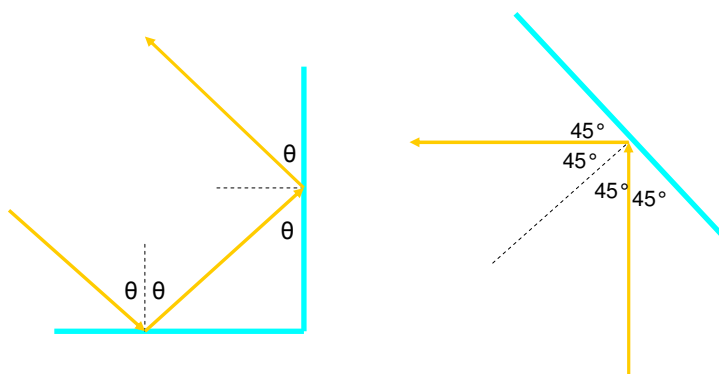
$$\theta_1 = \theta'_1$$

Ejemplo



Dos espejos forman un ángulo de 120° .
Un rayo incide en el espejo M_1 formando un ángulo de 65° con la normal,
¿qué ángulo forma el rayo reflejado por el espejo M_2 ?

Ejemplos



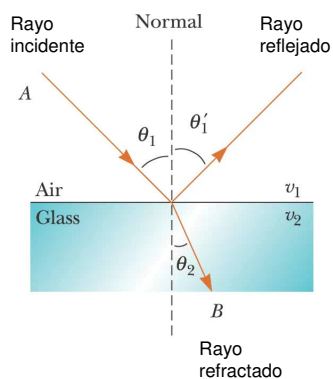
II 2010 MAC

Fisica III --- UBB

13

Refracción

- Cuando un rayo de luz que viaja a través de un medio transparente y encuentra una interfase que lo lleva a otro medio transparente, parte de la energía es reflejada y parte de la energía pasa al segundo medio.
- El rayo en el segundo medio cambia de dirección, se dice que es refractado
- El rayo incidente, el rayo reflejado y el rayo refractado pertenecen al mismo plano
- El camino entre A y B en la figura es reversible



$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constante}$$

II 2010 MAC

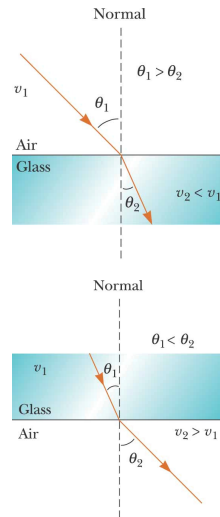
Fisica III --- UBB

14

Refracción

- Si la luz se mueve desde un medio material en el cual la rapidez es mayor a uno en la cual la rapidez es menor entonces el ángulo (respecto de la normal) disminuye
- Si la luz se mueve desde un medio material en el cual la rapidez es menor a uno en la cual la rapidez es mayor entonces el ángulo (respecto de la normal) aumenta

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constante}$$



II 2010 MAC

Física III --- UBB

15

Índice de refracción

$$n = \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en un medio}} = \frac{c}{v}$$

$n > 1$ porque $c > v$

n es adimensional

Indices of Refraction*			
Substance	Index of Refraction	Substance	Index of Refraction
<i>Solids at 20°C</i>		<i>Liquids at 20°C</i>	
Cubic zirconia	2.20	Benzene	1.501
Diamond (C)	2.419	Carbon disulfide	1.628
Fluorite (CaF ₂)	1.434	Carbon tetrachloride	1.461
Fused quartz (SiO ₂)	1.458	Ethyl alcohol	1.361
Gallium phosphide	3.50	Glycerin	1.473
Glass, crown	1.52	Water	1.333
Glass, flint	1.66		
Ice (H ₂ O)	1.309	<i>Gases at 0°C, 1 atm</i>	
Polystyrene	1.49	Air	1.000 293
Sodium chloride (NaCl)	1.544	Carbon dioxide	1.000 45

* All values are for light having a wavelength of 589 nm in vacuum.

II 2010 MAC

© 2004 Thomson - Brooks/Cole

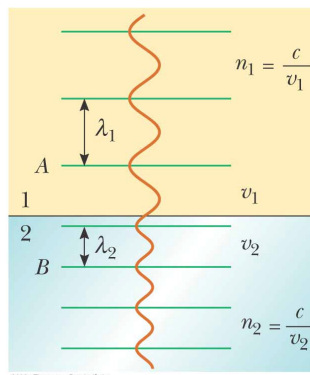
Ley de Snell

- Cuando la luz viaja de un medio a otro la energía que transporta la luz no cambia. Esta energía depende de la frecuencia de la luz.
- Dado que cuando la luz viaja de un medio a otro su frecuencia no cambia, debe cambiar su longitud de onda puesto que $v = \lambda f$

$$\left. \begin{array}{l} v_1 = f\lambda_1 \\ v_2 = f\lambda_2 \end{array} \right\} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\underbrace{\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2}_{\frac{n_1}{n_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$$



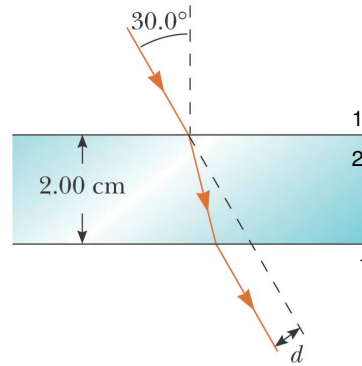
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Ejemplos

- Un haz de luz de longitud de onda 550 [nm] que viaja en el aire incide en un material transparente. El haz incidente forma un ángulo de 40° con la normal y el ángulo refractado forma un ángulo de 26° con la normal. Encuentre el índice de refracción del material.
- Un haz de luz de 589 [nm] viaja por el aire cuando incide en una superficie suave de vidrio formando un ángulo de 30° con la normal. Encuentre el ángulo en el cual se refracta la luz ($n_{\text{vidrio}}=1.52$)
- Un láser en un lector de CD genera una luz con longitud de onda 780 [nm] en el aire.
 - Encuentre la rapidez de la luz en el plástico del CD ($n_{\text{CD}}=1.55$)
 - ¿Cuál es la longitud de onda de la luz en este plástico?

