

POLARIZACIÓN DIFRACCIÓN E INTERFERENCIA

OBJETIVOS:

Al finalizar el tema el estudiante ha de estar en capacidad de explicar, analizar y calcular los efectos producido sobre las ondas cuando se encuentran con interferencias en el medio donde se propaga. Para ello el estudiante ha de ser capaz de:

- Definir polarización de onda e indicar los distintos tipos de polarización que pueden producirse en ondas electromagnéticas.
- Determinar el ángulo para polarizar una onda electromagnética por medio de la reflexión.
- Explicar los fenómenos relacionados con la propagación de la luz en distintos medios materiales (medios anisótropos, dicroísmo, doble refracción.)
- Dada dos o más fuentes sincrónicas determinar la intensidad de la interferencia en un punto a una distancia grande de la fuente.
- Determinar las longitudes de ondas, frecuencia y magnitudes de la amplitud de las ondas electromagnéticas en distintos casos de interferencia.
- Determinar la intensidad de la onda para cuando ocurre la difracción de Fraunhofer por una rendijas. Conociendo la intensidad, determinar las longitudes de ondas, frecuencia y magnitudes de la amplitud de las ondas electromagnéticas en la difracción por una sola rejilla.

12.1.- POLARIZACIÓN.

La polarización es un fenómeno que solo existe en ondas transversales. En este proceso cuando una onda atraviesa un medio polarizante la magnitud de la amplitud se reduce, llegando a ser nula si el espesor del medio atravesado lo permite.

12.1.1.- Polarización de las ondas electromagnéticas.

Los campos eléctricos y magnéticos se propagan perpendiculares entre sí y a la velocidad de la onda; en el espacio deben existir dos componentes con direcciones perpendiculares entre sí para cada campo; esto es:

$$\vec{E} = E_{y0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{j} + E_{z0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{k}$$

$$\vec{B} = B_{y0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{j} + B_{z0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{k}$$

Se dice que la onda tiene una polarización plana si solo existe una componente del campo, la otra a sido totalmente suprimida (ejemplo de este tipo tenemos las ondas electromagnética de un dipolo).

$$\vec{E} = E_{y0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{j}$$

$$\vec{B} = B_{z0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{k}$$

Las ondas transversales pueden tener polarización circular o elíptica; ello ocurre cuando el vector campo eléctrico (y por consiguiente el magnético) describe un círculo o una elipse; en este caso:

$$\vec{E} = E_{y0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{j} + E_{z0} \cdot \text{cos}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{k}$$

$$\vec{B} = B_{y0} \cdot \text{cos}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{j} + B_{z0} \cdot \text{sen}(K \cdot x - \omega \cdot t) \cdot \hat{k}$$

Si $E_{y0} = E_{z0}$ ($B_{y0} = B_{z0}$) estamos ante una polarización circular y caso contrario estamos ante una polarización elíptica.

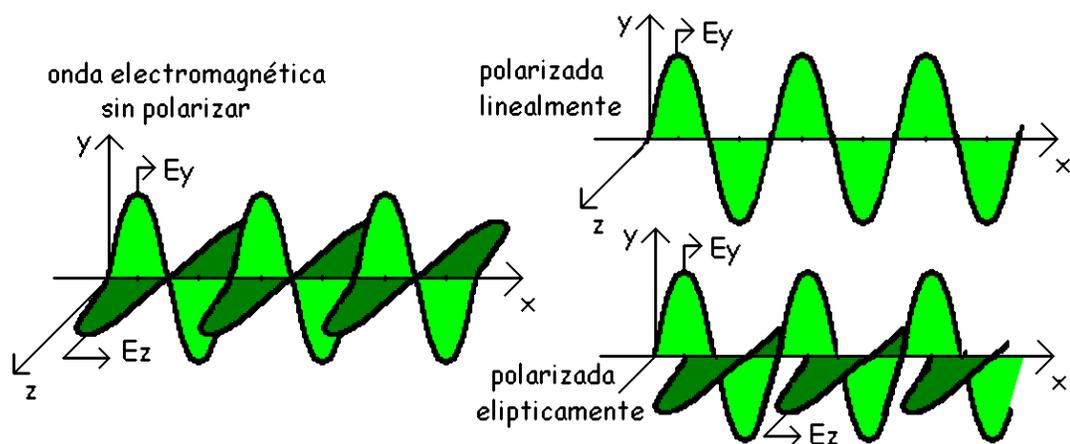


Figura 12-01

Existen cuatro situaciones que polarizan la luz a partir de luz no polarizada. Estos son: la absorción, la reflexión, la dispersión y la birrefringencia.

12.1.2.- Polarización por Absorción.

En este caso estamos ante sustancias que son conductoras en una determinada dirección; cuando la luz incide en ellas, la componente paralela del campo eléctrico a las líneas conductoras eléctricas dan origen a corrientes eléctricas que absorben la energía luminosa dejando solo pasar los campos eléctricos perpendiculares a estas líneas. Ejemplo de este tipo de sustancias tenemos el material artificial conocido como polaroide, inventado por *E. H. Land* en 1938 y que contiene largas cadenas de hidrocarburos.

