

Óptica

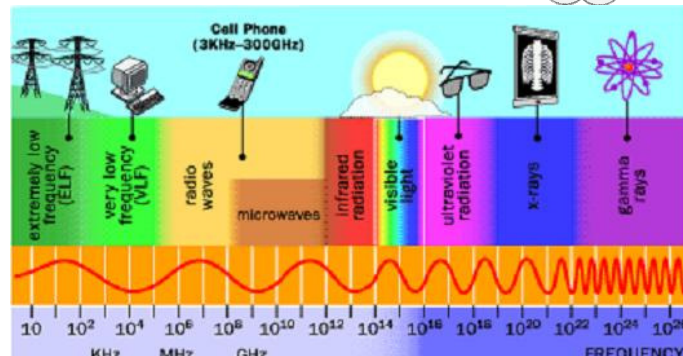
FISICA III
230006 – 230010
II 2010 MAC

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

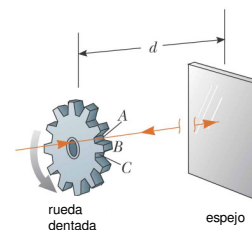
$$c = \lambda f$$

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 $c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$
- 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 (Io)
- A. Fizeau** (1849): diseñó un experimento para medir la rapidez de la luz en la Tierra



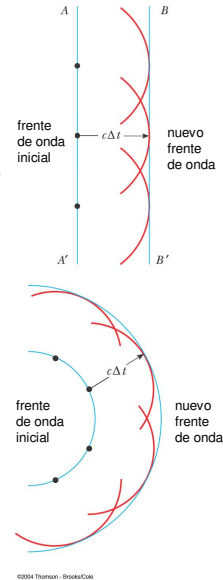
II 2010 MAC

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

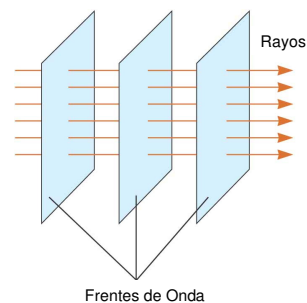
Física III --- UBB

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

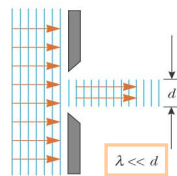
©2004 Thomson - Brooks/Cole

8

Óptica Geométrica

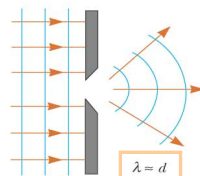
Si la luz encuentra en su camino una barrera con un agujero pueden presentarse tres situaciones:

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



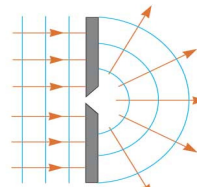
$$\lambda \ll d$$

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



$$\lambda = d$$

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



$$\lambda \gg d$$

Podemos usar óptica geométrica

II 2010 MAC

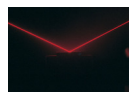
Física III --- UBB

9

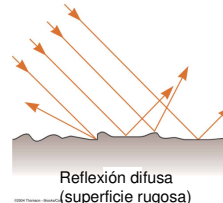
Reflexión

- 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

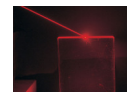
Los rayos reflejados son paralelos entre sí



Reflexión especular
(superficie pulida)



Reflexión difusa
(superficie rugosa)



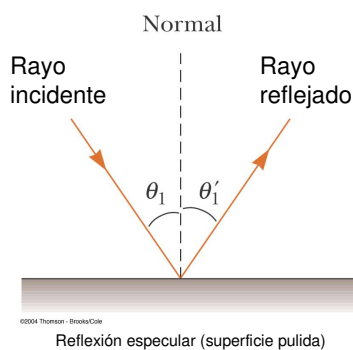
Una superficie se comporta como especular cuando las imperfecciones en su superficie son más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente

II 2010 MAC

Física III --- UBB

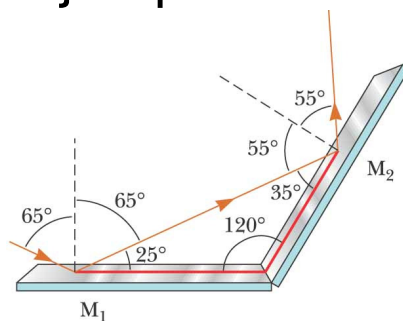
10

Ley de reflexión



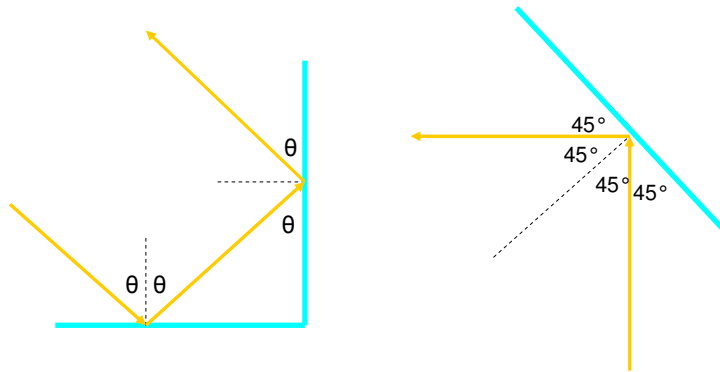
$$\theta_1 = \theta'_1$$

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



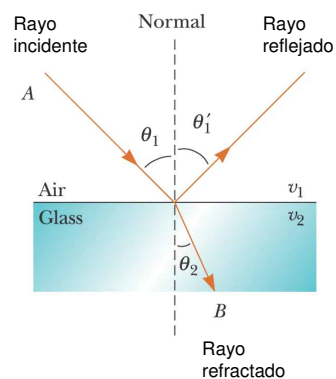
II 2010 MAC

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



©2004 Thomson - Brooks/Cole

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

II 2010 MAC

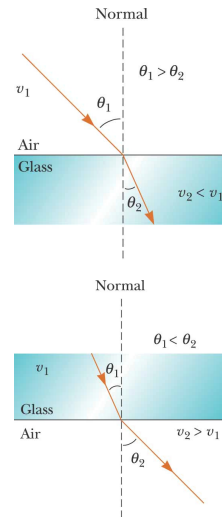
Fisica III --- UBB

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 ^a			
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

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

II 2010 MAC

© 2004 Thomson - Brooks/Cole

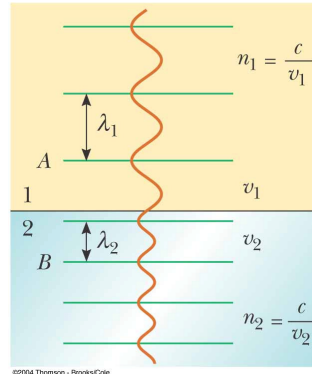
Ley de Snell

- 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 $v = \lambda f$

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

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

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



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

II 2010 MAC

Física III --- UBB

17

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?

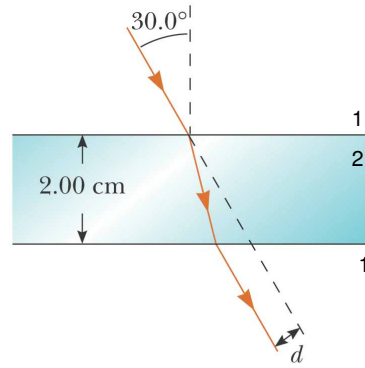
II 2010 MAC

Física III --- UBB

18

Ejemplo

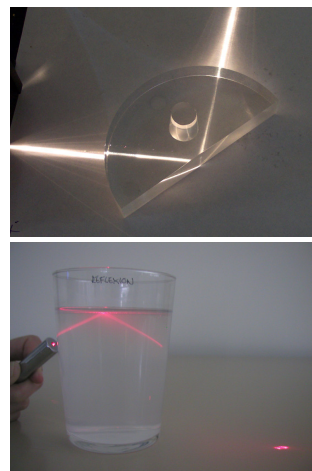
- Un haz de luz pasa de un medio 1 a un medio 2. Muestre que el rayo que emerge del medio 1 es paralelo al haz incidente
- Cuando el haz de luz pasa a través del bloque de vidrio ($n=1.5$) se desvía respecto de su dirección original una distancia d , encuentre esta distancia



©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:

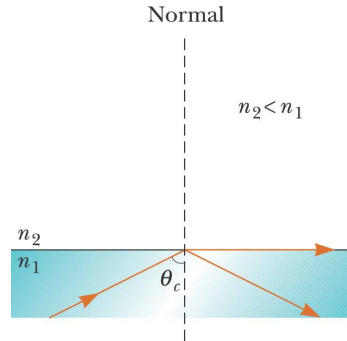
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

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

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:

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

II 2010 MAC

Física III --- UBB

21

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



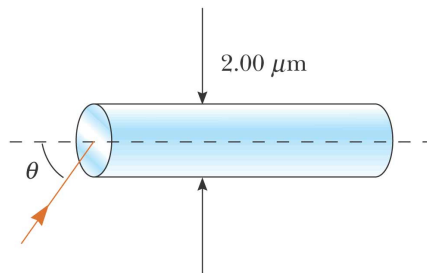
II 2010 MAC

Física III --- UBB

22

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

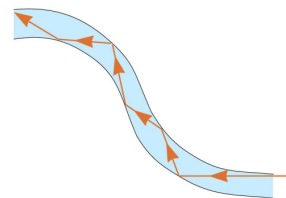
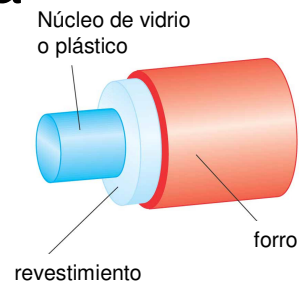
II 2010 MAC

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



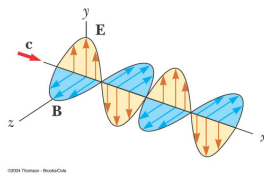
II 2010 MAC

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



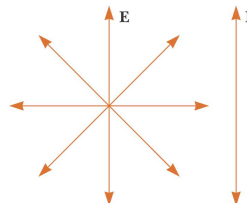
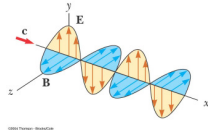
II 2010 MAC

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

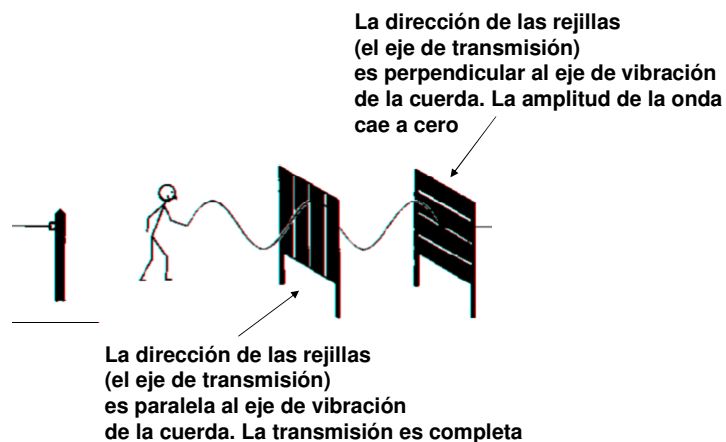
- Es posible obtener un haz linealmente polarizado a partir de luz no polarizada eliminando todas las ondas del haz con excepción de aquellas cuyos vectores de campo eléctrico vibran en la dirección deseada
- La técnica más común es usar un material que transmita sólo las ondas cuyos campos eléctricos 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

II 2010 MAC

Física III --- UBB

27

Análogo mecánico



II 2010 MAC

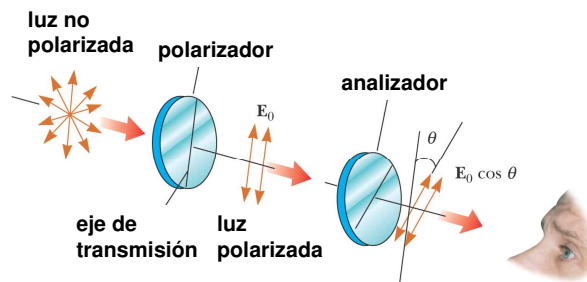
Física III --- UBB

28

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 cuya **E** sea perpendicular al eje de transmisión



II 2010 MAC

©2004 Thomson - Brooks/Cole

Física III --- UBB

29

Polarización por absorción selectiva

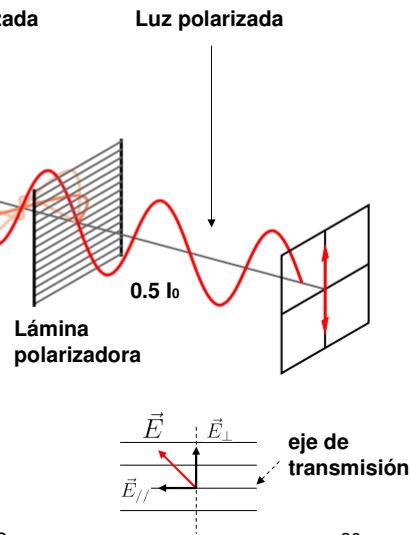
$$I = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c}$$