Ejemplo

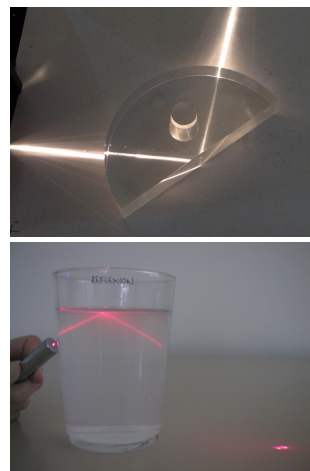
- Un haz de luz pasa de un medio 1 a un medio 2. Muestre que el rayo que emerge del medio 1 es paralelo al haz incidente
- Cuando el haz de luz pasa a través del bloque de vidrio ($n=1.5$) se desvía respecto de su dirección original una distancia d , encuentre esta distancia



©2004 Thomson - Brooks/Cole

Reflexión total interna

- Este fenómeno se presenta sólo cuando un rayo de luz atraviesa desde un medio 1 a un medio 2 donde $n_1 > n_2$.
- El rayo de luz se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la interfase entre ambos medios reflejándose completamente.
- Este fenómeno se presenta para ángulos de incidencia mayores que un cierto valor crítico.



Reflexión total interna

Para determinar el ángulo crítico recurrimos a la ley de Snell:

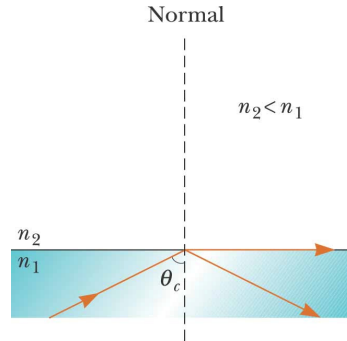
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} > 1$$

Dado que seno es una función creciente:

$$\theta_i < \theta_t \leq 90^\circ$$

$$\theta_t = 90^\circ \Rightarrow \theta_i = \theta_c$$



©2004 Thomson - Brooks/Cole

El caso:

$$n_2 > n_1 \Rightarrow \theta_i > \theta_t$$

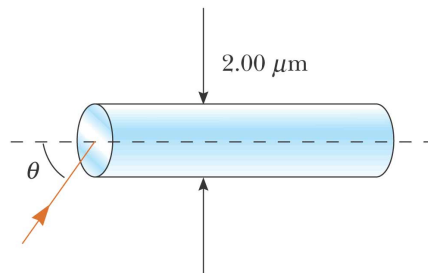
Ejemplo

- Considere un espejismo común formado por el aire caliente sobre una carretera. El conductor de un camión cuyos ojos están a 2 [m] del pavimento, donde $n=1.0003$ mira hacia delante y percibe la ilusión de un charco de agua adelante en el camino, donde su línea de vista forma un ángulo de 1.2° bajo la horizontal. Encuentre el índice de refracción del aire que está apenas encima de la superficie del camino



Ejemplo

- Determine el ángulo máximo θ en el que rayos de luz que inciden sobre el extremo del tubo de la figura están sujetos a reflexión total interna a lo largo de las paredes del tubo. Suponga que el tubo tiene un índice de refracción de 1.36 y el medio exterior es aire



©2004 Thomson - Brooks/Cole

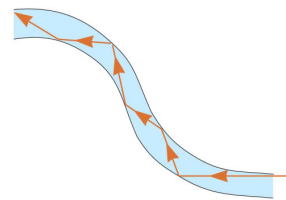
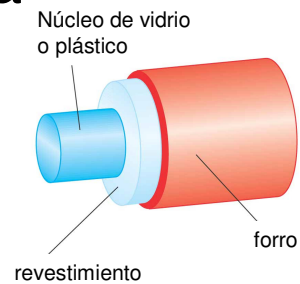
II 2010 MAC

Física III --- UBB

23

Fibra óptica

- Una aplicación de la reflexión total interna son las fibras ópticas, varillas de vidrio o plástico que se usan para transportar luz de un lugar a otro.
- La luz es confinada a moverse al interior de la varilla, incluso alrededor de curvas
- El revestimiento tiene un índice de refracción menor que el núcleo
- Al viajar por la fibra óptica se pierde muy poca intensidad de la luz



©2004 Thomson - Brooks/Cole



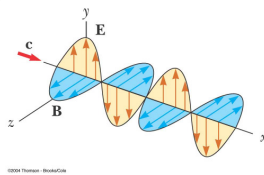
II 2010 MAC

Física III --- UBB

24

Polarización de ondas luminosas

- Un haz normal de luz (proveniente de una lámpara o del Sol) está formado por un gran número de ondas emitidas por los átomos que conforman la fuente luminosa
- Cada átomo produce una onda que tiene una orientación particular del campo eléctrico \mathbf{E} , correspondiente a la dirección de vibración atómica
- La **dirección de polarización** de cada una de las ondas individuales se define como la dirección en la cual vibra el campo eléctrico



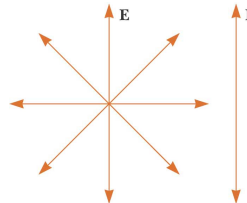
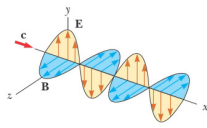
II 2010 MAC

Física III --- UBB

25

Polarización de ondas luminosas

- Cuando cualquier dirección de vibración de la fuente de las OEM es factible, la onda electromagnética resultante es una superposición de ondas que vibran en muchas direcciones diferentes. El resultado es un **haz de luz no polarizado**
- Cuando el campo eléctrico resultante de un haz de luz vibra en un única dirección en un punto particular se dice que **el haz está linealmente polarizado**
- Al plano formado por \mathbf{E} y la dirección de propagación se llama **plano de polarización**.



