



## Física II (CIBEX) – 2011

### Trabajos de Laboratorio

#### 6. Difracción e Interferencia

##### 1. Objetivos generales

Estudio de los fenómenos de difracción e interferencia.

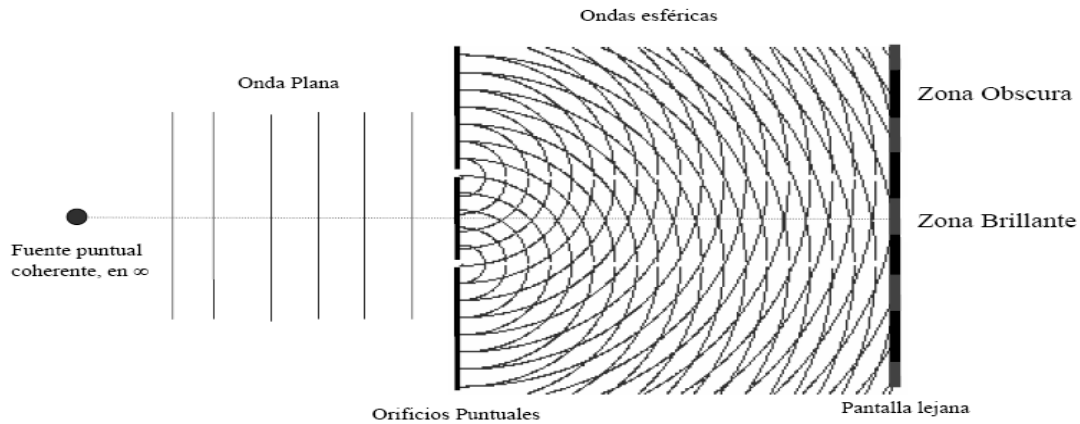
##### 2. Conceptos básicos de teoría

Es posible observar en la Naturaleza innumerables ejemplos de sistemas físicos en donde se observa el fenómeno de interferencia (ondas de agua, ondas sonoras, ondas de luz, ondas electromagnéticas, etc.). Todos ellos, son manifestaciones de un fenómeno ondulatorio. Este fenómeno es utilizado en muchas aplicaciones técnicas, como ser en la medición precisa de longitudes (espesores), en la protección de anteojos, en la obtención de aviones “invisibles”, etc.

Hasta el siglo XVIII existían dos teorías, en pugna, sobre la naturaleza de la luz, la corpuscular, encabezada por Newton y la ondulatoria, propuesta por Huygens. En el año 1801 el físico y médico Thomas Young ideó un dispositivo que no tenía explicación en el campo de la óptica geométrica y desafiaba a la teoría corpuscular de Newton el cuál permitió demostrar concluyentemente la naturaleza ondulatoria de la luz. Con un dispositivo como el de la figura 1, Young hizo pasar **luz monocromática** (plana) a través de dos pequeños orificios muy juntos. Cada orificio, se comportaba en forma ideal como una nueva **fuentes** de ondas “esféricas”, **coherentes** entre sí. Esto por supuesto es sólo una aproximación, ya que en realidad la onda emitida resulta más intensa en la dirección frontal, menos intensa hacia los costados y nula hacia atrás, la intensidad no es igual en todas las direcciones. Las ondas provenientes de cada orificio alcanzaban una pantalla produciendo un **patrón de zonas brillantes** (máximos de interferencia) y oscuras (mínimos de interferencia) que no podían unirse mediante una recta con el punto luminoso que las produce (teoría de sombras-óptica geométrica). Además puntos que aparecen iluminados sobre la pantalla cuando se cubre una de las dos rendijas del segundo diafragma, se tornan oscuros cuando los iluminamos con luz proveniente de las dos rendijas.

