

Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

Ondas Electromagnéticas

5º Año

Física

Masterización: RECURSOS PEDAGÓGICOS

Cód. 7504-19

Prof. Hugo Bertolano
Prof. Silvia Vettorel



Dpto. de Física





LA LUZ

BREVE RESEÑA HISTORICA ACERCA DE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Antes de iniciar el siglo XVII la luz era considerada como una corriente de partículas emitida por una fuente luminosa y que después estimulaban el sentido de la visión al entrar al ojo. El arquitecto principal de esta teoría corpuscular de la luz fue Isaac Newton, quien explicó, sobre las bases de la teoría corpuscular, algunos hechos experimentales conocidos, relacionados con la naturaleza de la luz, a saber, la reflexión y la refracción.

La mayoría de los científicos aceptó la teoría corpuscular de la luz. Sin embargo, durante el curso de su vida fue propuesta otra teoría, una que argumentaba que la luz es cierto tipo de movimiento ondulatorio. En 1678, un físico y astrónomo holandés, Christian Huygens (1629-1695), demostró que la teoría ondulatoria de la luz podría explicar también las leyes de la reflexión y la refracción.

La teoría ondulatoria no recibió aceptación inmediata por varias razones. En primer lugar, todas las ondas conocidas en esa época (sonoras, en el agua, etc.) viajaban a través de algún tipo de medio. Como la luz podía viajar hasta nosotros desde el Sol a través del vacío del espacio no podía ser que fuera una onda debido a que el viaje de las ondas necesita un medio. Asimismo, se argumentaba que, si la luz era alguna forma de onda, debería rodear los obstáculos; por lo tanto, seríamos capaces de ver los objetos alrededor de las esquinas. Ahora se sabe que la luz indudablemente rodea los bordes de los objetos. Este fenómeno, conocido como difracción, no es fácil de observar porque las ondas luminosas tienen longitudes de onda cortas. De este modo, aunque Francisco Grimaldi (1618-1663) descubrió pruebas experimentales para la difracción de la luz aproximadamente en 1660, la mayoría de los científicos rechazaron la teoría ondulatoria y se adhirieron a la teoría corpuscular de Newton. Esto se debió en gran parte, a la buena reputación de Newton como científico.

La primera demostración clara de la naturaleza ondulatoria de la luz fue brindada en 1801 por Thomas Young (1773-1829), quien demostró que, en condiciones apropiadas, los rayos luminosos interfieren entre sí. En ese tiempo, dicho comportamiento no podía explicarse mediante la teoría corpuscular debido a que no hay manera concebible por medio de la cual dos o más partículas puedan juntarse y cancelarse una a otra. Varios años después, un físico francés, Agustín Fresnel (1788-1829), efectuó varios experimentos relacionados con la interferencia y difracción.

En 1850, Jean Foucault (1791-1868) proporcionó pruebas adicionales de lo inadecuado de la teoría corpuscular al demostrar que la velocidad de la luz en vidrios y líquidos es menor que en el aire. De acuerdo con el modelo de partículas, la velocidad de la luz sería más alta en vidrios y líquidos que en el aire.

Experimentos adicionales durante el siglo XIX llevaron a la aceptación general de la teoría ondulatoria de la luz. El trabajo más importante fue el de Maxwell, quien en 1873 afirmó que la luz era una forma de onda electromagnética de alta frecuencia. Hertz proporcionó la confirmación experimental de la teoría de Maxwell al producir y detectar ondas electromagnéticas. Además, Hertz y otros investigadores demostraron que estas ondas exhibían reflexión, refracción y todas las otras propiedades características de las ondas.

Aunque la teoría clásica de la electricidad y el magnetismo fue capaz de explicar la mayor parte de las propiedades conocidas de la luz por medio del modelo ondulatorio, algunos experimentos subsecuentes no pudieron explicarse a partir de ella.