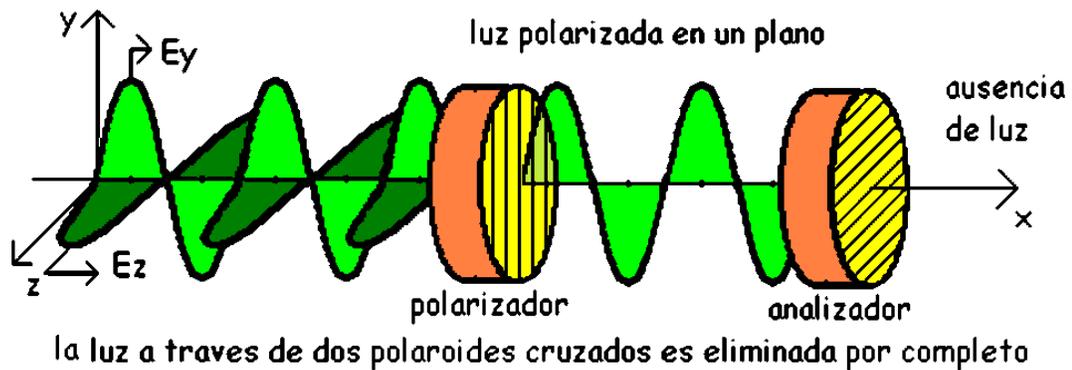


Figura 12-02

Existen cristales en la naturaleza como a Turmalina (borosilicato de aluminio) o la herapatita (sulfato de yodoquinina) que al ser atravesados por la luz absorben en distinto grado las componentes electromagnéticas; si el espesor es suficiente la luz que logra atravesar el cristal estará polarizada, se habla entonces de dicroísmo.

12.1.3.- Polarización por Reflexión.

Cuando la luz se refleja en una superficie, la luz esta ligeramente polarizada, el grado de polarización depende de los ángulos de incidencia y del índice de refracción; ocurre que la luz reflejada esta totalmente polarizada si los rayos de reflexión y refracción forman entre si 90°.

Lo anterior ocurre cuando:

$$\theta_r = 90^\circ - \theta_r' = 90^\circ - \theta_i$$

la luz reflejada esta polarizada en un plano paralelo a la superficie

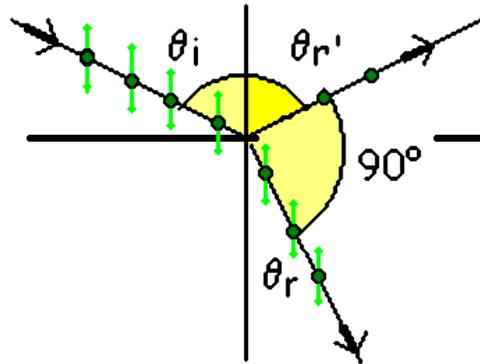


Figura 12-03

Por Ley de Snell tenemos:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_i) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_r) = n_2 \cdot \text{sen}(90^\circ - \theta_i) \rightarrow$$

$$\frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen}(\theta_i) = \text{sen}(90^\circ) \cdot \cos(\theta_i) - \cos(90^\circ) \cdot \text{sen}(\theta_i) \rightarrow$$

$$\frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen}(\theta_i) = \cos(\theta_i) \rightarrow$$

Donde resulta la **Ley de Brewster**, que establece que el ángulo para que ocurra la polarización por reflexión viene dado por:

$$\text{tang}(\theta_i) = \frac{n_2}{n_1} \quad 12.1$$

12.1.4.- Polarización por Dispersión.

La dispersión se refiere a situaciones donde la velocidad de la onda no depende solo del medio, cuando la velocidad de la onda es independiente de su longitud o frecuencia estamos ante medios no dispersivos; ejemplo ondas en cuerdas; medios dispersivos son por ejemplo el agua y el vidrio; por ejemplo, cuando la luz entra en un prisma de vidrio se descompone en distintos colores, ello implica que la refracción de la luz esta no solo en función del índice de refracción del material sino también de la frecuencia de la onda.

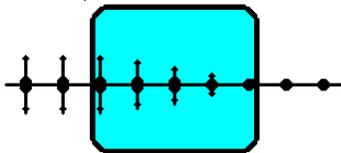
Si una onda luminosa moviéndose por el eje "Z" entra en un medio donde existe dispersión entonces parte de la luz continua en esa misma dirección, y a lo largo de

los ejes "X" y "Y" se van a mover componentes perpendiculares a dichos ejes de luz polarizada.

12.1.5.- Polarización por Birrefringencia.