Según el **principio de Huygens-Fresnel** cada punto de un frente de ondas se comporta como un emisor de ondas esféricas. Un defecto importante de este principio es que, si cada emisor emite uniformemente en todas direcciones, además de generar una onda que viaja hacia adelante, genera una onda que viaja hacia atrás, hacia la fuente, la cual no se observa en la naturaleza. Este principio luego fue revisado por Kirchhoff para que concuerde con lo predicho por las leyes del electromagnetismo, propuso que la intensidad emitida no es la misma en todas las direcciones, es más intensa hacia adelante y nula hacia atrás.

Si una onda plana incide sobre un **orificio puntual** (abertura infinitesimal), resulta una buena aproximación apelar al principio de Huygens-Fresnel y suponer que **el punto** se comporta como una nueva **fuentes de ondas esféricas hacia adelante, siempre y cuando analicemos el fenómeno lejos del orificio** (ver figura 1). En el experimento propuesto por Young existen efectos originados en que el orificio no es puntual (**fenómeno de difracción**). El mismo combina fenómenos de interferencia y difracción. Estos pueden estudiarse por separado para una mejor comprensión.



**Figura 1.** Esquema del experimento de Young. Los orificios se comportan como una nueva fuente de ondas que interferirán formando un patrón de máximos y mínimos de intensidad.

Quando se reproduce el experimento de Young utilizando una lámpara incandescente se debe recurrir a artificios para obtener o mejorar la coherencia de las fuentes luminosas. Por otra parte la divergencia de un haz luminoso se puede corregir colimándolo pero a costa de perder energía. Finalmente, sabemos que el haz luminoso que emite este tipo de lámpara está constituido por varios colores o longitudes de onda. Desde el punto de vista de estudiar los fenómenos de interferencia y difracción que nos revela el experimento de Young, la falta de coherencia, la divergencia y la policromaticidad del haz de la lámpara de filamento incandescente constituyen desventajas. Estos inconvenientes se resuelven con la luz que provee un láser (ver apéndice para la explicación del funcionamiento). Dispositivos como el propuesto por Young suelen tener aplicación para determinar la longitud de onda, de una onda incidente, a partir de medir la ubicación de las franjas sobre la pantalla. En general a este tipo de dispositivos se los conoce con el nombre de Interferómetros.

La **difracción** es un fenómeno que se observa cuando se distorsiona una onda por un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda de aquella. Este fenómeno es una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz y puede analizarse mediante el empleo del principio de Huygens, considerando a que cada punto del frente de onda es una fuente o foco puntual. La difracción se origina en la interferencia de una fuente extendida, así la luz proveniente de una rendija iluminará regiones más allá de la “sombra” geométrica de la misma con intensidad dependiente de la distancia al centro de la rendija. En la difracción de Fraunhofer el patrón de difracción a una distancia lo suficientemente grande como para que se reciban únicamente rayos difractados paralelos.

En el apéndice adjunto se describen las expresiones que permiten localizar los máximos y mínimos de interferencia y de difracción así como las funciones que describen la intensidad de la luz sobre las pantallas.

### 3. Equipo e instrumental

#### Equipamiento requerido:

Banco Optico (OS-9103)

láser

Transportador lineal (OS-9106 A)

Rendija simple/doble (nº de rendijas; ancho; separación)

9165 A-B 1; 0,04;

9165 B-A 2; 0,04; 0,25

9165 C-A 2; 0,04; 0,125

9165 B-C 2; 0,08; 0,25

**Opcional:** Fotómetro, con fibra óptica (OS-8020)

Rendija fotométrica de 1 mm (OS-9119)

pantalla blanca

*Recuerde que no debe mirarse el láser de frente, ni en forma directa ni por reflexión en los espejos. En cambio se puede mirar la luz reflejada sobre una pantalla. ¿Por qué?*

### 4. Procedimiento

1. Colocar la rendija de ancho  $a=0.04$  mm en un portacomponentes a aproximadamente 27 cm del láser y la pantalla en el brazo del transportador lineal. Observe cómo se distribuye la luz sobre la pantalla y

describalo. Realice un diagrama que indique (en lo posible usando la misma escala) las características cualitativas de las distribuciones de intensidad observadas.