El más impresionante de éstos fue el efecto fotoeléctrico, descubierto también por Hertz: cuando la luz incide sobre una superficie metálica, algunas veces son arrancados los electrones de la superficie. Como un ejemplo de las dificultades que surgen, los experimentos mostraban que la energía cinética de un electrón arrancado es independiente de la intensidad luminosa. Esto era

agregar más energía al electrón. Una explicación del efecto fotoeléctrico fue propuesta por Einstein en 1905 en una teoría que empleó el concepto de cuantización desarrollado por Max Planck (1858-1947) en 1900. El modelo de cuantización supone que la energía de la onda luminosa está presente en paquetes de energía llamados fotones; por lo tanto, se dice que la energía está cuantizada. De acuerdo con la teoría de Planck, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética:

$$E = h f$$

donde la constante de proporcionalidad $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ es la constante de Planck.

Es importante observar que esta teoría retiene algunas características tanto de la teoría ondulatoria como de la teoría corpuscular de la luz. Como veremos más adelante, el efecto fotoeléctrico es una consecuencia de la transferencia de energía de un fotón aislado a un electrón en el metal. Esto significa que el electrón interactúa con un fotón de luz como si hubiera sido golpeado por una partícula. Pero este fotón tiene características similares a las de las ondas debido a que su energía está determinada por la frecuencia (una cantidad ondulatoria).

En vista de estos hechos, debe considerarse que la luz tiene una naturaleza dual. Es decir, en algunos casos la luz actúa como una onda y en otros actúa como una partícula.

La teoría ondulatoria electromagnética clásica proporciona una explicación adecuada de la propagación de la luz y de los efectos de interferencia, en tanto que el efecto fotoeléctrico y otros experimentos que incluyen la interacción de la luz con la materia se explican mejor suponiendo que la luz es una partícula.

La luz es la luz, sin duda. Sin embargo, la pregunta, “¿la luz es una onda o una partícula?”, es inadecuada. En algunos experimentos observamos sus propiedades ondulatorias; en otros experimentos observamos sus propiedades de partícula.

Nos ocuparemos de estudiar en el presente capítulo los fenómenos en que interviene la luz y que pueden explicarse adecuadamente con la **teoría ondulatoria electromagnética**.

INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA ONDULATORIA ELECTROMAGNÉTICA

En 1864, Maxwell publicó un artículo titulado “Teoría Dinámica del Campo Electromagnético”. En dicho trabajo Maxwell presentó las célebres ecuaciones que unificaban los campos eléctricos y magnéticos, y demostró además, que estas ecuaciones predecían la existencia de ondas de los campos eléctricos y magnéticos (ondas electromagnéticas).

Las ondas descritas en el capítulo anterior son ondas mecánicas, como las sonoras, las ondas en el agua y las ondas en una cuerda, las cuales necesitan de la presencia de un medio para propagarse. En este capítulo, trataremos sobre las propiedades de las ondas electromagnéticas que a diferencia de las ondas mecánicas, pueden propagarse a través del espacio vacío.



Sorprendentemente, el formalismo de Maxwell predice también la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio a la velocidad de la luz. Esta predicción fue confirmada experimentalmente por Heinrich Hertz, quién generó y detectó ondas electromagnéticas. Este descubrimiento a llevado a muchos sistemas prácticos, que incluyen la radio, la televisión y el radar entre otros.

En un nivel conceptual Maxwell unificó los temas de la luz y el electromagnetismo desarrollando la idea de que la luz es una forma de radiación electromagnética.

Otros ejemplos de ondas electromagnéticas son las ondas de radiofrecuencia, las microondas, los rayos X, las ondas ultravioletas, etc.

JAMES CLERK MAXWELL / 1831 – 1879

James Clerk Maxwell es considerado como el más grande físico teórico del siglo XIX. Nacido en Edimburgo en el seno de una familia escocesa muy conocida, ingresó a la universidad de esa ciudad a la edad de 15 años, época en la cual descubrió un original método para dibujar un óvalo perfecto. Maxwell obtuvo su primera cátedra en 1856 en Aberdeen. Esto fue el principio de una carrera durante la cual desarrollaría la teoría electromagnética de la luz, la explicación de la naturaleza de los anillos de Saturno y en la que contribuiría a la teoría cinética de los gases.

El desarrollo de la teoría electromagnética de la luz de Maxwell duró muchos años y empezó con el artículo “Acerca de las líneas de fuerza de Faraday”, en el cual Maxwell amplió la teoría de Faraday de que los efectos eléctricos y magnéticos son resultados de campos de fuerza alrededor de los conductores y los imanes.