II 2010 MAC

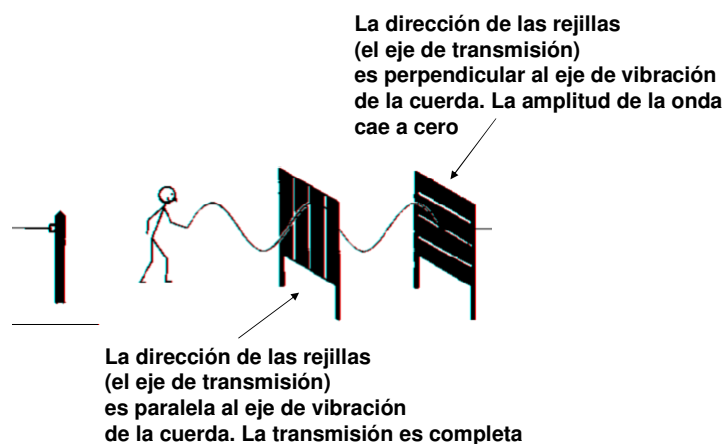
Física III --- UBB

26

Polarización por absorción selectiva

- Es posible obtener un haz linealmente polarizado a partir de luz no polarizada eliminando todas las ondas del haz con excepción de aquellas cuyos vectores de campo eléctrico vibran en la dirección deseada
- La técnica más común es usar un material que transmita sólo las ondas cuyos campos eléctricos vibren en un plano paralelo a cierta dirección
- En 1938 se descubrió un material llamado polaroid que polariza la luz mediante absorción selectiva efectuada por moléculas orientadas
- Las moléculas absorben la luz cuyo vector de campo eléctrico es paralelo a su longitud y dejan pasar aquella que tenga un vector campo eléctrico perpendicular a su longitud

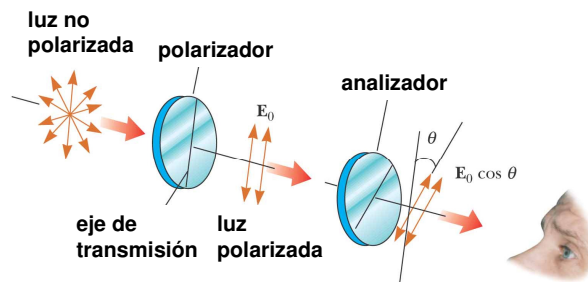
Análogo mecánico



Polarización por absorción selectiva

El **eje de transmisión** corresponde a la dirección perpendicular a las cadenas moleculares

En un polarizador ideal se transmite toda la luz cuyo **E** sea paralelo al eje de transmisión y se absorbe toda la luz cuyo **E** sea perpendicular al eje de transmisión



II 2010 MAC

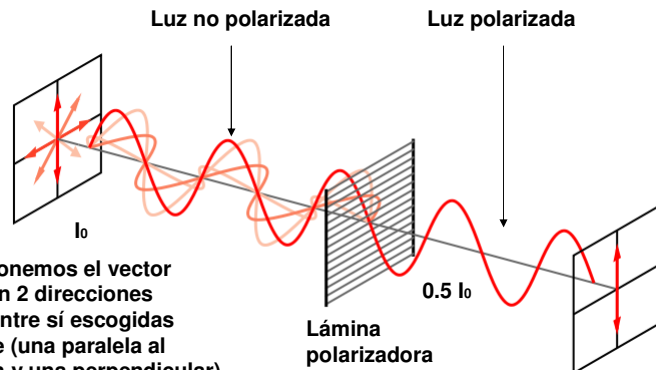
©2004 Thomson - Brooks/Cole

Física III --- UBB

29

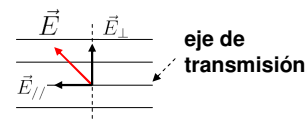
Polarización por absorción selectiva

$$I = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c}$$



Cuando descomponemos el vector campo eléctrico en 2 direcciones perpendiculares entre sí escogidas convenientemente (una paralela al eje de transmisión y una perpendicular), notamos que en promedio sólo la mitad de la intensidad atraviesa la lámina polarizadora (en un polarizador ideal)

$$\vec{E} = \vec{E}_{//} + \vec{E}_{\perp}$$



II 2010 MAC

Física III --- UBB

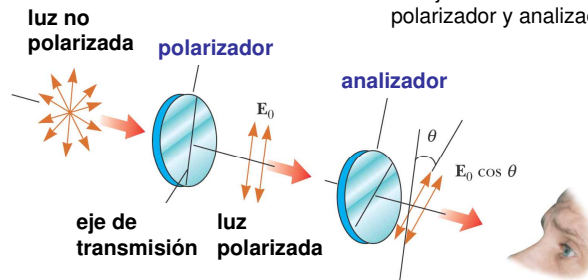
El promedio de la función sen^2 y cos^2 es 0.5 30

Ley de Malus

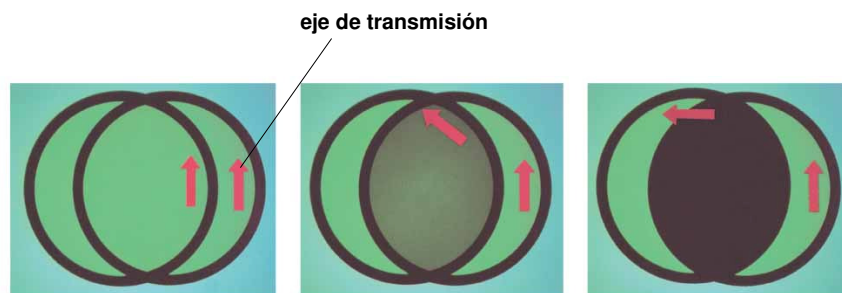
Cuando un polarizador perfecto es colocado en el camino de un haz de luz polarizado, la intensidad de la luz que pasa a través del polarizador es dada por:

$$I = I_m \cos^2 \theta$$

θ es el ángulo que se forma entre los ejes de transmisión del polarizador y analizador

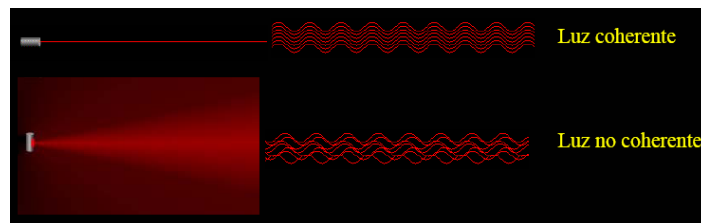


Polarizador



Interferencia

- Condiciones para que se presente interferencia
 - Las fuentes deben ser coherentes: deben mantener una fase constante entre ellas
 - Las fuentes deben ser monocromáticas: deben tener la misma longitud de onda