2. Varíe el ancho de la rendija y estudie como se modifica la imagen de difracción. Observe como varía el ancho de la zona central de máxima intensidad cuando se agranda o achica el ancho de la rendija. Haga esquemas como el del punto 1 (en la misma escala) y complete la tabla (ver figura 2).

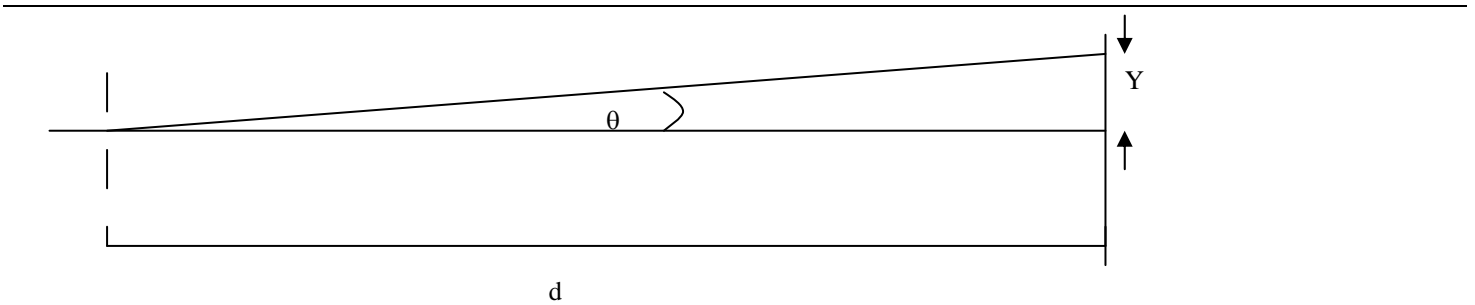


Figura 2 Esquema del experimento de difracción

¿Cómo varía el valor de  $\text{sen}(\theta)$  para el primer mínimo con el ancho de la rendija? Trate de relacionar estos valores con la longitud de onda de la luz incidente ( $\lambda=632.8 \text{ nm}=632.8 \times 10^{-9} \text{ m}$ ) y complete:

Ancho de la rendija (mm)	$\lambda/a$	$Y_{1er \text{ min}}$ (mm)	$\text{sen}(\theta)$ 1er mínimo	$Y_{2do \text{ min}}$ (mm)	$\text{sen}(\theta)$ 2do mínimo	$Y_{2do \text{ min}}$ (mm)	$\text{sen}(\theta)$ 3er mínimo

3. Observe los valores medidos de  $\text{sen}(\theta)$  para los mínimos siguientes. ¿Cómo puede generalizar la ecuación anterior para todos los mínimos?

$$\text{sen}(\theta) =$$

4. **Opcional:** Con la ayuda de un fotómetro mediremos la distribución de intensidad que se forma en la pantalla por difracción de **una** rendija. Para esto retire la pantalla y mueva el fotómetro tal que la lectura del fotómetro sea máxima. Ajustar con la perilla "VARIABLE" hasta llevar la aguja a 10.
5. Comenzar a mover el transportador lineal en alguna dirección y medir la intensidad en el fotómetro cada 0,2 mm (posición del transportador lineal).
6. Realice un gráfico de intensidad en función de  $y$ =posición del fotómetro.
7. Represente en el mismo gráfico los datos medidos y la predicción del modelo teórico para la difracción de la luz por una rendija para los mismos parámetros  $a$ ,  $\lambda$  y  $D$  de su experimento, expresada como:

$$I = I_0 \left( \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi}{\lambda} a \text{sen}(\theta)\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} a \text{sen}(\theta)\right)} \right)^2$$

El ángulo  $\theta$  mide la apertura angular de la figura de difracción respecto del máximo central y verifica  $\text{tg}(\theta) = y/D$ , siendo  $y$  la coordenada sobre la pantalla (ver figura). Para esto transforme sus datos originales de intensidad en función de posición y representelos en función de  $\text{sen}(\theta)$  haciendo un cambio de variables.