Su siguiente publicación, “Acerca de líneas de fuerza Física”, incluyó una serie de artículos que explicaban los efectos conocidos de la naturaleza del electromagnetismo.

Otras contribuciones importantes de Maxwell a la física teórica fueron en el área de la teoría cinética de los gases. En esta amplió el trabajo de Rudolf Clausius, quien, en 1858, había demostrado que un gas debe componerse por moléculas en constante movimiento chocando con otras y con las paredes del recipiente.

Esto dio lugar a la distribución de velocidades moleculares de Maxwell además de importantes aplicaciones de la teoría a la viscosidad, la conducción de calor y la difusión de gases.

La exitosa interpretación de Maxwell al concepto de Faraday del campo electromagnético culminó en la ecuación de campo que lleva el nombre de Maxwell.

Una extraordinaria habilidad matemática combinada con una gran intuición permitieron a Maxwell encabezar la vanguardia en el estudio de las dos más importantes áreas de la física en esa época.

Maxwell murió de cáncer antes de cumplir 50 años.

HEINRICH RUDOLF HERTZ / 1857 – 1894

Heinrich Rudolf Hertz nació en 1857 en Hamburgo, Alemania. Estudió física con Helmholtz y Kirchhoff en la Universidad de Berlín.

En 1885 aceptó el cargo de profesor de física en Karlsruhe; fue aquí donde demostró las ondas de radio en 1887, su contribución más importante.

En 1889 Hertz sucedió a Rudolf Clausius como profesor de física en la Universidad de Bonn. Los siguientes experimentos de Hertz que implicaban la penetración de metales por medio de rayos catódicos lo llevaron a la conclusión de que estos rayos son ondas en vez de partículas.

La investigación de ondas de radio, la demostración de su generación y la determinación de su velocidad son algunas de las principales contribuciones de Hertz. Después de descubrir que la velocidad de las ondas de radio era la misma que la de la luz, Hertz demostró que las ondas de radio, al igual que las luminosas, podían reflejarse, refractarse y difractarse.

Hertz murió de envenenamiento de sangre a la edad de 36 años. Durante su corta vida hizo muchas contribuciones a la ciencia. El hertz, igual a una vibración completa o ciclo por segundo, recibió ese nombre en su honor.

Es dudoso que Maxwell hubiese imaginado el enorme impacto que su descubrimiento tendría en posteriores tentativas humanas.

Sin embargo, la siguiente frase extraída de una carta que escribió a C. H. Hay, el 5 de enero de 1865, señala la creencia de que sus descubrimientos eran realmente significativos; “Estoy preparando un artículo con una teoría electromagnética para la luz, el cual, mientras no me convenza de lo contrario, pienso que será un gran avance”.

En este capítulo se presenta una breve descripción de este gran avance.

CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS INDUCIDOS

Hemos visto en el curso anterior que un flujo magnético variable que atraviesa una espira, produce en ella una fuerza electromotriz inducida, la cual genera una corriente eléctrica en la misma.

Dicho en otros términos: la variación de un campo magnético de inducción \vec{B} a través de una espira, produce un campo eléctrico de intensidad \vec{E} en los distintos puntos de la espira, el cual ejercerá fuerzas sobre las cargas libres, provocando una corriente eléctrica.

Si no tenemos en cuenta las espiras con corrientes y pensamos solo en función de campos, podemos expresarlo de esta forma:

Un campo magnético variable en el tiempo, produce un campo eléctrico.

Ley de Faraday



Supongamos que por un conductor rectilíneo circula una corriente, en su entorno aparecerá un campo magnético según lo visto al estudiar la Ley de Ampere. Pero he aquí que este conductor tenga conectado en serie un capacitor plano. Mientras se carga el capacitor, por los conductores circula corriente, aunque en el capacitor no hay corriente circulando entre las placas; allí existe un campo eléctrico variable.

Si pensamos que el mismo efecto se produce a lo largo de todo el conductor, concluimos, en que un campo eléctrico variable debe producir los mismos efectos que una corriente eléctrica en un conductor, esto es: tiene que generar en su entorno un campo magnético. Por lo tanto esta conclusión la podemos enunciar de la siguiente forma:

Un campo eléctrico variable en el tiempo produce un campo magnético

Ley de Ampere-Maxwell

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Cuando se estudiaron los campos eléctricos y magnéticos desde un punto de vista estático, estaba totalmente ausente la interrelación entre ellos, aparecían independientes el uno del otro. Pero para los campos variables aparece una formidable relación entre ambos. Entonces cada variación del campo magnético genera un campo eléctrico, y cada variación de un campo eléctrico genera uno magnético. Cuando varían no pueden existir aislados, están conectados entre sí y forman lo que se denomina **Campo Electromagnético**.