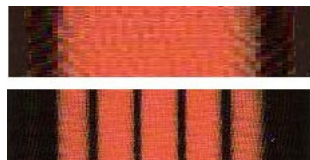
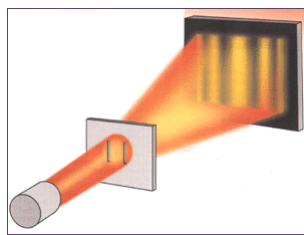


II 2010 MAC

Física III --- UBB

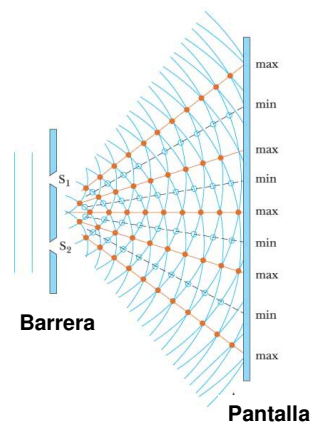
33

Experimento de Young



Una rendija

Dos rendijas



Barrera

Pantalla

II 2010 MAC

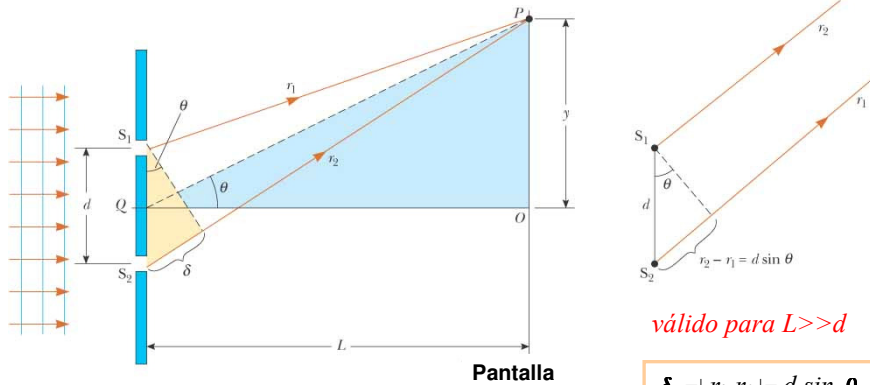
Física III --- UBB

©2004 Thomson - Brooks/Cole

34

Experimento de Young

Para $d \gg \lambda$ se presenta interferencia debido a la diferencia de camino optico



©2004 Thomson - Brooks/Cole

$$L \gg d \implies \theta \ll 1 \text{ [rad]} \implies \theta \sim \sin \theta \sim \tan \theta = y/L$$

II 2010 MAC

Fisica III --- UBB

35

Máximos y mínimos de interferencia

- Interferencia completamente destructiva. Los mínimos de interferencia se presentan cuando:

$$\delta_{ID} = d \sin \theta_{ID} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$y_{ID} = \frac{\lambda L}{2d} (2m + 1) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Interferencia constructiva. Los máximos de interferencia se presentan cuando:

$$\delta_{IC} = d \sin \theta_{IC} = m\lambda$$

$$y_{IC} = \frac{\lambda L}{d} m \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

II 2010 MAC

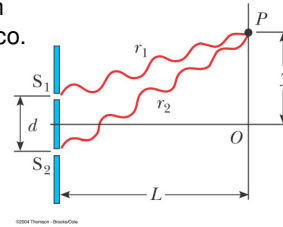
Fisica III --- UBB

36

Distribución de intensidad

Los campos eléctricos provenientes de S_1 y S_2 no llegan en fase al punto P debido a la diferencia de camino óptico. El campo eléctrico resultante en P es:

$$E_P = 2E_0 \cos \frac{\phi}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right)$$



donde E_0 es la amplitud del campo eléctrico en S_1 y S_2

Dado que la intensidad es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, la intensidad promedio en la posición y es dada por:

$$I = I_{max} \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \approx I_{max} \cos^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda L} y \right)$$

$I_{max} = 4I_0$ donde I_0 es la intensidad de S_1 o de S_2

II 2010 MAC

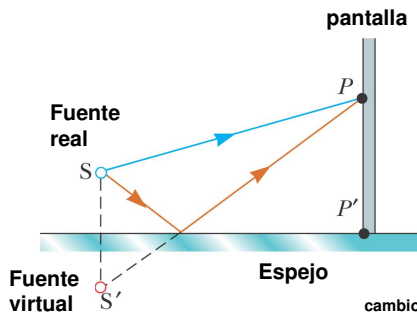
Física III --- UBB

La diferencia de camino óptico se puede representar como una diferencia de fase mediante la relación:

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{\phi}{2\pi}$$

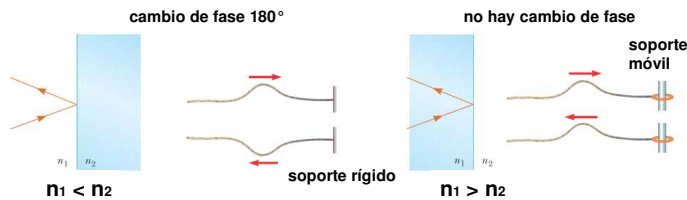
37

Espejo de Lloyd



Se produce interferencia debido a la diferencia de camino óptico entre el rayo que viaja directamente a P desde S y el rayo reflejado

El rayo reflejado está 180° fuera de fase respecto del rayo incidente. En el punto P' se observa un mínimo de interferencia.



