

# Parte 4: La Luz



### Parte 4: La Luz

Es imposible pensar en vida sin luz. Los vegetales, base de la cadena alimenticia, a través de la fotosíntesis extraen de la luz la energía necesaria para su permanencia y desarrollo. Los animales superiores, han desarrollado mecanismos complejos para detectar la luz, recurso indispensable para su supervivencia. Estos ejemplos muestran la necesidad de avanzar en el estudio de la luz como tema central en el desarrollo de un curso de física destinado a biólogos.



Telescopio óptico espacial Hubble

Canal Clash Manuells

J.M. Maxwell 1831-1879

El resultado más sorprendente de la unificación de la electricidad y el magnetismo fue la conclusión de que la luz es una **onda electromagnética**, que se propaga

en el espacio a una velocidad de 300.000 Km/s. Fenómenos como la interferencia y la difracción (Óptica Física) demostraron el carácter ondulatorio de la luz. Sin embargo para los fenómenos de reflexión y refracción (Óptica geométrica), resulta más adecuado suponer la propagación de la luz, como rayos rectilíneos que se propagan desde una fuente luminosa.

Esta parte de la materia esta compuesta por dos bolillas, en la primera denominada **Óptica Física**, se introducen los conceptos básicos relacionados con el al estudio de la luz como una onda. Resultara necesario necesario realizar una introducción al movimiento ondulatorio. En la segunda,

Luz Desviación de la luz amarilla

Medida de la dispersión

**Optica Geométrica**, estudiaremos el comportamiento de los rayos luminosos y el estudio de instrumentos que controlan y manipulan la luz.

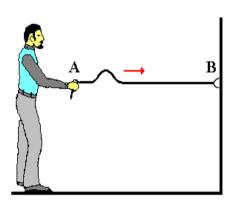


Telescopio de Galileo

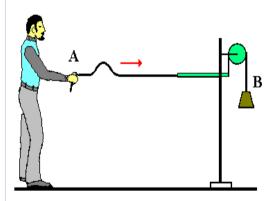


# Bolilla 11: Óptica Física

### 11.1 Introducción al Movimiento Ondulatorio



En la figura se representa una vibración, originada en la mano de una persona, que se desplaza con velocidad constante a lo largo de una cuerda. A este tipo de vibración simple la denominaremos **pulso**. En la figura inferior, la cuerda pasa a través de una polea, y se suspende de ella un cuerpo. El pulso que se transmite por la cuerda (parte del punto **A**, y arriba al punto **B**) provoca una **vibración** del cuerpo suspendido. El **pulso** ha sido capaz de transmitir energía de un punto a otro, sin transmitir masa. Cuando la vibración se propaga en forma de un tren continuo de pulsos ininterrumpidos diremos que la perturbación conforma una **onda**.



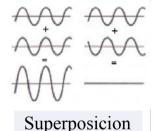
**Onda**: es una perturbación en un medio, que se propaga a través del mismo a velocidad constante, siendo esta velocidad característica del medio.

En el caso de una cuerda, la velocidad de propagación es:

$$v = \sqrt{T/\mu}$$

donde T (Nt) es la tensión a la cuál está sometida la cuerda y  $\mu$  (kg/m) es la densidad lineal de la cuerda (masa por unidad de longitud).





### **Ondas**

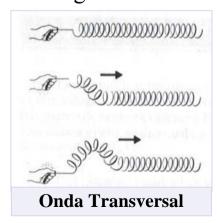
### Principio de Superposición

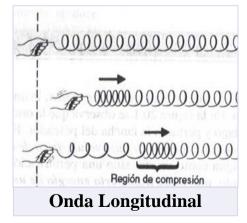
Si en un instante existen dos o más ondas simultáneamente en un punto, el desplazamiento del punto es la suma de los desplazamientos que hubiera tenido con cada onda por separado.