Cuando en una región del espacio se produce la oscilación de un campo electromagnético, la oscilación no queda allí, sino que se propaga por el espacio en forma de **Onda Electromagnética**, que es una asociación de un campo eléctrico y otro magnético, que oscilan y se regeneran entre sí, donde cada uno es origen del otro, resultando mutuamente causa y efecto.

Las ondas electromagnéticas transmiten energía y momento lineal de una región a otra del espacio, y presentan tres propiedades importantes que son:

- a) La regeneración mutua – esto indica por ejemplo que, al existir un campo magnético oscilante, este da origen a un campo eléctrico oscilante, y este a su vez a un campo magnético oscilante. Resulta entonces que, en la onda electromagnética los campos eléctricos y magnéticos no pueden existir aislados, sino que están acoplados mutuamente y forman un conjunto concatenado.
- b) La perpendicularidad – esto expresa que un campo magnético variable produce un campo eléctrico perpendicular a la dirección de la variación del campo magnético y viceversa.
- c) La velocidad de propagación “c” en el vacío o espacio libre es invariable.

Además, Maxwell encontró que la velocidad de la luz en el espacio libre se relacionaba con las propiedades electromagnéticas de la siguiente forma:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (1)$$

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

FÍSICA

donde: $\epsilon_0 = 8,85418 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m}$ Permitividad eléctrica del vacío

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A \cdot m}$ Permeabilidad magnética del vacío

Sustituyendo estos valores en la expresión anterior se obtiene:

$$c = 2,99792 \times 10^8 \frac{m}{s} \quad \text{que es la velocidad de la luz en el vacío.}$$

Este descubrimiento reveló que la óptica es una rama del electromagnetismo

ONDAS PLANAS

Por ejemplo, cuando la luz parte de un punto del Sol, se irradia en todas direcciones y se propaga como una onda esférica. Parte de esta onda llega a la Tierra, donde podemos observarla en nuestros laboratorios. Al estar limitados por el tamaño de nuestro laboratorio podemos observar solo una parte muy pequeña de toda la onda esférica.

Así como el océano parece chato a una persona que puede observar unos pocos kilómetros del mismo, las ondas esféricas parecen planas si se puede observar solo una parte muy reducida de ellas.

Con las ondas de radio la situación es mas o menos la misma. Desde la antena transmisora, la onda es irradiada en todas direcciones; pero desde el punto de vista de la antena receptora, cualquier onda transmitida desde una estación a distancia de algunos kilómetros es prácticamente una onda plana.

Sabemos que la onda electromagnética plana está formada por un campo eléctrico y un campo magnético, perpendiculares entre si, pero también perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, esta propiedad indica que la onda electromagnética es una onda transversal.

La onda plana que estamos describiendo tiene las siguientes propiedades. Viaja en la dirección X (la dirección de propagación), el campo eléctrico \vec{E} está en la dirección Y y el campo magnético \vec{B} en la dirección Z, como muestra la figura (1).

Las ondas en las cuales los campos eléctricos y magnéticos están restringidos a ser paralelos a

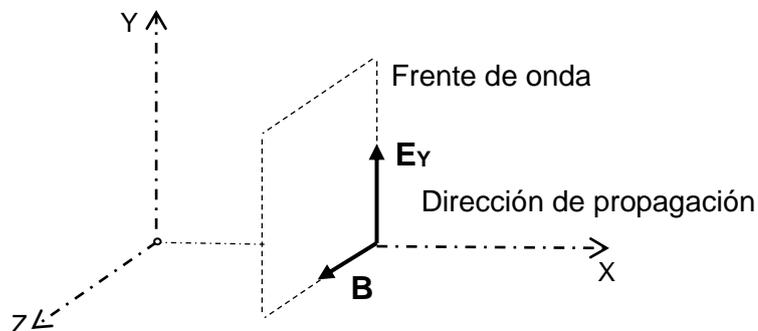


Fig. (1)



ciertas líneas en el plano YZ, se dice que son ondas polarizadas linealmente. Asimismo, suponemos que E y B en cualquier punto dependen solo de la posición y del tiempo ($X;t$).