8. Ponga la pantalla nuevamente (en el brazo del transportador) y reemplace la placa con las rendijas simples por la que contiene pares de rendijas e ilumine el par de ancho  $a=0.04$  mm y separación entre rendijas  $d=0.25$  mm. Observe como se distribuye la intensidad de la luz sobre la pantalla. Compare con lo observado para una rendija simple de ancho  $a=0.04$  mm. Haga un esquema.
9. Iluminar las rendijas de ancho 0.04 mm y separación 0.5 mm (observe que tienen el mismo ancho que las anteriores pero su separación es mayor. ¿Qué diferencia observa con el caso anterior? ¿Cuál es el efecto de aumentar la separación entre rendijas?.
10. Iluminar las rendijas de ancho 0.08 mm y separación 0.5 mm. Comparar el patrón obtenido con el caso de la rendija de ancho 0.04 y separación 0.5 mm. ¿Cual es el efecto de cambiar el ancho de las rendijas?
11. Prediga, teniendo en cuenta sus observaciones, cual sería el patrón de interferencia para el caso de dos rendijas de ancho 0.08 y separación 0.25 mm. Hacer un diagrama a escala.
12. Complete la siguiente tabla y trate de encontrar una relación entre  $d/a$  y el número de franjas brillantes que se ve dentro del máximo central de difracción (considere la parte entera de  $d/a$ ).

d (mm)	a (mm)	d/a	N° de zonas brillantes

13. **Opcional:** Con la ayuda del fotómetro mida la distribución de intensidad para el caso de **dos rendijas con  $a=0.04$ mm y  $d=0.25$  mm**
14. Represente en el mismo gráfico los datos experimentales y la predicción teórica para la difracción e interferencia de la luz para dos rendijas para los mismos valores de  $a$ ,  $d$ ,  $\lambda$  y  $D$  de su experimento:

$$I = 4I_0 \left( \frac{\text{sen} \left[ \frac{\pi}{\lambda} a \text{sen}(\theta) \right]}{\frac{\pi}{\lambda} a \text{sen}(\theta)} \right)^2 \cos^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} d \text{sen}(\theta) \right)$$

15. De acuerdo a estos resultados y teniendo en cuenta la distribución de intensidades para una rendija, ¿cuál cree que será el patrón de interferencia puro (si no hubiera difracción) de la luz para dos fuentes de luz coherentes?.

# APENDICE

## *El Láser*

El láser es la fuente de luz coherente por excelencia. Llamado así por un acronismo de su nombre en inglés "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*", un haz de luz láser, se halla formado por infinidad de fotones, cuyas ondas se hallan en fase, superponiéndose constructivamente. El estado coherente no consiste en una superposición de estados individuales independientes, sino que es un estado colectivo (estado cuántico colectivo), indivisible.