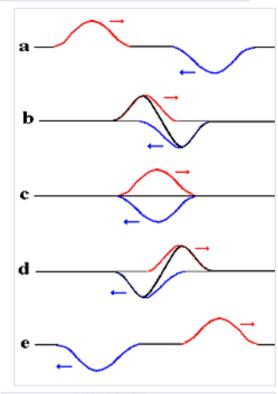
### Tipos de Ondas

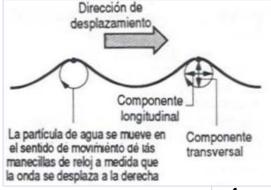
Onda transversal: la perturbación de un punto es **perpendicular** a la dirección de propagación, por ejemplo las ondas en una cuerda. La luz es una onda transversal.

Onda longitudinal: la perturbación de un punto tiene la misma dirección que la propagación de la onda. Las ondas de compresión en un resorte y el sonido son ejemplos de ondas longitudinales.











### Caracteristicas de una Onda

Frecuencia, f (1/s): es el número de oscilaciones que pasan por segundo por un punto.

**Periodo, T (s):** tiempo necesario para que un punto realice el ciclo completo.

**Longitud de onda,**  $\lambda$  (m): distancia entre dos puntos igualmente perturbados (dos maximos).

Amplitud, A (m): es la elongación máxima

**Velocidad, v (m/s):** distancia recorrida por la onda por unidad de tiempo

La funcion  $y = A \operatorname{sen}(\theta)$ , representa matematicamente la 'forma' de una onda periodica.

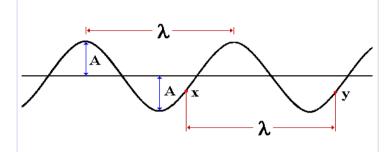
Para cualquier valor de  $\mathbf{x}$  se verifica que:

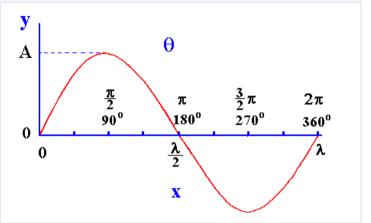
$$x/\lambda = \theta/2\pi$$

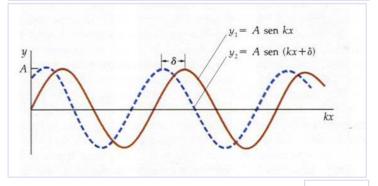
Reemplazando  $\theta$  en el argumento de la función seno:

$$y = A sen(2\pi \frac{x}{\lambda} + \delta)$$

Para mayor generalidad, se ha sumado una constante de fase  $\delta$  en el argumento de la función seno. La ecuación representa una onda sinusoidal en un determinado tiempo.





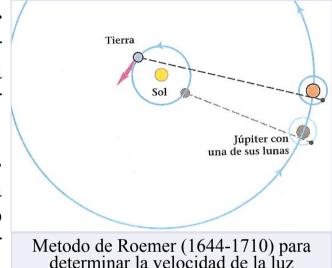




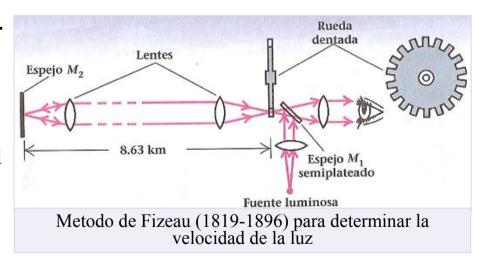
### 11.2 Naturaleza de la Luz

Newton (1642-1727) desarrolló la teoría corpuscular de la luz. Suponía que la luz estaba compuesta por corpúsculos sin masa que viajaban por el espacio a velocidad constante. Cada color estaba representado por un tipo distinto de corpúsculo.