La mayoría de los materiales son *isotropicos* (todas las direcciones son equivalentes) pero ello depende del arreglo interno de los átomos; existen sustancias *anisótropicas* (*uniaxicos o birrefringentes* si tiene dos índices iguales y uno distinto, o *biaxicos* si son los tres distintos) como la calcita que presentan según por donde entre la luz distintos grados de refracción; en este caso cuando la luz penetra estos cuerpos, una de las componentes del campo eléctrico tendrá un grado de refracción distinto a la otra componente; por ello cuando la luz sale por el otro lado de la cara se observan dos imágenes; cada una corresponde a una componente del campo eléctrico y la otra al otro; este fenómeno se conoce en los cristales como doble refracción polarización en cristales

el cristal dicroico absorbe una componente de la luz más que otra, si es lo suficientemente grueso la luz que lo atraviesa esta polarizada



luz no polarizada que incide sobre un cristal birrefringente como la calcita se separa en dos haces polarizados

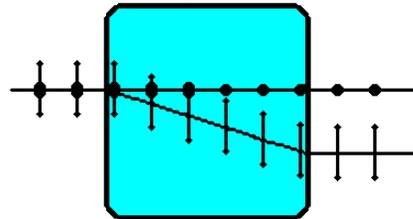
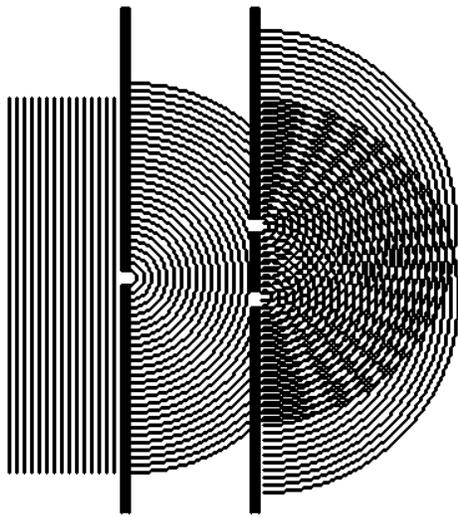


Figura 12-04

12.2.- LA INTERFERENCIA.

Cuando una onda se encuentra con un obstáculo ocurre que los frentes de ondas se interrumpen parcialmente; en este caso tiene gran aplicación el Principio de Huygens. La flexión de las ondas detrás del área sombreada recibe el nombre de difracción y es propia solo de ondas y no de partículas.

Si el obstáculo presenta pequeñas aperturas, cuyo tamaño es similar al de las longitudes de onda, entonces cada apertura se transforma en una fuente de ondas esféricas; y se define como interferencia a la superposición de los distintos frentes de ondas que genera cada fuente.



Una onda plana al llegar a un apertura sufre del proceso de difracción; si se tienen dos (o más aperturas) las distintas difracciones dan origen a un fenómeno de interferencia, donde se observara la formación de patrones o líneas más claras o más oscuras.

Figura 12-05

12.2.1.- Interferencia en una doble rejilla.

La interferencia ocurre cuando dos (o más) movimientos ondulatorios coinciden en el espacio y el tiempo. Analizaremos sólo el ejemplo más simple que ocurre una cuando onda plana llega a una pared con dos aperturas separadas una distancia " d " entre si; cada apertura se transforma en una fuente puntual de ondas donde ambas deben tener la misma frecuencia angular " ω "; si estamos en un punto " P " a distancias " r_1 " y " r_2 " respectivamente de los focos (aperturas) emisores de ondas, debe ocurrir:

$$y_1 = A_o \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + K \cdot r_1)$$

$$y_2 = A_o \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + K \cdot r_2)$$

Recordando que la suma de movimientos armónicos con igual frecuencia y distinta fase de inicio es un movimiento armónico de igual frecuencia, debe ocurrir que:

$$y = y_1 + y_2 = A_o \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + K \cdot r_1) + A_o \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + K \cdot r_2)$$

$$y_2 = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi)$$

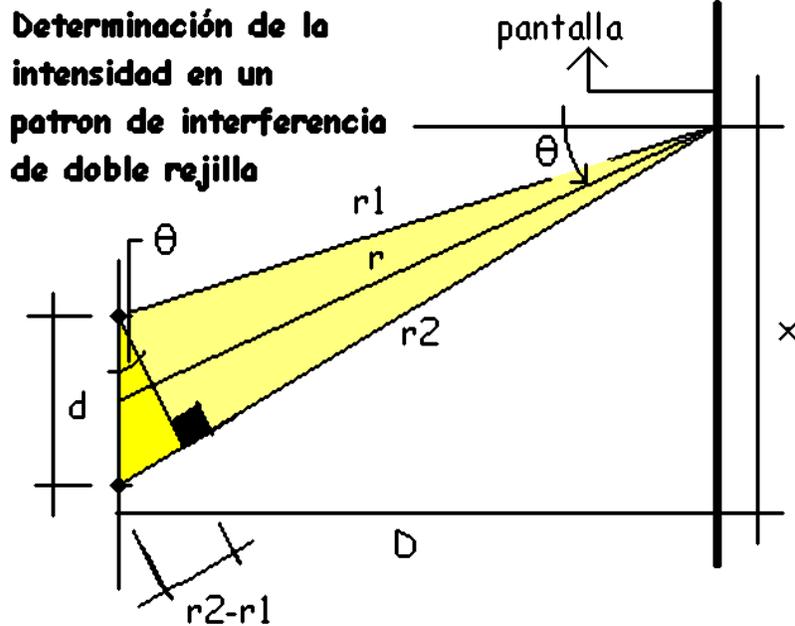


Figura 12-06

Donde:

$$A^2 = A_o^2 + A_o^2 + 2 \cdot A_o \cdot A_o \cdot \cos(K \cdot (r_2 - r_1)) \rightarrow$$

$$A^2 = 2 \cdot A_o^2 \cdot [1 + \cos(K \cdot (r_2 - r_1))]$$

En el punto "P" existirá una amplitud máxima si el coseno es igual a 1 y un mínimo si vale -1; luego recordado que $K = 2\pi/\lambda$, tenemos:

$$\cos(\theta) = 1 \rightarrow \theta = [2n] \cdot \pi$$

$$\cos(\theta) = -1 \rightarrow \theta = [2n - 1] \cdot \pi$$

Donde resulta:

$r_2 - r_1 = n \cdot \lambda$	máximo	12.2
$r_2 - r_1 = [2n - 1] \cdot \frac{\lambda}{2}$	mínimo	

Generalmente tiene importancia la separación entre las fuentes o focos de ondas (d); haciendo un sistema de coordenadas en el centro de esta separación y sea "θ" el ángulo que se mide desde este centro de coordenadas respecto a eje perpendicular a la

línea que une los focos hasta la línea que pasa por "P", entonces si este punto esta bien lejos de las dos fuentes sincrónicas debe ocurrir:

$$d \cdot \text{sen}(\theta) = r_2 - r_1$$

Por tanto podemos decir:

$\frac{x}{D} \simeq \text{sen}(\theta) = \frac{n \cdot \lambda}{d}$	máximo	12.3
$\frac{x}{D} \simeq \text{sen}(\theta) = \frac{[2n - 1] \cdot \frac{\lambda}{2}}{d}$	mínimo	

Si el punto "P" esta bien lejos de los focos entonces $\text{sen}(\theta) \approx \text{tang}(\theta) \approx \theta = x/D$, siendo "D" la longitud a lo largo del eje principal y "x" la distancia entre este eje y el punto "P".

La intensidad de una onda armónica depende de su magnitud, luego:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot v = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot v \right] \cdot A^2 \rightarrow$$

$$I = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot v \right] \cdot A^2 = 2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot v \right] A_0^2 \cdot [1 + \cos(K \cdot (r_2 - r_1))] \rightarrow$$

$$I \simeq 4 \cdot I_0 \cdot \cos^2 \left[\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \frac{x}{D} \right]$$

12.2.2.- Interferencia por Rejillas Múltiples.

En el caso de tener muchas aperturas en rejilla la situación general es similar si bien su análisis es ligeramente más complejo; para simplificarlo un poco asumiremos algunas premisas:

- *La amplitud de las ondas correspondientes a los rayos generados después de atravesar la rejilla es uniforme (constante).*
- *La distancia donde estudiaremos la interferencia de los distintos rayos está bien lejos de la rejilla.*
- *Existirá un número "N" de aperturas en la rejilla, separada cada apertura una distancia uniforme "d" con respecto a sus vecinas.*
- *los rayos generados están fase; esto es que la onda que choca contra la rejilla es plana.*

Un polígono de este tipo puede ser considerado inscrito en un círculo de radio “R” con centro en “C”. Sea “Po” el punto de origen de las suma de vectores y “Pn” el punto de llegada del vector suma, entonces el ángulo “∠Po,C,Pn”; que denotamos con la letra griega "θ", es igual a la suma de los ángulos “∠Pi-1,C,Pi”; siendo el punto “Pi” el punto final al que llega cada uno de los vectores sumando.

Geoméricamente es la magnitud de “∠Pi-1,C,Pi” es igual a la cantidad “δ”. Luego el ángulo “θ = N·δ”. Como la distancia entre los puntos “Po” y “Pn” es la magnitud del vector resultante, entonces por triángulos rectángulos (al dividir cada triángulo isósceles) debe ocurrir:

$$\frac{1}{2} \cdot A = R \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$\frac{1}{2} \cdot A_o = R \cdot \text{sen}(\delta/2)$$

Despejando “R” tenemos la amplitud de la resultante es:

$$A = A_o \cdot \frac{\text{sen}(\theta/2)}{\text{sen}(\delta/2)} = A_o \cdot \frac{\text{sen}(N \cdot \delta/2)}{\text{sen}(\delta/2)} \quad 12.4$$

La fase de inicio del vector resultante se puede obtener por suma de ángulos internos de los triángulos isósceles ∠Po,C,Pn y ∠Po,C,Pi

$$2\beta + N \cdot \delta = 180^\circ$$

$$2(\beta + \phi) + \delta = 180^\circ$$

$$2\beta + N \cdot \delta = 2\beta + 2\phi + \delta \rightarrow$$

$$\phi = (N - 1) \cdot \frac{\delta}{2} \quad 12.5$$

En definitiva la ecuación que describe el movimiento armónico resultante de la suma de N ondas armónicas iguales pero desfasadas entre si igual ángulo viene dada por:

$$x = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi) = A_o \cdot \frac{\text{sen}[N \cdot \delta/2]}{\text{sen}[\delta/2]} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + (N - 1) \cdot (\delta/2)) \quad 12.6$$