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



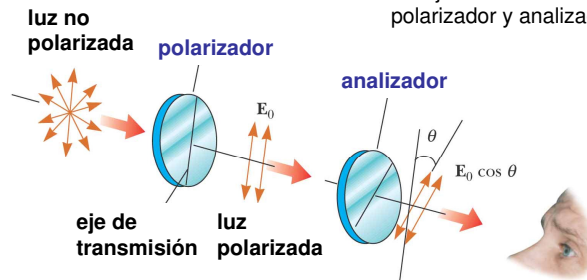
El promedio de la función $\sin^2$ y $\cos^2$ es 0.5 30

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



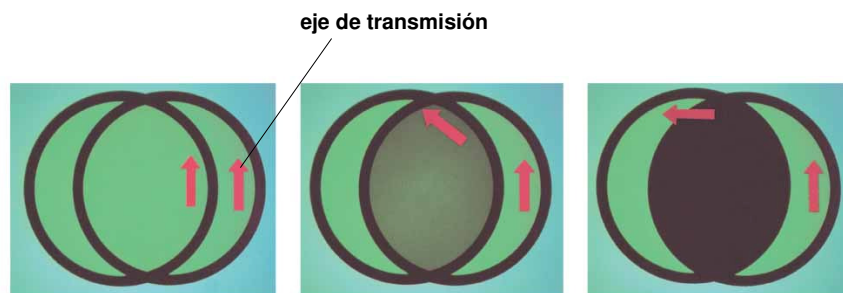
II 2010 MAC

©2004 Thomson - Brooks/Cole

Física III --- UBB

31

Polarizador



©2004 Thomson - Brooks/Cole

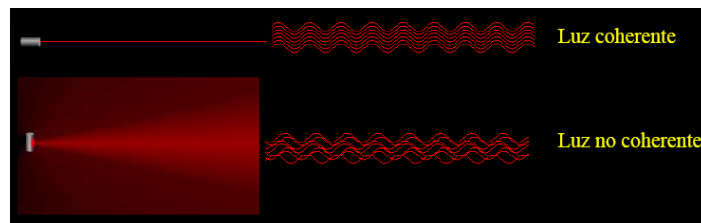
II 2010 MAC

Física III --- UBB

32

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

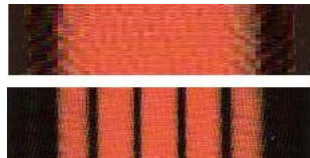
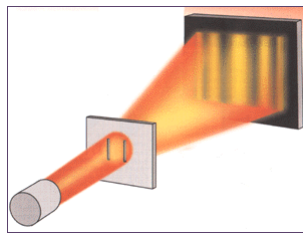


II 2010 MAC

Física III --- UBB

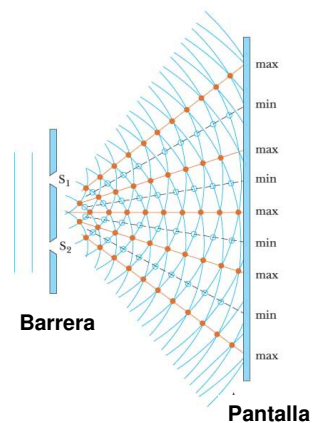
33

Experimento de Young



Una rendija

Dos rendijas



II 2010 MAC

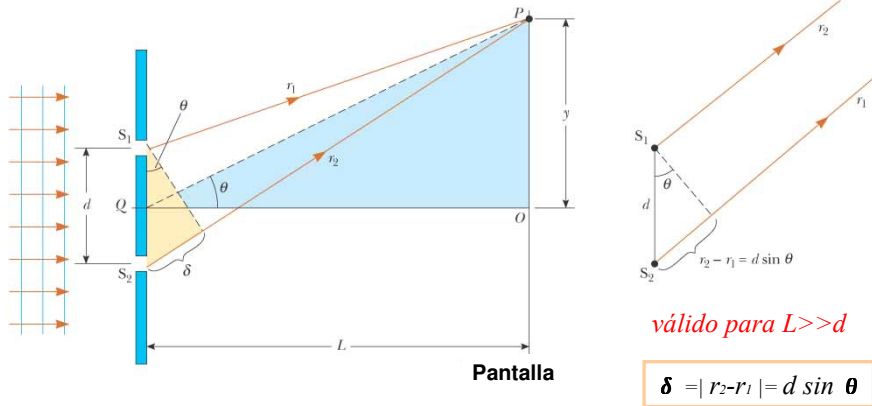
Física III --- UBB

©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

Física 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

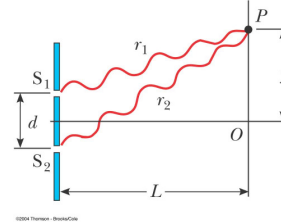
Física III --- UBB

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 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