En forma prácticamente simultánea, **Huygens** (1629-1695) proponía una **teoría ondulatoria** para la luz. La validez de esta teoría fue confirmada casi un siglo después mediante las experiencias desarrolladas por **Young** (1773-1829) y **Fresnel** (1788-1827). A partir de



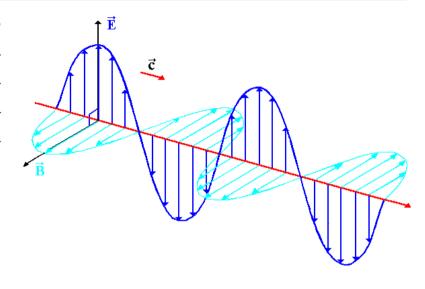
la teoría desarrollada por **Maxwell** (1831-1879), se dedujo la existencia de ondas electromagnéticas, consistentes en campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan por el espacio a una velocidad definida. La teoría de Maxwell estableció que la luz era una onda electromagnética que viaja por el espacio a una velocidad próxima a los 3 x 10<sup>8</sup> m/s.

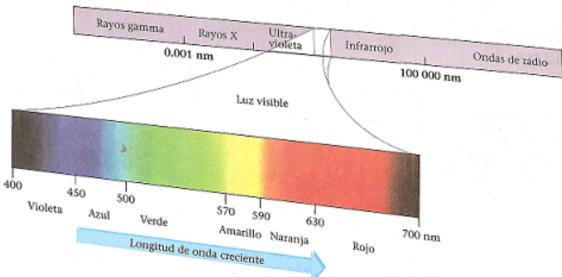




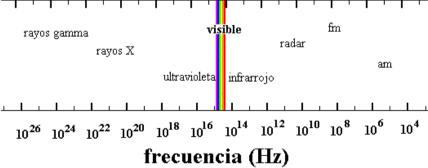
### **Ondas Electromagneticas**

Se conocen ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda van desde 10<sup>-17</sup> m hasta 10<sup>4</sup> m. El ojo humano resulta apto para detectar aquellas cuya longitud está comprendida en el intervalo de 4 x 10-7 m a  $7 \times 10^{-7} \text{ m}$ .





### $10^{-18} \ 10^{-16} \ 10^{-14} \ 10^{-12} \ 10^{-10} \ 10^{-8} \ 10^{-6} \ 10^{-4} \ 10^{-2} \ 1 \ 10^{2} \ 10^{4}$ fmvisible



longitud de onda (m)



La velocidad de la luz depende del medio en cual se propaga. El *índice de refracción* **n**, de una sustancia es:

n = c/v (v es la la velocidad de propagación de la luz en la sustancia)

La velocidad de la luz en cualquier sustancia es menor que c, entonces n es mayor que 1.

El índice de refracción varía ligeramente con la frecuencia.

La frecuencia de una onda queda determinada por la fuente y no depende del medio en el que se transmite. Si la luz pasa de un medio de índice de refracción  $\mathbf{n_1}$  a otro de índice  $\mathbf{n_2}$ , y considerando la frecuencia no cambia, y que la velocidad de propagación en cada uno de

los medios es el producto:

 $v = f\lambda$ 

concluimos que:

 $f\lambda_1 = c/n_1$ 

 $f\lambda_2 = c/n_2$ 

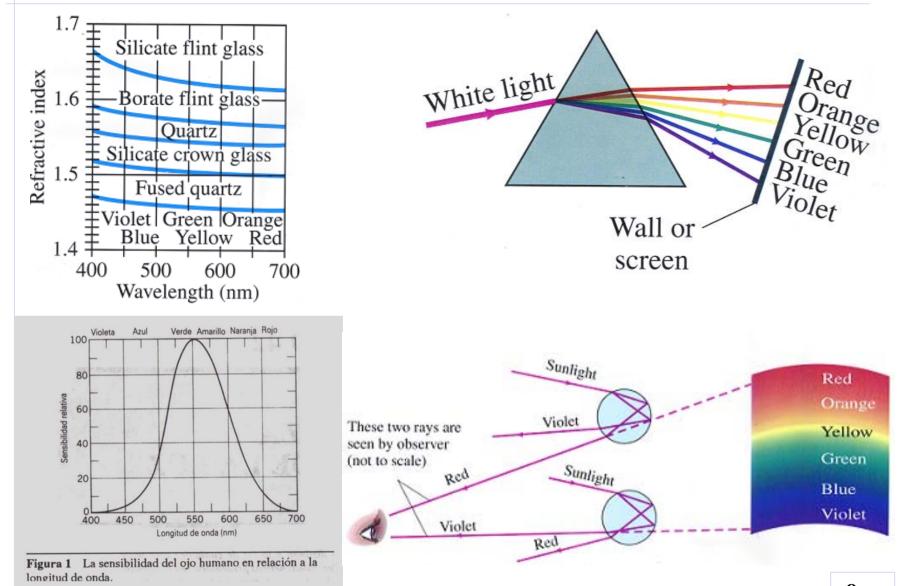
Dividiendo miembro a miembro se obtiene:

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

Material	Índice de refracción (λ = 589 nm)
Aire	1.00029
Dióxido de carbono	1.00045
Agua	1.333
Alcohol etílico	1.362
Benceno	1.501
Vidrio crown	1.517
Diamante	2.417

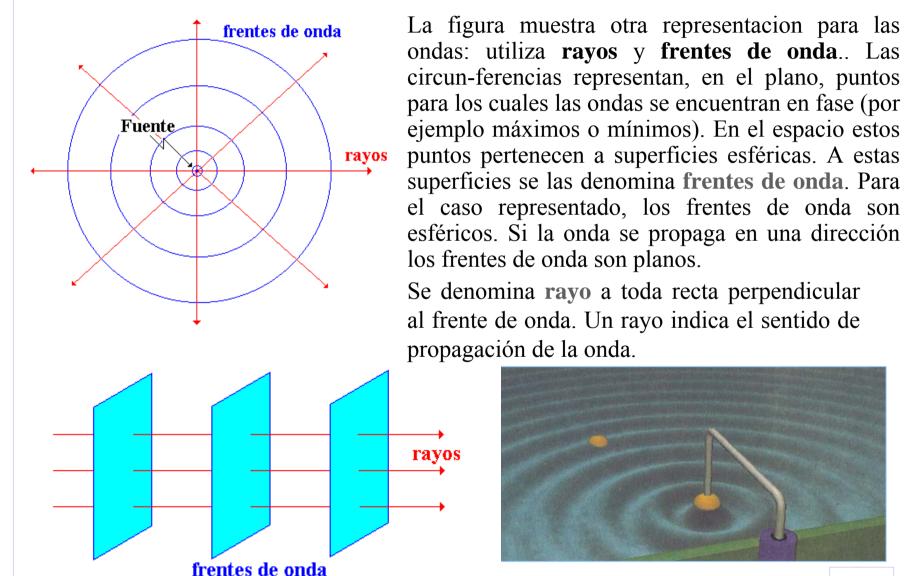
Si  $\mathbf{n_1} > \mathbf{n_2}$ , entonces  $\lambda_1 < \lambda_2$ . La longitud de onda es menor en el medio de mayor índice de refracción.

### Algunas consecuencias del cambio del índice de refracción con la frecuencia





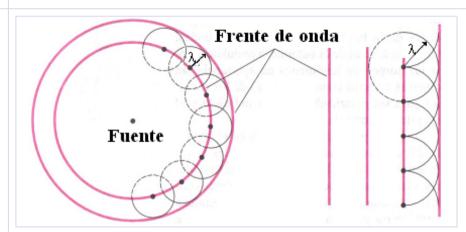
## 11.3 Principio de Huygens



10



### Interaccion de frentes de ondas con objetos

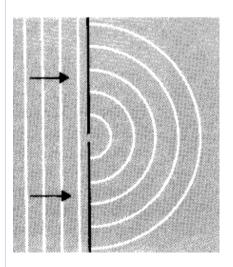


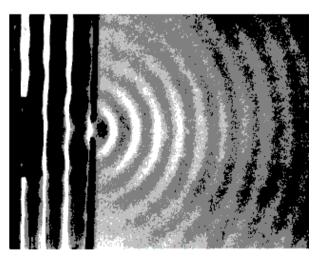
**Principio de Huygens:** todo punto de un frente de onda se puede considerar como una fuente de ondas secundarias. El frente de onda en un instante posterior es la envolvente a estas ondas secundarias.