En una onda electromagnética plana, las magnitudes del campo eléctrico y del campo magnético están relacionadas por la expresión:

$$\boxed{E_y = c \cdot B_z} \quad (2)$$

Vimos en el capítulo anterior que la ecuación general de las ondas está dada por la siguiente ecuación diferencial:

$$\boxed{\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial X^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2}} \quad (3)$$

donde ε es una función de la posición y del tiempo.

Al tratarse de ondas electromagnéticas en el espacio libre, propagándose con una velocidad "c" dada por la ecuación (1), las ecuaciones de las ondas electromagnéticas en el espacio libre adoptan las formas siguientes:

$$\boxed{\frac{\partial^2 E}{\partial X^2} = \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}} \quad (4)$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 B}{\partial X^2} = \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}} \quad (5)$$

La función de onda plana más simple que soluciona las ecuaciones (4) y (5) es una onda senoidal, para la cual las amplitudes de campo E y B varían con la posición y el tiempo de acuerdo con las expresiones:

$$\boxed{E = E_{max} \cdot \text{sen}(\omega t - kx) \quad y \quad B = B_{max} \cdot \text{sen}(\omega t - kx)} \quad (6)$$

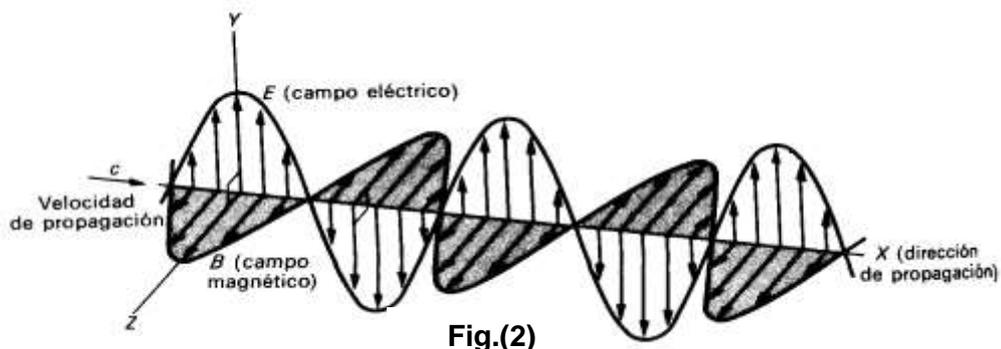
E_{max} y B_{max} son los valores máximos de los campos eléctricos y magnéticos respectivamente.

La constante $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, donde λ es la longitud de onda, y la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$, donde

f es el número de ciclos por segundos. La razón $\frac{\omega}{k}$ es igual a la velocidad "c", puesto que:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \lambda \cdot f = c \quad (7)$$

En una onda electromagnética plana y armónica (representada por ondas senoidales), los campos eléctricos y magnéticos oscilan en fase (los valores máximos y mínimos de sus intensidades tienen lugar en el mismo punto), sus velocidades son iguales y sus amplitudes son directamente proporcionales (siendo c el factor de proporcionalidad). Pero además los campos son mutuamente perpendiculares y para hacer esto evidente, hemos representado el campo eléctrico (\vec{E}_y) en el plano XY y el campo magnético (\vec{B}) en el plano XZ, como ilustra la figura (2).



TIPOS DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas electromagnéticas se clasifican en intervalos de frecuencias o longitudes de ondas en un mismo espectro. Estas están relacionadas inversamente, $\lambda = \frac{c}{f}$; mientras mayor sea la frecuencia, más corta será la longitud de onda, y viceversa.

El espectro electromagnético es continuo, de modo que los límites de los diversos intervalos son aproximados. En el cuadro siguiente se listan las frecuencias e intervalos de longitud de onda para los tipos generales de ondas electromagnéticas (Ver también la figura (4)).