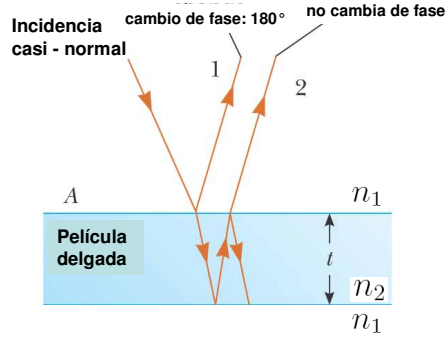
©2004 Thomson - Brooks/Cole

II 2010 MAC

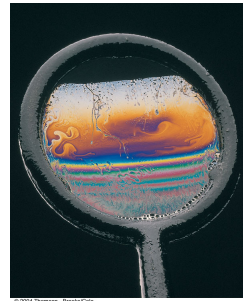
Física III --- UBB

38

Interferencia en películas delgadas



Si la película es muy delgada la diferencia de camino óptico tiende a cero, pero se observa un mínimo de intensidad debido al desfase por la reflexión. Eso se observa en la película de jabón, en la parte superior la película es más delgada, por ello se ve oscura.

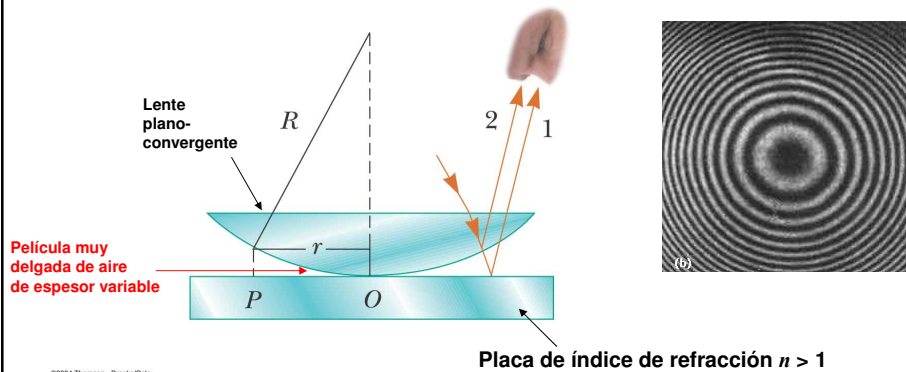


máximos $2t \frac{n_2}{n_1} = (2m + 1) \frac{\lambda_1}{2}$

mínimos $2t \frac{n_2}{n_1} = m \lambda_1$

$m = 0, 1, 2, \dots$

Anillos de Newton



Las condiciones para máximos y mínimos son las mismas que antes, pero el patrón de interferencia tiene simetría radial. El radio de los mínimos es:

$$r_m = \sqrt{\frac{Rm\lambda_i n_i}{n_t}} \quad \text{min}$$

- Presión de Radiación (IN)
- absorción total → $p_r = \frac{\langle S \rangle}{c}$
- reflexión total → $p_r = 2 \frac{\langle S \rangle}{c}$

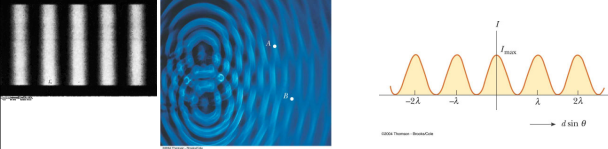
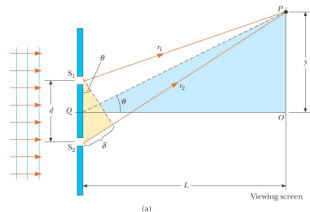
$$\langle S \rangle = I = \frac{\bar{P}}{A}$$

$$\bar{u} = \frac{\epsilon_0 E_m^2}{2} = \frac{B_m^2}{2\mu_0}$$

$$B_m = \frac{E_m}{c} \quad I = c\bar{u}$$

- Reflexión $\theta_i = \theta_r$
- reflexión total interna → $n_i > n_t$
- cambio de fase $n_i < n_t$
- Refracción → f se mantiene constante
- índice de refracción $n = \frac{c}{v} \quad v = \lambda f$
- ley de Snell → $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$

II 2010 MAC
Física III --- UBB
41



- Interferencia
- máximos y mínimos

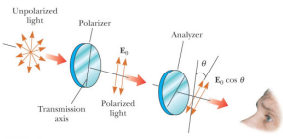
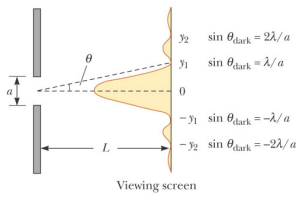
$$d \sin \theta_{max} = m\lambda \quad \rightarrow \quad y_{max} = \frac{\lambda L}{d} m$$

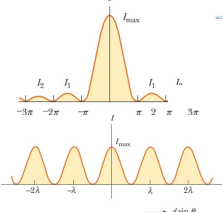
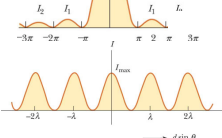
$$d \sin \theta_{min} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow \quad y_{min} = \frac{\lambda L}{2d} (2m + 1)$$

- intensidad → $I = I_m \cos^2 \frac{\phi}{2} = I_m \cos^2 \left(\frac{\pi dy}{\lambda L} \right)$
- películas delgadas (IN)(CF) → $\begin{cases} 2tn_t = (2m + 1) \frac{\lambda_i n_i}{2} & \text{max} \\ 2tn_t = m\lambda_i n_i & \text{min} \end{cases}$
- anillos de Newton → $r_m = \sqrt{\frac{Rm\lambda_i n_i}{n_t}} \quad \text{min}$

II 2010 MAC
Física III --- UBB
42

- Polarización
 - ley de Malus
 - luz polarizada (1° polarizador ley Malus)
 - luz no polarizada
 - (1° polarizador 50% incidente)

$$I = I_m \cos^2 \theta$$

- Difracción: mín.

$$\sin \theta_{IDT} = \frac{m\lambda}{a}$$

$$m = \pm 1, \pm 2, \dots$$
- Red de difracción: máx. de interferencia

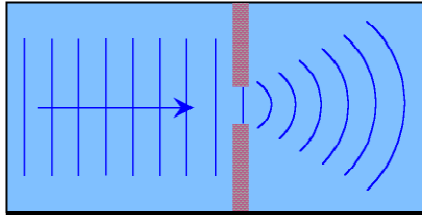
II 2010 MAC
Física III --- UBB
43

Ejercicio

- Un astronauta varado en el espacio a 10 [m] de su nave espacial e inmóvil respecto de ésta tiene una masa de 110 [kg]. Dado que cuenta con una fuente de luz de 100 [W] que forma un haz dirigido, el astronauta piensa utilizarlo como un propulsor de fotones para impulsarse continuamente hacia la nave espacial ¿Cuánto tiempo le tomará alcanzar la nave con este método?