La figura de la izquierda muestra la representacion, según Huygens, de una onda

circular y una onda plana. El radio de cada onda esférica secundaria, igual a la distancia entre frentes de onda sucesivos, se considera como de una longitud de onda.

La figura de abajo representa, para un frente de onda plano, las ondas secundarias que



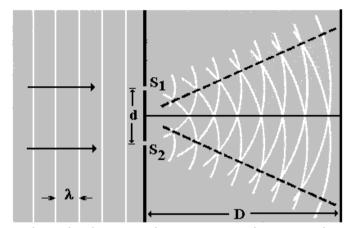


surgen del Principio de Huygens, y el frente de onda posterior al pasar por una rendija estrecha. A la derecha se observa una fotograf{ia mostrando el comportamiento de frentes de ondas planos en agua, que llegan a una ranura pequeña, generándose frentes de ondas secundarios circulares.

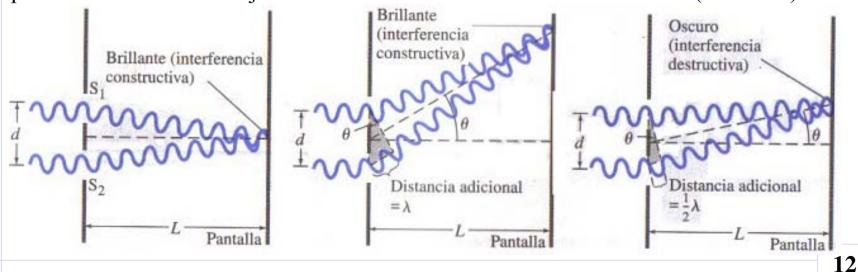


### 11.4 Interferencia

La figura representa la experiencia realizada por **Young** (interferencia de doble rendija). Frentes de ondas planos de luz monocromática (de una longitud de onda) son hechos pasar a través de dos rendijas estrechas separadas por una distancia  $\mathbf{d}$ . Cada rendija, se comporta como una fuente puntual ( $\mathbf{S_1}$  y  $\mathbf{S_2}$ ), cuyos frentes de onda son semicirculares. Finalmente la luz llega a la pantalla separada una distancia  $\mathbf{D}$  del plano de las rendijas. Sobre la pantalla se forman franjas cla-



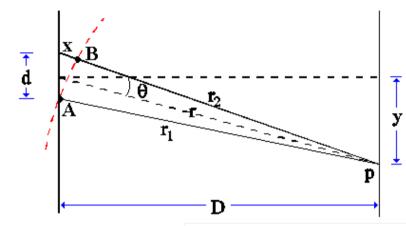
ras y oscuras sucesivamente. En los puntos de la pantalla, donde las ondas provenientes de cada una de las rendijas lleguen en **igualdad de fases** se producirá un **máximo** (interferencia constructiva). Por el contrario las regiones de las pantallas donde las ondas provenientes de las rendijas interfieran destructivamente serán oscuras (**minimos**).





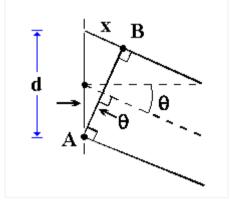
### Formacion de Maximos y Minimos de Interferencia

Consideramos el punto **P** arbitrario de la pantalla. **r**<sub>2</sub> y **r**<sub>1</sub>, respectivamente, miden las distancias a este punto de la rendija superior e inferior. Si dibujamos una circunferencia de radio **r**<sub>1</sub> con centro en **P**, quedan determinados los segmentos, de igual longitud, **AP** y **BP**. Con la condición **D>>d** se verifica que, el arco **AB** es parte de una recta, perpendicular a los segmentos **AP** y **BP**. La diferencia de recorrido entre los rayos que parten de ambas rendijas es:



$$\mathbf{x} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$$

Esta diferencia de recorrido, puede ser escrita en función del ángulo  $\theta$  que mide la desviación angular de las distintas franjas desde el centro de la pantalla:



$$x = d sen\theta$$

Cuando esta distancia sea un múltiplo de  $\lambda$  la interferencia será constructiva:

$$d sen \theta = m \lambda$$
  $m = 0, 1, 2, ....$  Máximos

**m** = **0** corresponde al máximo central, y el resto de los máximos se forman simétricamente a su alrededor.



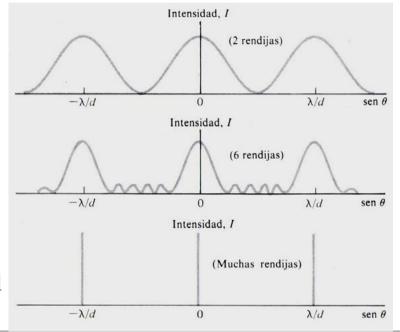
Los puntos sobre la pantalla donde la interferencia es destructiva (mínimos de interferencia), verifican la relación:

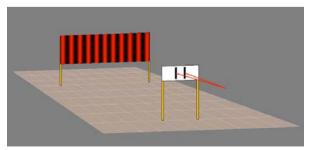
$$d sen \theta = (m + 1/2)\lambda$$
  $m = 0, 1, 2, ....$  Mínimos

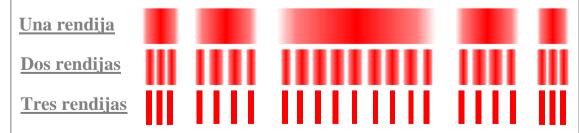
La experiencia de Young confirmo el carácter ondulatorio de la luz y se mostró como un método idóneo para determinar la longitud de onda como función de la distancia de separación entre las rendijas.

### **Rendijas multiples**

Los maximos siguen ocurriendo en las mismas posiciones, pero estos son mas estrechos apareciendo maximos secundarios entre los principales. Si se utiliza un gan numero de rendijas (redes de difraccion) el maximo principal se vuelve muy estrecho (afilado)



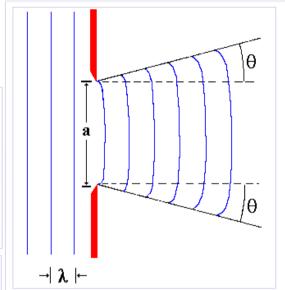






### 11.5 Difracción

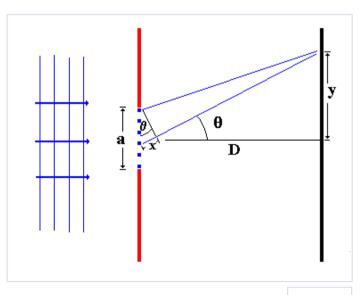
**Difracción** es la interferencia de ondas de una sola fuente.



Este fenómeno produce que las ondas se curven alrededor de un obstáculo. Los efectos de la difracción son solo observables cuando se trata de obstáculos o aberturas comparables en tamaño a la longitud de la ondas considerada. La figura muestra una onda plana que pasa por una rendija. Los frentes de onda se curvan ligeramente al pasar por la rendija y, en consecuencia, se produce una divergencia angular  $\theta$  en la dirección de propagación de la onda. Se demuestra que  $\theta$  se relaciona con el ancho de la ranura  $\alpha$  y con  $\alpha$ , por la relación:

$$sen\theta = \lambda/a$$

Describiremos el fenomeno de difracción asociado al paso de la luz por de una rendija estrecha. La figura de la derecha muestra luz monocromática que pasa a través de una rendija estrecha de ancho a, y luego incide sobre una pantalla a una distancia **D** de la rendija. Las ondas de Huygens que se producen en las distintas partes de la rendija interfieren y forman en la pantalla una figura de interferencia con zonas brillante y oscuras.