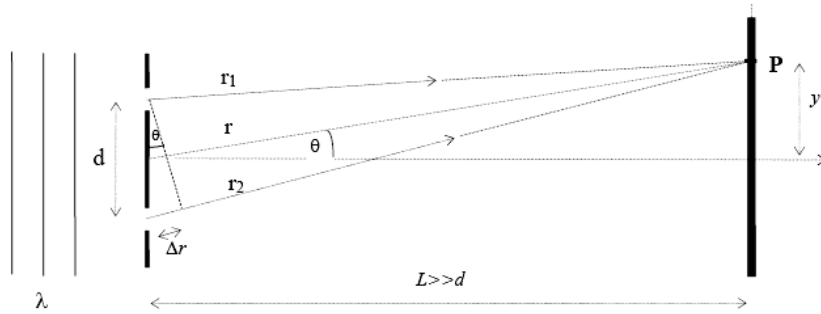
Algunos tipos de Láser consisten, a grandes rasgos, de una cavidad resonante con espejos en los extremos que obligan a la luz a reflejarse permanentemente, ida y vuelta (uno de los espejos es semiespejado, para permitir la salida del haz). El espacio interior de esta cavidad se llena con átomos excitados (medio activo). Supongamos que un electrón de estos átomos se encuentre en un estado excitado y que un fotón con una energía adecuada ("fotón disparador") interactuará con este electrón. En ese caso el electrón se desexcitará, bajando a un nivel de energía inferior emitiendo a su vez un fotón. El fotón "disparador" continuará su camino y eventualmente podría interactuar con otro electrón excitado. El subsecuente proceso de emisión de fotones continuará en una suerte de "reacción en cadena" produciendo una cascada de fotones. Los átomos comienzan a emitir espontáneamente en todas direcciones y sentidos. Desde el exterior, continuamente se fomenta (bomba), la excitación de nuevos átomos para que el sistema funcione permanentemente. Esto se logra, en algunos casos, por medio de descargas eléctricas que ionizan al medio activo. La mayoría de los fotones salen del sistema, salvo aquellos que se propagan en la dirección longitudinal (ida y vuelta de los espejos). El haz de luz producido es casi perfectamente coherente puesto que todos los fotones están en fase. Además como todos los fotones se originan en saltos de energía equivalente tendrán la misma frecuencia y así la luz láser será prácticamente monocromática. Por ser una fuente coherente, el haz láser se dispersa mucho menos que cualquier otro haz incoherente (por ejemplo, luz saliente de una linterna). Como ejemplo, el haz del láser helio-neón tiene una divergencia de menos de un minuto de arco.

El material que forma el medio activo (átomo responsable de la emisión de la radiación) caracteriza al láser. Existen láseres gaseosos, de estado sólido y líquido. Un ejemplo común de láser gaseoso es el de Helio-Neón (rojo;  $\lambda=632,8\text{nm}$ ), de fácil construcción y de poca potencia. El usado en la práctica tiene una potencia de 0,5 mW, se alimentan con 220V de línea y está diseñado de modo que su haz esté colimado. Este láser produce la centésima parte del flujo de energía radiante del sol sobre la Tierra. Para tener un orden de estas magnitudes hagamos la siguiente comparación: la energía incidente sobre la tierra proveniente del sol es de unas cuatro planchas/m<sup>2</sup>. Esto es, unos 2000 W/m<sup>2</sup>.

Dependiendo de las características del láser, éste puede funcionar emitiendo en forma continua o en forma de pulsos de duración extremadamente corta. Debido a la posibilidad de concentrar grandes cantidades de energía en una zona limitada del espacio, los usos del láser se han extendido en los últimos años desde su uso como soldador o como perforador (agujeros en diamantes) hasta láseres capaces de entregar muy alta potencia, del orden de los *Gwatt* ( $10^9\text{W}$ ) o *Twatt* ( $10^{12}\text{W}$ ), en la forma de pulsos que duran varios nanosegundos usando para intentar producir reacciones de fusión termonuclear. Por su coherencia y por la posibilidad de formar haces muy finos, se lo utiliza para operaciones quirúrgicas tales como: soldado de retinas desprendidas, o destrucción de cálculos biliares. La luz láser se utiliza para leer discos compactos en sistemas de audio o en detección de códigos de barras en los supermercados. También es utilizado en sistemas de comunicación, o para la formación de **hologramas**, etc.

### ***Interferencia producida por dos rendijas (Experimento de Young):***

Suponga dos rendijas separadas en una distancia  $d$  tal y como muestra la figura. Dado un punto  $P$  cualquiera sobre la pantalla, la luz proveniente de cada rendija alcanzará dicho punto con una diferencia de camino recorrido entre las ondas, provenientes de cada rendija (ver figura 3).