Tipo de onda	Intervalo aprox. de frecuencia (Hz)	Intervalo aprox. de longitud de onda. (m)	Origen
Ondas de energía	60	5×10^6	Corrientes eléctricas
Ondas de radio AM	$0,53 - 1,7 \times 10^6$	570 - 186	Circuitos eléctricos
Ondas de radio FM	$88 - 108 \times 10^6$	3,4 - 2,8	Circuitos eléctricos
Ondas de TV	$54 - 890 \times 10^6$	5,6 - 0,34	Circuitos eléctricos
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	Tubos de vacío especiales
Radiación infrarroja	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-7}$	Cuerpos calientes y muy calientes
Luz visible	$4,0 - 7,0 \times 10^{14}$	$4,0 - 7,0 \times 10^{-7}$	Sol y lámparas
Radiación ultravioleta	$10^{14} - 10^{17}$	$10^{-7} - 10^{-10}$	Cuerpos muy calientes y lámparas especiales
Rayos X	$10^{17} - 10^{19}$	$10^{-10} - 10^{-12}$	Colisiones electrónicas
Rayos gamma	Más de 10^{19}	Menos de 10^{-12}	Reacciones nucleares y procesos en aceleradores de partículas

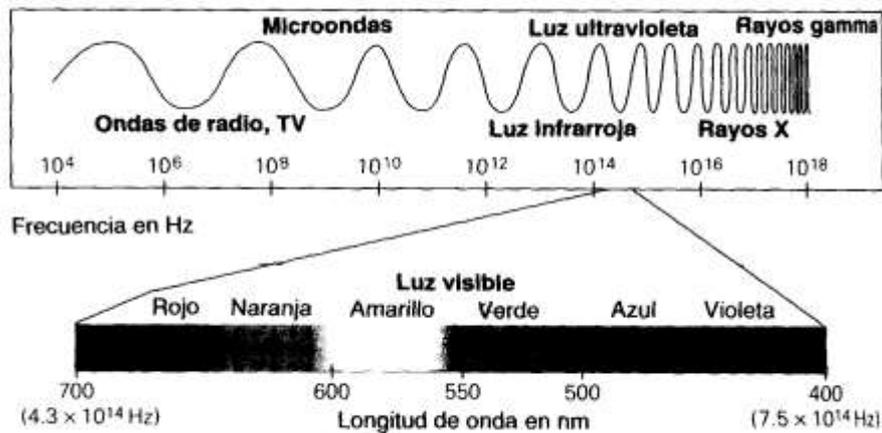


Fig. (3)

Ondas de Energía

Las ondas electromagnéticas de frecuencia de 60 ciclos son resultado de las corrientes que se mueven hacia atrás y hacia delante (alternas) en los circuitos eléctricos. Las ondas de tan baja frecuencia son de poco uso práctico.

Se sospecha que estas ondas causan efectos dañinos sobre la salud. Algunas investigaciones parecen sugerir que los campos de frecuencia muy baja pueden tener, potencialmente, efectos biológicos perjudiciales para las células y los tejidos. Las personas que viven cerca de las líneas de energía están expuestas continuamente a la frecuencia de la radiación de energía, de modo que este es un asunto importante. Hasta el momento, es un tema muy controvertido y se necesita hacer mucho trabajo antes de llegar a lograr alguna conclusión firme.

Ondas de Radio y TV

Las primeras comunicaciones globales emplearon las bandas de “onda corta”, así como los operadores de radio aficionados lo hacen ahora. Pero, ¿cómo se transmiten alrededor de la curvatura de la Tierra las ondas de radio que normalmente siguen una línea recta? Esto se logra mediante la reflexión en las capas iónicas de la atmósfera superior. Las partículas energéticas provenientes del Sol ionizan las moléculas de gas, originando varias capas de iones. Algunas de estas capas reflejan las ondas de radio menores a ciertas frecuencias. Si “fortalecemos” las ondas de radio fuera de estas capas, es posible enviar transmisiones de radio más allá del horizonte, a cualquier región de la Tierra.

Para evitar este problema, las comunicaciones globales descansan en gran medida en los cables transoceánicos. Ahora también tenemos satélites de comunicaciones, que pueden proporcionar transmisiones de líneas de visión a cualquier parte del globo.

Microondas

Las microondas son producidas por tubos especiales evacuados (llamados klystrones y megatrones). Las microondas se utilizan en las comunicaciones y en las aplicaciones de radar.