En base a lo anterior tenemos, sustituyendo por el valor del ángulo “ δ ” para cuando el punto “P” está muy lejos de las aperturas tenemos:

$$A = A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]} \simeq A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]}{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]} \quad 12.7$$

De estos resultados se tiene que la Amplitud tendrá la siguientes características:

- Cuando $\delta = 2\pi/N = 4\pi/N = \dots = 2n\pi/N$ resulta que se tiene un polígono cerrado, esto es $\text{sen}(N \cdot 2n\pi/N) = 0$; luego estos puntos son mínimos en el diagrama de interferencia.
- Cuando $\delta = 3\pi/N = 5\pi/N = \dots = (2n + 1)\pi/N$ deben existir máximos. El valor del $\text{sen}(N \cdot (2n + 1)\pi/N) = \pm 1$; estos máximos serán “subsidiarios” mientras “n” no sea múltiplo entero de “N”, en este último caso tenemos un máximo principal. El máximo principal se corresponde el ángulo “ $\theta \simeq x \cdot d/D$ ” con el del diagrama de interferencia de la rejilla doble.

La intensidad de la interferencia de una múltiple rejilla esta dada por:

$$I = \Sigma\left(\frac{1}{2}\rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot v\right) = \left(\frac{1}{2}\rho \cdot \omega^2 \cdot A_o^2 \cdot v\right) \left[\frac{\text{sen}\left[\frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}\right]^2 \rightarrow$$

$$I = I_o \cdot \left[\frac{\text{sen}\left[\frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}\right]^2 \simeq I_o \cdot \left[\frac{\text{sen}\left[\frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]}{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]}\right]^2 \quad 12.8$$

Diagrama de intensidad de la ondas
para dos, tres, cuatro y cinco aperturas

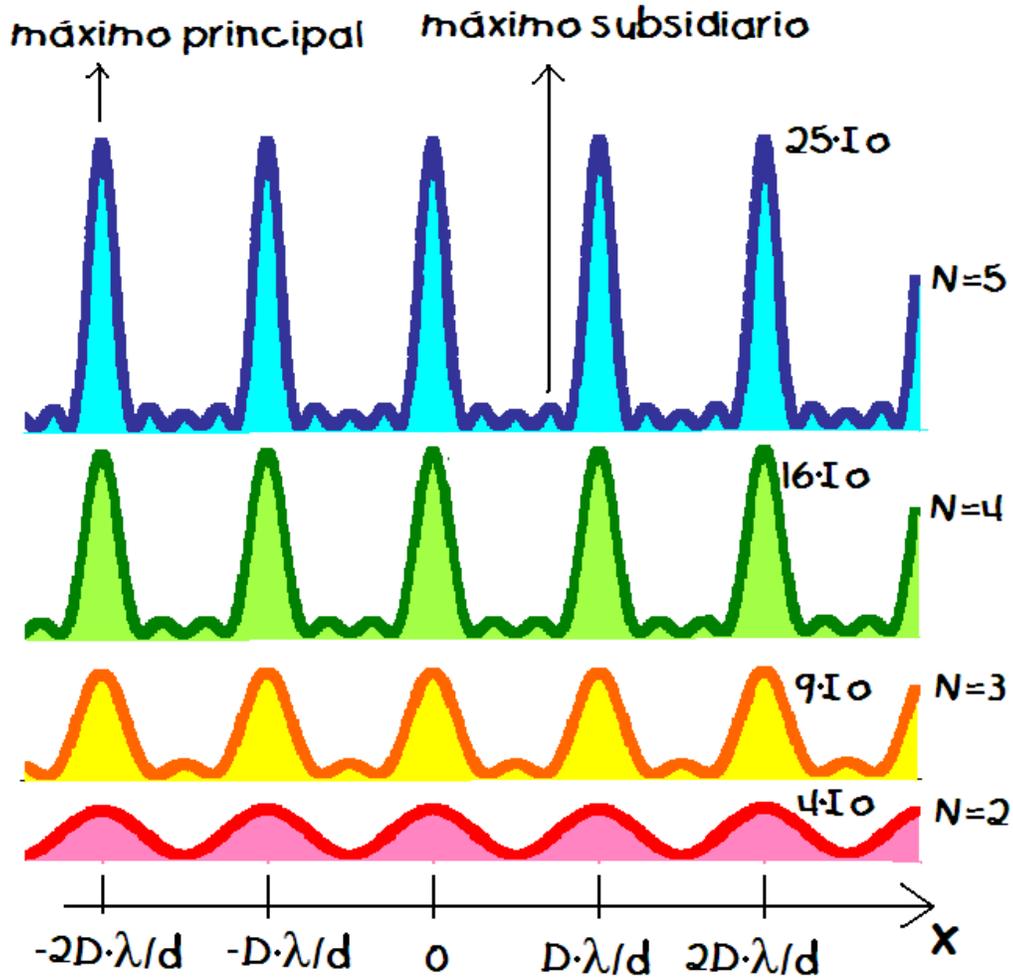


Figura 12-08

12.3.- DIFRACCIÓN POR UNA SOLA APERTURA.