II 2010 MAC
Física III --- UBB
44

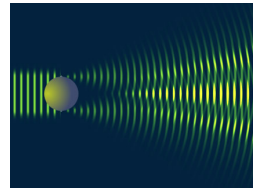
Difracción



La difracción puede verse como interferencia de ondas que emanan de un gran número o incluso un conjunto continuo de fuentes

El tamaño de la rendija es comparable o menor que la longitud de onda

No observamos estos efectos cotidianamente porque la interferencia requiere luz coherente y la difracción que el tamaño de la rendija sea comparable a la longitud de onda



II 2010 MAC

Física III --- UBB

45

Difracción de Fraunhofer y Fresnel

- La **Difracción de Fresnel** o también **difracción de campo cercano** es un patrón de difracción de una OEM obtenida muy cerca del objeto causante de la difracción
- La **Difracción de Fraunhofer** o **difracción de campo lejano** es un patrón de difracción de una OEM cuya fuente (al igual que la pantalla) se encuentran infinitamente alejadas del obstáculo, por lo que sobre éste y sobre la pantalla incidirán ondas planas
- Número de Fresnel (F): si es mucho menor que la unidad se aplica la difracción de Fraunhofer

$$F = \frac{a^2}{L\lambda}$$

a : tamaño abertura

L : distancia a la pantalla desde la apertura

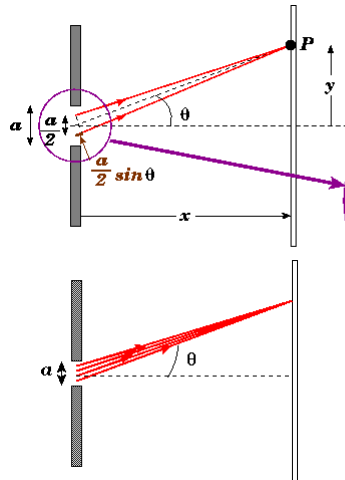
λ : longitud de onda

II 2010 MAC

Física III --- UBB

46

Patrón de difracción de una rendija



Condición para un mínimo:

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$a \sin \theta = \lambda$$

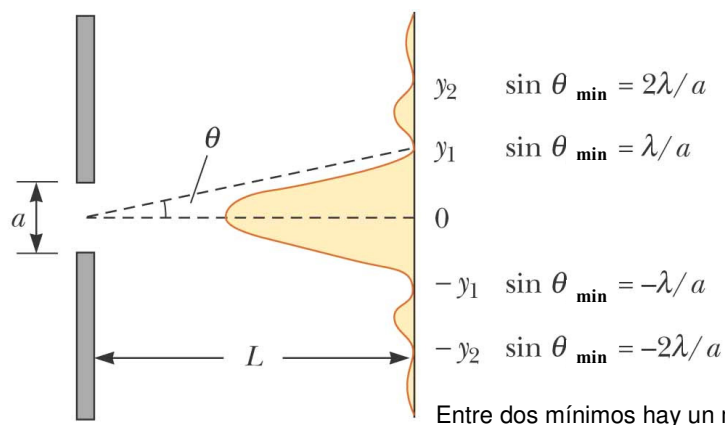
$$\frac{a}{4} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$a \sin \theta = 2\lambda$$

En general:

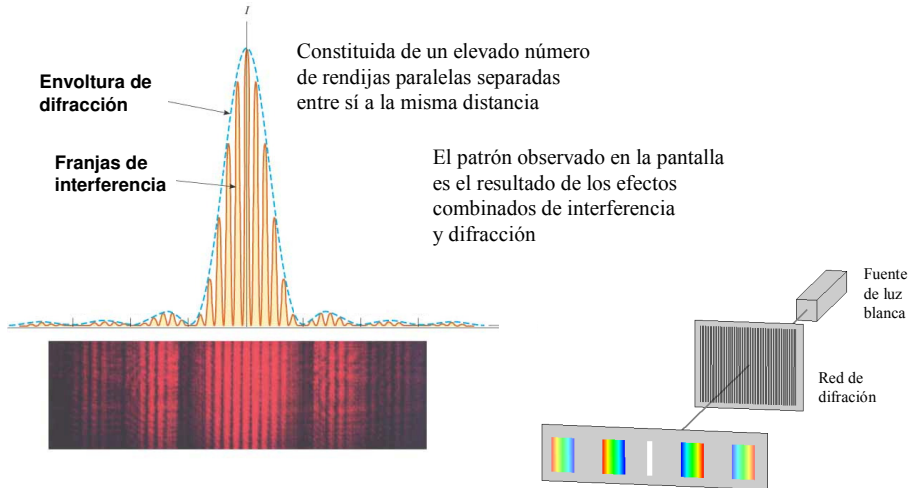
$$a \sin \theta = m\lambda \quad \text{para } m = \pm 1, \pm 2, \dots$$