**Figura 3** Esquema indicando la diferencia de camino recorrido por las ondas provenientes de cada rendija hasta llegar al punto P.

Si la pantalla se halla muy lejos de las rendijas ( $L \gg d$ ), entonces, resulta una buena aproximación considerar que las rectas que unen las rendijas al punto P son paralelas. En base a esta aproximación, podemos calcular la diferencia de camino ( $\Delta r$ ) como,

$$\Delta r = d \sin \theta,$$

siendo  $\theta$  el ángulo entre el punto medio entre las rendijas y el punto de observación P. El desfase entre las ondas provenientes de cada rendija será:

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta r}{\lambda} \cong \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin(\theta)$$

Las franjas brillantes estarán localizadas en aquellos valores de  $\delta$  iguales a un múltiplo entero de veces  $\pi$  ( $\delta = m\pi$ ). Resultando que los mismos estarán localizados en ángulos:

$$\sin(\theta) \cong 2m \frac{\lambda}{d}$$

De la misma manera los mínimos se producirán cuando  $\delta$  sea un múltiplo semi entero de veces  $\pi$  ( $\delta = (2m+1)\pi/2$ ). Resultando que los mismos estarán localizados en ángulos:

$$\sin(\theta) \cong (2m + 1) \frac{\lambda}{2d}$$

En el caso considerado ( $L \gg d$ ) se podrá aproximar que  $\sin \theta = \theta = \tan \theta$

El coeficiente entero  $m$  numera a las franjas, por ejemplo,  $m=0$  corresponde a la franja central ( $0=\theta$ ), llamado *orden cero*, mientras que los valores  $m=\pm 1$  corresponden a las primeras franjas, a los costados de la central, llamados *orden 1* (ver figura 4).

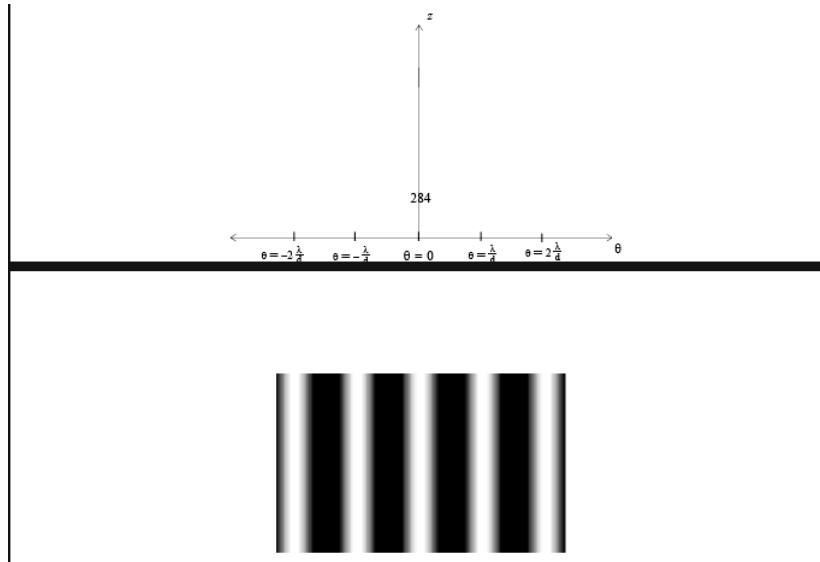


Figura 4 Esquema de la imagen en la pantalla. La franja central corresponde al orden cero.

A partir de las expresiones anteriores es posible observar que el apartamiento angular entre dos franjas resulta simplemente,

$$\theta_{m+1} - \theta_m \cong \frac{\lambda}{d}$$

Dado que para la observación del fenómeno de interferencia es necesario distinguir las franjas puede verse de la expresión anterior que la condición ( $\Delta\theta$  suficientemente grande) limita la relación entre  $\lambda$  y  $d$ . Para que el fenómeno resulte visible, la distancia  $d$  de separación entre las rendijas debe ser del orden, o menor, que la longitud de onda. Para la luz visible ( $\lambda=400-700 \text{ nm}$ ), la distancia entre rendijas debe ser del orden del  $1\mu\text{m}$ .