La difracción se refiere al hecho de que la luz, como otras ondas, se desvía alrededor de los objetos que pasa y esparce después de atravesar rendijas estrechas; esta desviación da origen a un patrón típico debido a la interferencia entre los rayos de luz que recorren diferentes distancias. Se define como Difracción de Fraunhofer a aquellas donde se determina la intensidad a una distancia bien lejos de la fuente; si buscamos la intensidad a una distancia más cerca estamos ante la Difracción de Fresnel, (este último tipo no lo estudiaremos en este capítulo)

Intensidad de las ondas en una Difracción

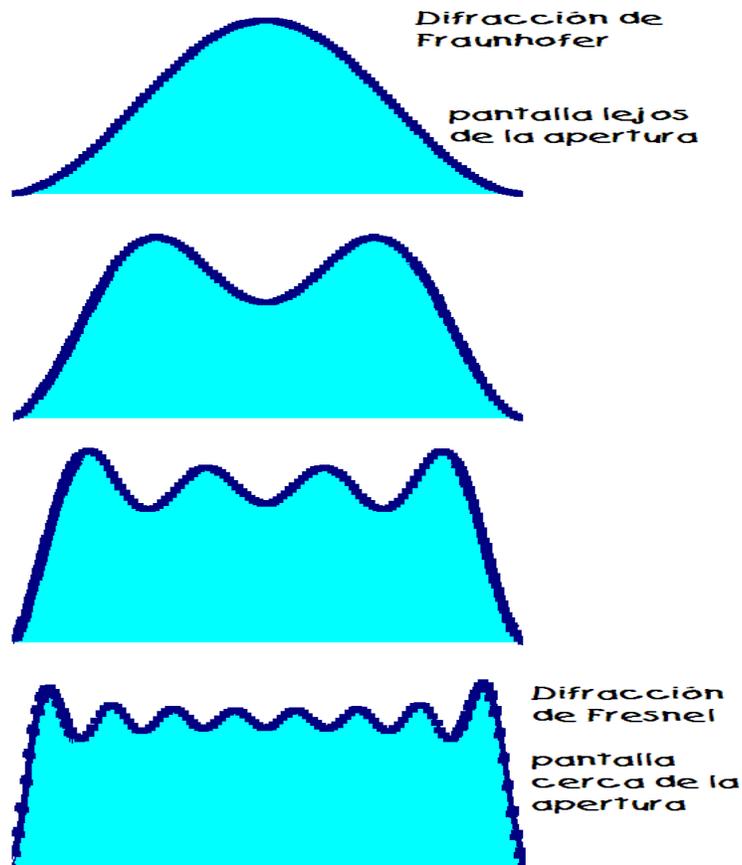


Figura 12-09

Cuando la luz pasa por rejillas estrechas de ancho "b" se producirá un patrón que corresponde a suponer que existen "N" rayos producidos por "N" focos, ya que se asume que la luz es sincrónica (llega como onda plana a la apertura) y la longitud de la onda de la luz es cientos o miles de veces menor que el tamaño "b" de la apertura, por tanto si comparamos con un sistema de múltiple rejilla podemos decir que $d = b/N$ reemplazando en la expresión 12.7 resulta:

$$A = A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{N \cdot \pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{N \cdot \lambda}\right]}{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{N \cdot \lambda}\right]} \simeq A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{N \cdot \pi \cdot b \cdot x}{N \cdot \lambda \cdot D}\right]}{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot x}{N \cdot \lambda \cdot D}\right]} \rightarrow$$

$$A = A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}{\left[\frac{\pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{N \cdot \lambda}\right]} \simeq A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]}{\left[\frac{\pi \cdot b \cdot x}{N \cdot \lambda \cdot D}\right]} \rightarrow$$

$$A = N \cdot A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}{\left[\frac{\pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]} \simeq N \cdot A_o \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]}{\left[\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]} \rightarrow A = N \cdot A_o \cdot \frac{\text{sen}(\theta)}{\theta}$$

La intensidad de la onda viene dada por:

$$I = I_o \cdot \left[\frac{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]}{\left[\frac{\pi \cdot b \cdot \text{sen}(\theta)}{\lambda}\right]} \right]^2 \simeq I_o \cdot \left[\frac{\text{sen}\left[\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]}{\left[\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot D}\right]} \right]^2 \quad 12.9$$

Como $\text{sen}(\theta)/\theta \rightarrow 1$ cuando el ángulo $\theta \rightarrow 0$, para dicho ángulo tenemos un máximo central, a ambos lados de ese ángulo aparecerán puntos donde el seno se vuelve nulo y puntos donde la función alcanza los máximo (o mínimos) relativos, todos de menor tamaño que el central ya que están divididos por el ángulo:

$$\frac{x}{D} \simeq \text{sen}(\theta) = \frac{n \cdot \lambda}{b} \quad \text{mínimo}$$

$$\frac{x}{D} \simeq \text{sen}(\theta) = \frac{[2n + 1] \cdot \frac{\lambda}{2}}{b} \quad \text{maximo}$$