Patrón de difracción de una rendija



El ancho del máximo central es el doble que el ancho de los máximos secundarios

Red de difracción

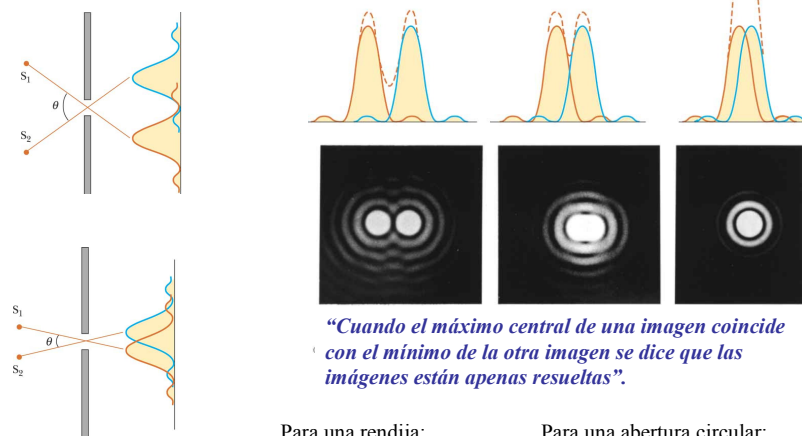


©2004 Thomson - Brooks/Cole
II 2010 MAC

Física III --- UBB

49

Resolución: criterio de Rayleigh



©2004 Thomson - Brooks/Cole
II 2010 MAC

Física III --- UBB

50

Ejercicios

- En un edificio opaco a las microondas entran microondas coherentes de 5 [cm] de longitud de onda a través de una ventana larga y angosta. Si la ventana tiene un ancho de 36 [cm], ¿cuál es la distancia del máximo central al mínimo de primer orden sobre una pared a 6.5 [m] de la ventana?
- A través de una puerta de 1.1[m] de ancho existente en una pared que absorbe el sonido pasan ondas sonoras con una frecuencia de 650 [Hz] provenientes de una fuente lejana. Determine el número y las direcciones aproximadas de los máximos de difracción que se presentan más allá de la puerta
- El espectro del hidrógeno tiene una línea roja de 656 [nm] y una línea azul de 434 [nm] ¿cuáles son las separaciones angulares entre estas dos líneas espectrales obtenidas mediante una red de difracción que tiene 4500 rendijas por [cm]?

¿Cuál es la naturaleza de la luz?

- La luz es partícula: refracción y reflexión
- La luz es onda: refracción, reflexión, interferencia, difracción y polarización
- Veremos que la luz tiene una naturaleza dual, es onda y es partícula al mismo tiempo
- Con esta idea nace la mecánica cuántica

Radiación Térmica

La mayoría de los objetos que podemos observar reflejan la luz

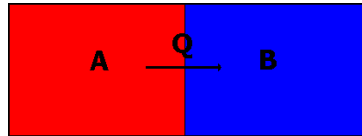
Si la temperatura de un objeto es lo suficientemente elevada éste será capaz de emitir luz, aunque no es el único tipo de radiación que emiten



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

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



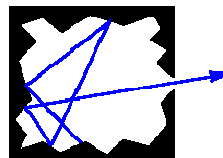
El espectro de radiación térmica de un cuerpo sólido caliente es continuo y depende de la temperatura

Radiación Térmica

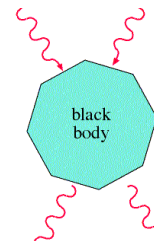
- Si quisiéramos elevar uniformemente la temperatura de un cuerpo notaríamos:
 - a mayor temperatura mayor radiación térmica emite el cuerpo (al principio se ve oscuro, luego resplandece)
 - a mayor temperatura más corta es la longitud de onda de la parte del espectro que irradia más intensamente (rojo 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 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



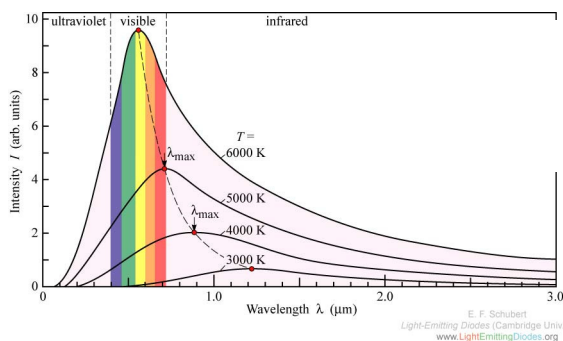
Emite todas las radiaciones posibles

II 2010 MAC

Física III --- UBB

55

Espectro de la radiación de cuerpo negro



II 2010 MAC

Física III --- UBB

56

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 ϵ se denomina emisividad de la superficie. 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)

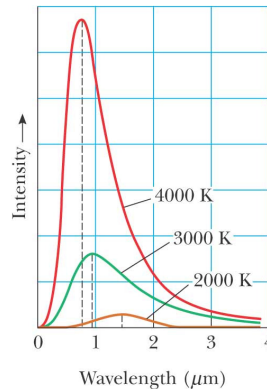
- **Radiancia espectral:** nos dice cómo varía la intensidad de la radiación del cuerpo negro con la longitud de onda para una determinada temperatura. Se define de modo que $R(\lambda)d\lambda$ corresponde a la potencia irradiada por unidad de superficie entre λ y $\lambda+d\lambda$
- Podemos encontrar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

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



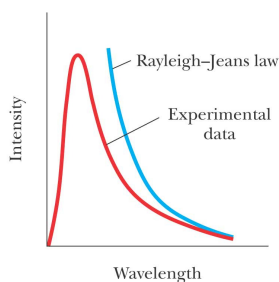
- Todas las propiedades anteriores son resultados experimentales para la radiación de cuerpo negro
- ¿Qué teoría describe la física detrás de la emisión de esta radiación?
- Una teoría adecuada debe ser capaz de predecir la forma de las curvas y el comportamiento observado

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

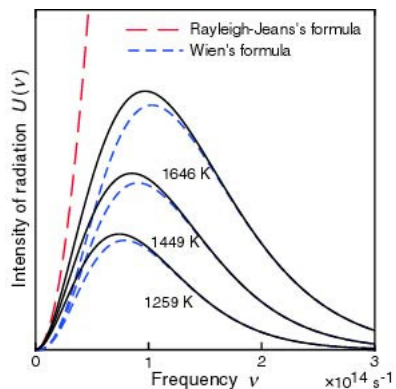
$$R(T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

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

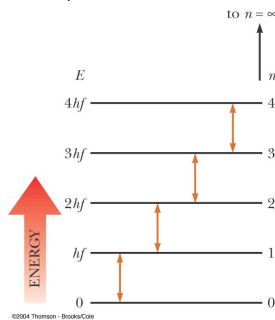
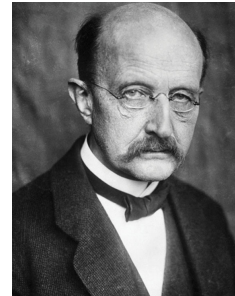
$$E_n = nhf$$