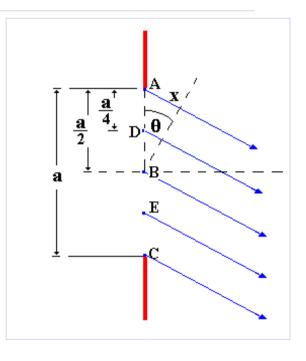




Dividimos la rendija en dos mitades,  $\mathbf{AB}$  y  $\mathbf{BC}$ . La distancia a recorrer hasta la pantalla por una onda que se origina en el punto  $\mathbf{A}$  es mayor que la distancia de la onda que parte de  $\mathbf{B}$ . Esta diferencia de caminos es  $\mathbf{x}$  que puede expresarse en función de  $\boldsymbol{\theta}$ :

$$x = \frac{1}{2} a \operatorname{sen}\theta$$

Por simetría, para cualquier onda que se origine en un punto del segmento **AB** (por ejemplo **D**) existe una onda que se origina en un punto del segmento **BC** (punto **E** para el ejemplo considerado) con diferencia de caminos, para llegar a la pantalla, igual a **x**.



Existirán mínimos de difracción en aquellos puntos de la pantalla donde los rayos que arriben tengan una diferencia de camino:

$$x = \frac{1}{2} a \operatorname{sen}\theta = \frac{\lambda}{2}$$

El primer mínimo de difracción verificara entonces:

$$a sen\theta = \lambda$$

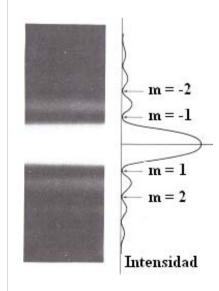


Se demuestra, a partir de sucesivas subdivisiones de la rendija, que los mínimos de difracción existen cuando:

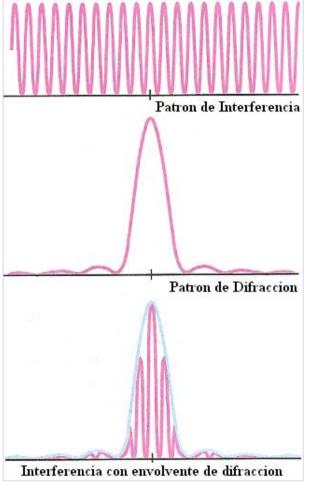
$$a sen \theta = m\lambda$$
  $m = \pm 1, \pm 2, ...$  Mínimos

Los máximos se localizan aproximadamente entre los mínimos, por lo que la ecuación respectiva es:

a sen
$$\theta = m\lambda$$
  $m = 0, \pm 3/2, \pm 5/2, ...$  Máximos



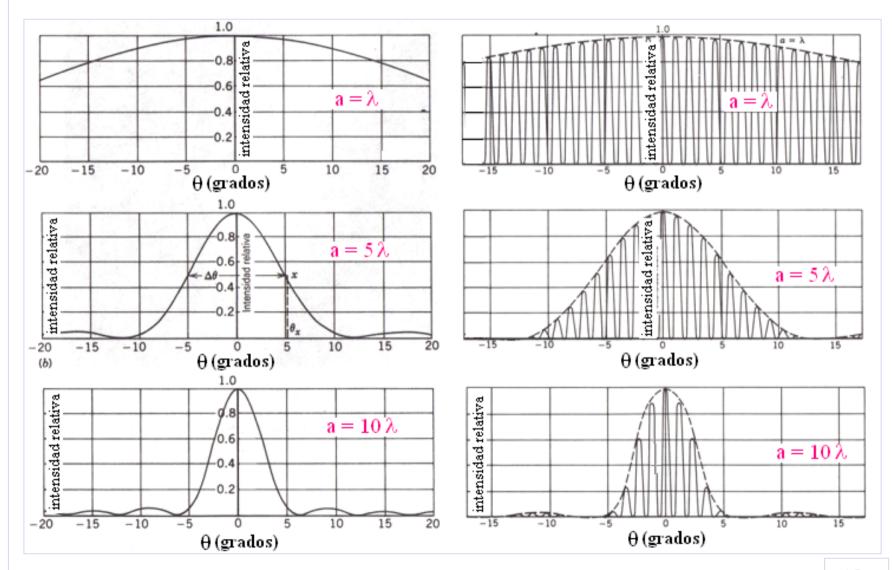
El máximo central corresponde a  $\mathbf{m} = \mathbf{0}$  y es una zona muy brillante puesto que todas las ondas llegan en fase. En los otros máximos la intensidad decrece rápidamente a medida que  $\mathbf{m}$  aumenta. Esto se debe a que no todas las ondas que parten de las distintas partes de la



rendija llegan en fase. En la experiencia de Young, la figura de interferencia aparece modulada por una envolvente debido al fenómeno de difracción asociado a cada una de las rendijas.