Intensidad de una difracción en una apertura rectangular de ancho "b"

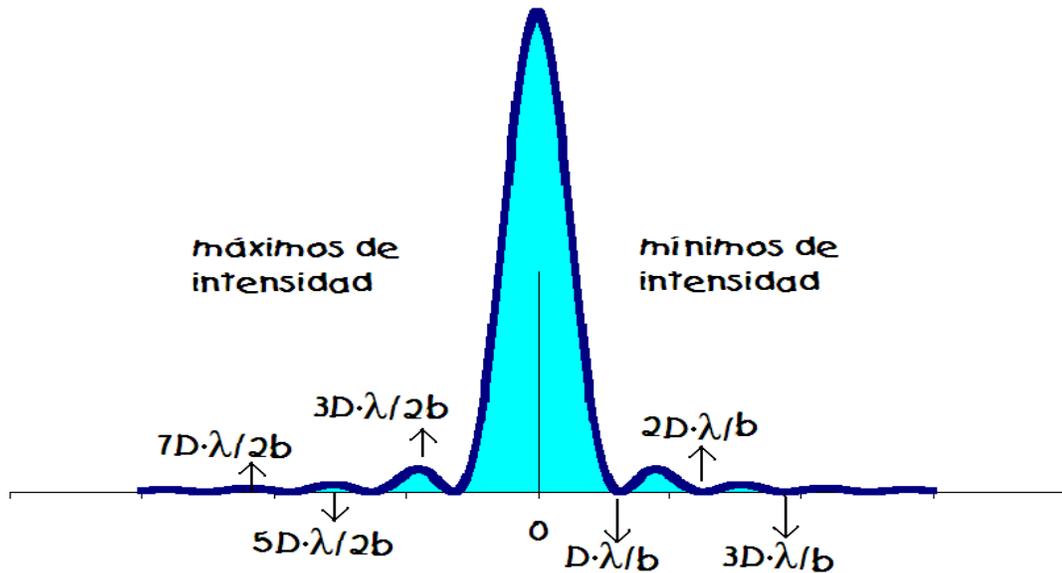


Figura 12-10

Cuando se trata de difracción a través de una apertura circular (no una rejilla o ranura) se tiene la misma expresión pero multiplicada por un factor de corrección:

$$\frac{x}{D} \simeq \text{sen}(\theta) = 1,22 \cdot \frac{n \cdot \lambda}{b} \quad \text{mínimo} \quad 12.10$$

$$\frac{x}{D} \simeq \text{sen}(\theta) = 1,22 \cdot \frac{[2n + 1] \cdot \frac{\lambda}{2}}{b} \quad \text{maximo}$$

Si dos fuentes luminosas pasan por una apertura, se observaran como dos fuentes diferentes cuando el ángulo (α) que forman respecto a la apertura es mayor que el ángulo correspondiente al primer mínimo, ello se conoce **Criterio de Rayleigh** para la resolución.

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{\lambda}{b} \quad \text{rejilla} \quad 12.11$$

$$\text{sen}(\alpha) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{b} \quad \text{apertura circular}$$