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

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

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



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

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

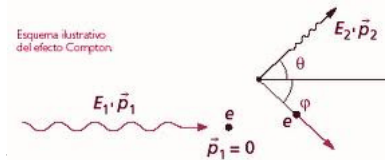
Efecto Compton

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

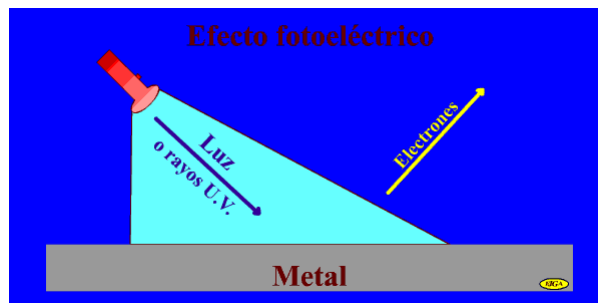


II 2010 MAC

Física III

67

Efecto fotoeléctrico



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

II 2010 MAC

Física III --- UBB

68

El efecto fotoeléctrico

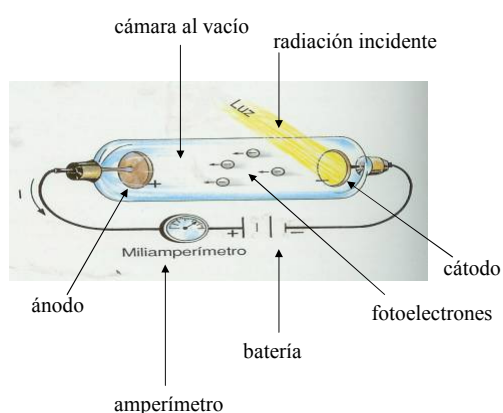
Dos placas metálicas a diferente potencial son colocadas en un tubo al vacío.

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

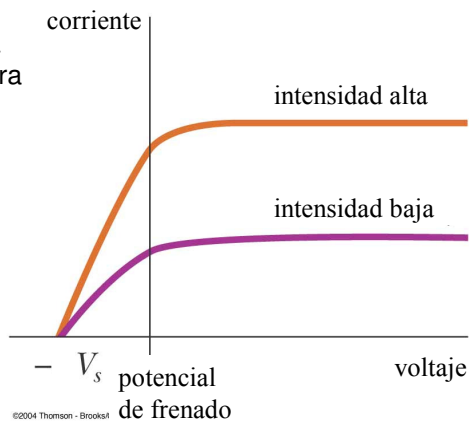
- Existe una **frecuencia de corte**: si la frecuencia de la radiación incidente es menor no se liberan electrones de la placa (el amperímetro marca 0), independiente de la intensidad incidente. **No ocurre el efecto fotoeléctrico.**
- Si la frecuencia es mayor que la frecuencia de corte, el número de 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.



II 2010 MAC

Física III --- UBB

71

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

II 2010 MAC

Física III --- UBB

72

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

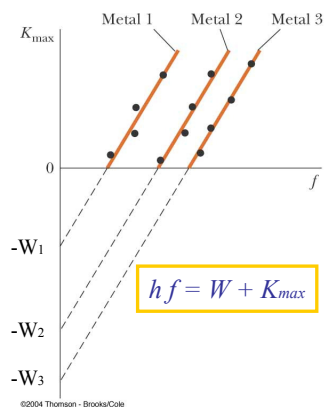
- Existen algunos electrones para los cuales la pérdida de energía asociada es mínima, ellos corresponden a los electrones con la máxima cantidad de energía cinética en el escape
- El trabajo mínimo necesario para liberar un electrón de un metal se llama **función trabajo W** del metal: $hf = W + K_{max}$
- 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:

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

- 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

$$\begin{array}{c} \text{incertidumbre} \\ \text{en la posición} \end{array} \nearrow \Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \left(= \frac{h}{4\pi} \right) \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{incertidumbre} \\ \text{en el momentum} \end{array}$$

II 2010 MAC

Física III --- UBB

77

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:

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

II 2010 MAC

Física III --- UBB

78

Ejercicios

- La rapidez de un electrón es de 5000 [m/s] con una precisión de 0.003 %. Encuentre la incertidumbre mínima en la determinación de la posición de este electrón
- El borde de una delgada hoja de papel se coloca entre 2 planos ópticos para formar una cuña de aire como muestra la figura, un haz luminoso de 589 [nm] en el vacío incide perpendicularmente y se observan 41 franjas brillantes. Además se observa que hay una franja brillante en el borde del papel. Encuentre el espesor de la hoja de papel.

II 2010 MAC 79

Anillos de Newton

Problema 64 cap 15, Serway 6° ed.

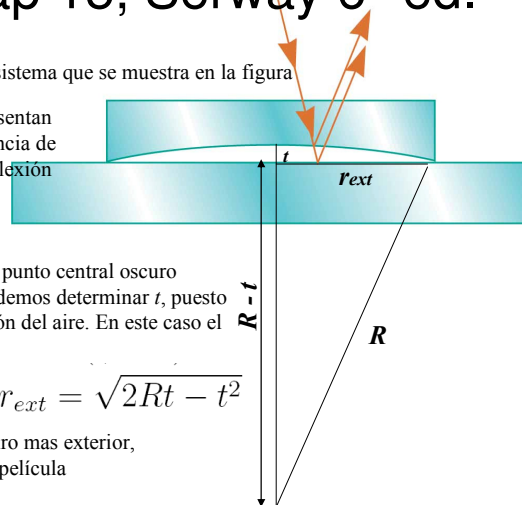
Se observa un patrón de interferencia para el sistema que se muestra en la figura

En los extremos de la película de aire se presentan mínimos de interferencia debido a la diferencia de camino óptico y la diferencia de fase por reflexión

Dado que el patrón de interferencia tiene un punto central oscuro y 50 franjas oscuras rodeando este punto podemos determinar t , puesto que $2nt = m\lambda$ donde n es el índice de refracción del aire. En este caso el punto central corresponde a $m=50$

$$R^2 = (R - t)^2 + r_{ext}^2 \Rightarrow r_{ext} = \sqrt{2Rt - t^2}$$

Esta relación entrega el radio del anillo oscuro mas exterior, donde t corresponde al ancho máximo de la película de aire bajo la lente



II 2010 MAC

Fisica III --- UBB

80