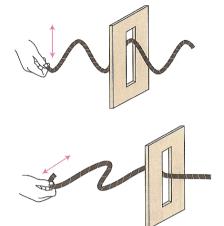


# Patrones de Difracción y de Interferencia





### 11.6 Polarización

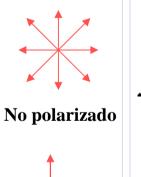


Cuando en la ondas transversales la vibración ocurre en un único plano, la onda esta **polarizada** (**polarización plana**). Las ondas longitudinales no presentan polarización.

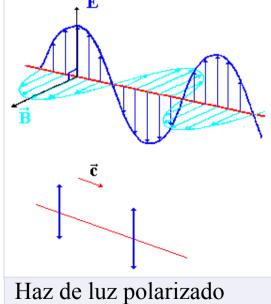
Los fenómenos ligados a la polarización de la luz demuestran que las ondas electromagnéticas son transversales. En un haz de luz polarizada el campo eléctrico vibra solamente en un plano perpendicular a la dirección de movimiento.

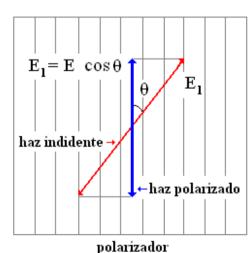
Cuando la luz no polarizada pasa a través de una lámina de Polaroid (polarizador) solo se transmiten las componentes de la amplitudes paralelas al eje óptico de la lámina. Si en la trayectoria de un haz polarizado, cuyo campo electrico vibra

con amplitud  $\mathbf{E}_1$ , se coloca una lámina de polaroid de modo que su eje óptico forme un ángulo  $\theta$  con la dirección de polarización de la onda incidente, la amplitud del campo eléctrico de la onda transmitida es  $\mathbf{E}_1$  cos $\theta$ . Una lámina colocada con este fin es un **analizador** y permite conocer si un haz de luz está polarizado y su plano de polarización.

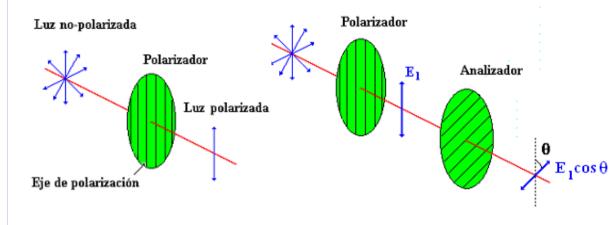


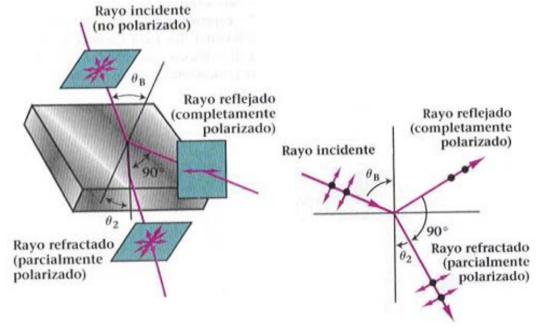












Otra forma de obtener luz polarizada es por reflexión. (Brewster (1781-1868)). Si un haz polarizado, que se transmite por un medio de índice de refracción  $\mathbf{n_1}$ , incide sobre otro medio de índice  $\mathbf{n_2}$  con un ángulo  $\phi_{\mathbf{B}}$ , la luz que se refleja se en-

cuentra totalmente polarizada. Esto se verifica cuando el ángulo  $\phi_B$  cumple la condición (**Ley de Brewster**):

tang 
$$\phi_{\rm B} = n_2/n_1$$

La polarización del rayo reflejado es perpendicular al plano de separación entre las superficies. El rayo transmitido se encuentra ligeramente polarizado.