*Comentario: La coherencia de las ondas sólo puede mantenerse siempre y cuando recorran caminos ópticos que no difieran entre sí más allá de una cierta longitud máxima, llamada longitud de coherencia.*

### Difracción de Fraunhofer:

Consideremos una rendija rectangular estrecha, de anchura  $a$ , y larga, de modo que podamos ignorar los efectos de los bordes, sobre la que inciden ondas normales al plano de la rendija de longitud de onda  $\lambda$ . De acuerdo con el principio de Huygens, cuando la onda incide sobre la rendija todos los puntos de su plano se convierten en fuentes de ondas secundarias emitiendo nuevas ondas que en este caso reciben el nombre de ondas difractadas. Observando las ondas difractadas a diferentes ángulos  $\theta$  respecto a la dirección de incidencia, figura 5, encontramos que para ciertas direcciones su intensidad es nula.

Estas direcciones de intensidad nula están dadas por la relación:

$$a \cdot \text{sen}\theta = m\lambda, m \neq 0$$

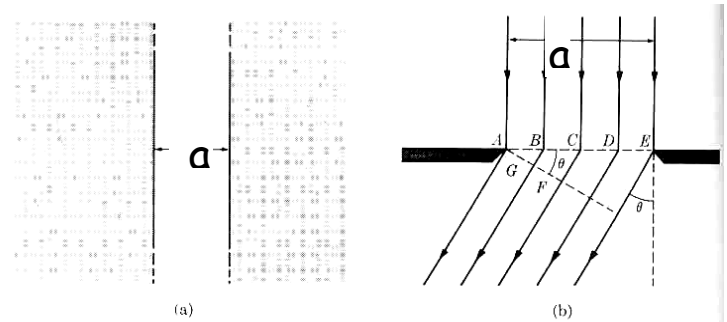


Figura 5 Rendija rectangular estrecha donde tiene lugar b) la difracción de la onda luminosa

La figura 6 representa el diagrama de difracción de una sola rendija observado y la intensidad de las ondas difractadas en función del ángulo  $\theta$ . Obsérvese que el máximo central tiene un ancho doble del de los demás máximos secundarios.

**Intensidad de las franjas (interferencia y difracción+interferencia):**

La intensidad total de luz que llega a cada punto P de la pantalla (patrón de máximos y mínimos) puede hallarse a partir de sumar las ondas provenientes de ambas rendijas (principio de superposición). Así la expresión para dicha intensidad resulta:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right)$$

Cunado consideramos el efecto de interferencia conjuntamente con el de difracción (las rendijas no pueden considerarse como fuentes puntuales, la expresión de la intensidad de la luz sobre la pantalla será

$$I = 4I_0 \left( \frac{\text{sen}\left[\frac{\pi}{\lambda} a \text{sen}(\theta)\right]}{\frac{\pi}{\lambda} a \text{sen}(\theta)} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} d \text{sen}(\theta)\right)$$

donde  $a$  representa el ancho de la rendija.

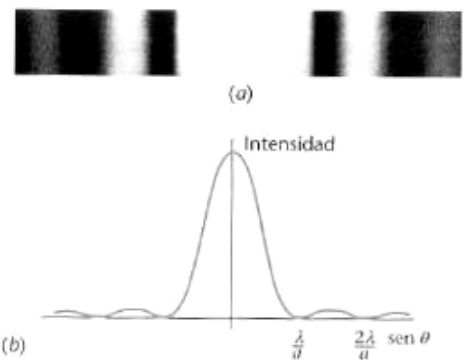


Figura 6 Diagrama de difracción de una sola rendija

**Link interesante:** <http://www.ub.edu/javaoptics/applets/YoungEs.html>