Superposición de
 dos difracciones
 que pasan por
 una apertura

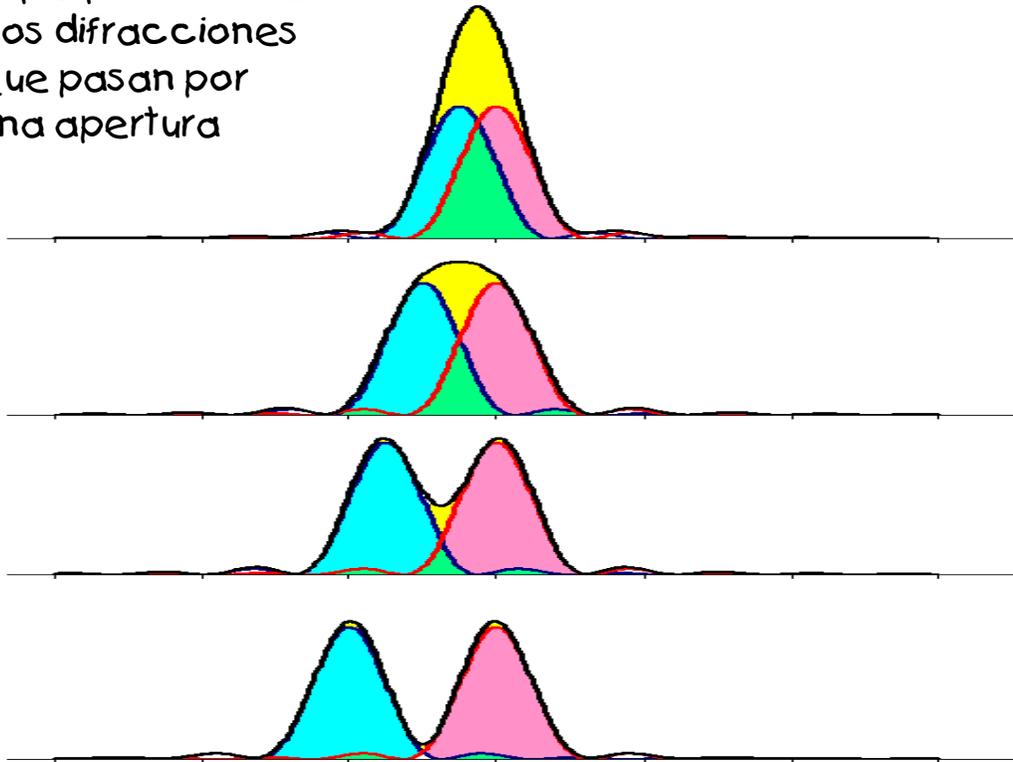


Figura 12-10

En el caso de redes de difracción; esto es tener una rejilla con más de una apertura, lo que tenemos es una combinación de los dos fenómenos; el de interferencia y el de difracción; para un determinado punto ubicado a una distancia "P" de la rejilla, cada apertura generara su propia intensidad de difracción; la suma de todos los diagramas de difracción genera la envolvente para el diagrama de interferencia que sigue respetando la misma ecuación original.

En el caso de la doble rejilla resulta:

$$I = 4 \cdot I_0 \cdot \left[\frac{\text{sen}(\phi/2)}{\phi/2} \right]^2 \cdot \cos^2(\delta/2)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \text{sen}(\theta) \simeq \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d \cdot x}{D}$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \text{sen}(\theta) \simeq \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{b \cdot x}{D}$$

Intensidad de difracción e interferencia
combinados en una doble rejilla

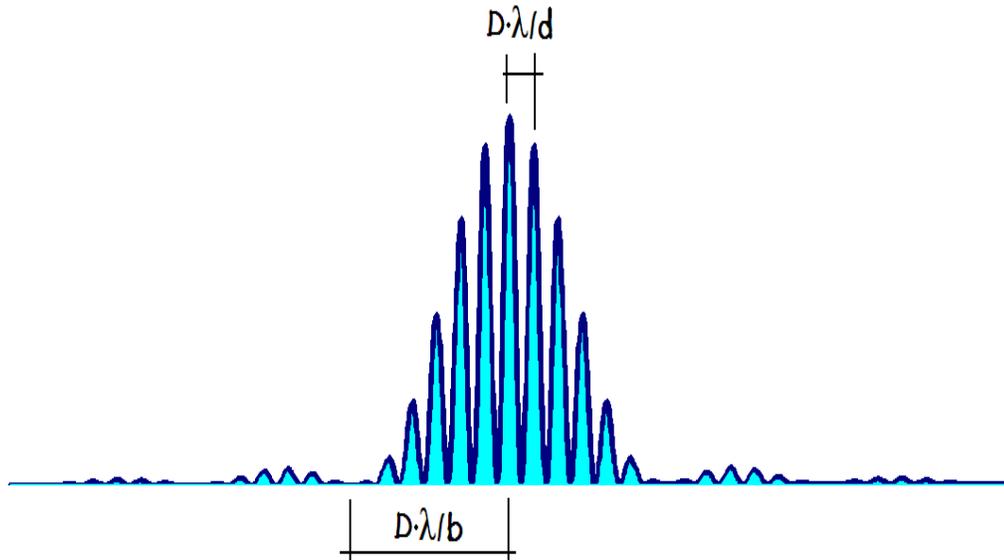


Figura 12-11

REFERENCIAS

1. **FÍSICA. Volumen I. Mecánica.**
Marcelo Alonso y Edward J. Finn.
Addison - Wesley Iberoamericana. U.S.A. 1986.
2. **FÍSICA. Volumen II. Campos y Ondas.**
Marcelo Alonso y Edward J. Finn.
Addison - Wesley Iberoamericana. U.S.A. 1986.
3. **FÍSICA GENERAL. Volumen I.** Douglas C., Ginacoli.
Prentice - Hall hispanoamericana, S.A. México 1988.
4. **FÍSICA GENERAL. Volumen II.** Douglas C., Ginacoli. }
Prentice - Hall hispanoamericana, S.A. México 1988.
5. **FÍSICA tomo I.** Paul A. Tipler.
Editorial Reverte, S.A. Colombia 1990.
6. **FÍSICA tomo II.** Paul A. Tipler.
Editorial Reverte, S.A. Colombia 1990.
7. **FÍSICA PARA LAS CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA SALUD.**
Simon G. G. MacDonald. Y Desmond M. Burns.
Fondo Educativo Interamericano, S.A. 1978
8. **FÍSICA MECÁNICA Y TERMODINAMICA.**
Dr. Marcelo Alonso y Dr. Onofre Rojo. Addison - Wesley Iberoamericana.
1986. México.
9. **FÍSICA EN PERSPECTIVA.** Eugene Hecht.
Addison - Wesley Iberoamericana. 1987. México.
10. **ATLAS DE FÍSICA.+ ejercicios.** Fernandez Ferrer.
Ediciones Jover. 1989. España.