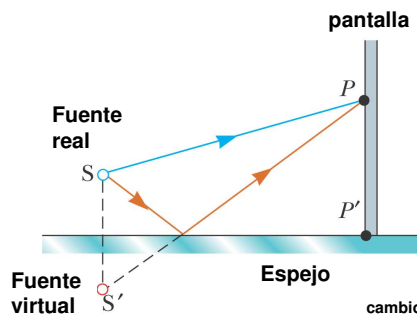
Dado que la intensidad es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, la intensidad promedio en la posición y es dada por:

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

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

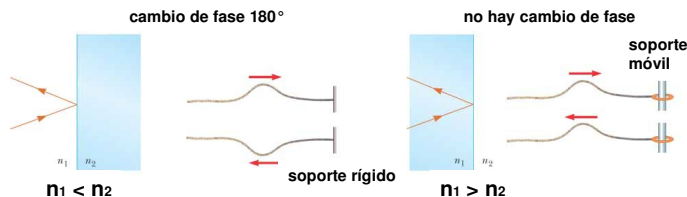
$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{\phi}{2\pi}$$

Espejo de Lloyd

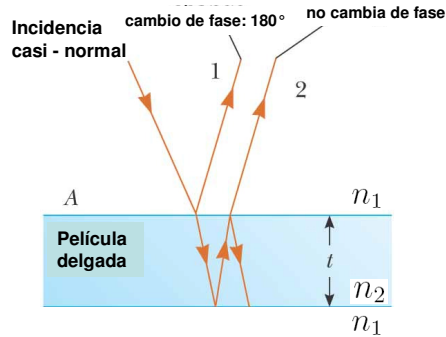


Se produce interferencia debido a la diferencia de camino óptico entre el rayo que viaja directamente a P desde S y el rayo reflejado

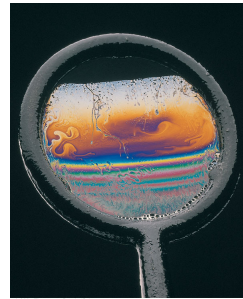
El rayo reflejado está 180° fuera de fase respecto del rayo incidente. En el punto P' se observa un mínimo de interferencia.



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.



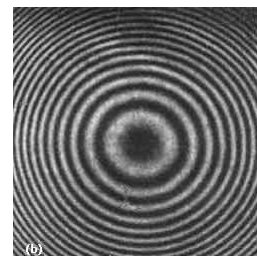
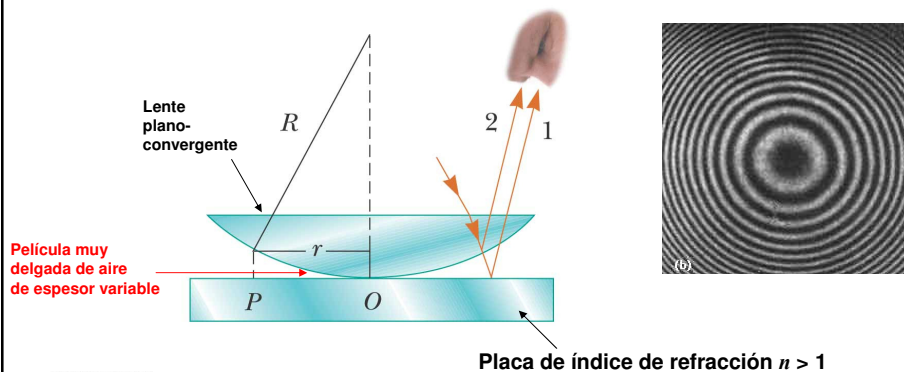
$$\begin{aligned} \text{máximos} \quad 2t \frac{n_2}{n_1} &= (2m + 1) \frac{\lambda_1}{2} \\ \text{mínimos} \quad 2t \frac{n_2}{n_1} &= m \lambda_1 \end{aligned} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

II 2010 MAC

Física III --- UBB

39

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:

$$r_m \approx \sqrt{\frac{Rm\lambda}{n}}$$

II 2010 MAC

Física III --- UBB

40