Además de sus muchos roles en la navegación y la orientación, el radar proporciona la base para las pistolas de rapidez usadas para medir el tiempo de los servicios de tenis y los automóviles. Cuando las ondas de radar son reflejadas por un objeto en movimiento, su longitud de onda es modificada por el efecto Doppler. La magnitud de esta modificación indica la velocidad del objeto hacia el instrumento o alejándose de él. Otro uso muy común de las microondas es el horno de microondas.

Radiación Infrarroja

La región infrarroja del espectro electromagnético queda en el extremo de baja frecuencia o de ondas de longitud grande del espectro visible.

La frecuencia a la cual un cuerpo caliente emite radiación depende de su temperatura. En realidad ese cuerpo emite ondas electromagnéticas de muchas frecuencias diferentes, pero la frecuencia de la intensidad máxima caracteriza la radiación. Un cuerpo con una temperatura cercana a la ambiente emite radiación en la región infrarroja lejana (la más alejada de la radiación visible).

La radiación infrarroja es absorbida fácilmente por algunos materiales que contienen moléculas de agua, produciendo un incremento en su temperatura, debido a que su movimiento molecular es incrementado.

Las lámparas infrarrojas se utilizan en aplicaciones terapéuticas y para conservar calientes los alimentos en las cafeterías. La radiación infrarroja está asociada también con el mantenimiento de la temperatura promedio o cálida de la Tierra a través del efecto de invernadero.

Luz Visible

La región visible ocupa una porción muy pequeña del espectro electromagnético total, aproximadamente un intervalo de longitud de onda de 700 a 400 nm respectivamente; figura (4). Solo la radiación de esta región puede activar los receptores de nuestros ojos. La luz visible emitida o reflejada en los objetos que nos rodean nos proporciona mucha información acerca de nuestro mundo.

Es interesante hacer notar que no todos los animales son sensibles al mismo intervalo de longitudes de onda. Por ejemplo, las serpientes pueden detectar radiación infrarroja, y el límite visible para muchos insectos se extiende bastante adentro del ultravioleta.

Luz Ultravioleta

Más allá del extremo violeta de la región visible queda el límite de la frecuencia ultravioleta. La radiación ultravioleta (o UV) es producida por lámparas especiales y cuerpos muy calientes. El Sol emite grandes cantidades de radiación ultravioleta, pero por fortuna la mayor parte de la recibida por la tierra es absorbida en la capa de Ozono (O_3) de la atmósfera a una altitud de unos 40 a 50 km. Debido a que la capa de ozono desempeña un papel protector, existe gran interés en evitar su disminución a causa de los gases clorofluorocarbonados (por ejemplo el Freón, que se utiliza en la refrigeración) que son impulsados hacia arriba y reaccionan con el ozono.

La pequeña cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra proveniente del Sol puede causar bronceado o quemaduras en la piel humana. La pigmentación de la piel



actúa como un mecanismo de protección contra la penetración de la radiación ultravioleta. El grado de penetración depende de la cantidad del pigmento denominado melanina en la piel y del espesor de la capa de piel. Las personas (con excepción de los albinos) tienen cantidades variables de melanina en la piel. La exposición a la luz solar induce la producción de más melanina, causando que la piel se broncee. Una sobreexposición, en especial al comienzo, puede causar quemaduras de la piel, que se enrojecerá (quemaduras de sol). Al curarse, la capa externa de la piel se hace más gruesa, y ofrece mayor protección. También se dispone de cremas y lociones que contienen las llamadas pantallas solares para conservar la piel libre de las quemaduras de sol. Las moléculas de las sustancias de estas preparaciones absorben parte de la radiación ultravioleta antes de que llegue a la piel. Ahora los doctores recomiendan a las personas, que en especial aquellas de piel muy blancas, que contienen poca melanina protectora, que usen pantallas solares efectivas o eviten la luz solar demasiado brillante, pues la exposición a los rayos UV generalmente incrementa el riesgo de cáncer de piel.

La exposición a la luz solar es necesaria para la producción natural de vitamina D a partir de compuestos de la piel. Esta vitamina es indispensable para huesos y dientes fuertes. En latitudes del norte, en donde la exposición a la luz solar es relativamente estacional, se necesitan dietas complementadas con vitamina D sintética. Usted habrá notado que en la leche se suministra este complemento de vitamina D.

La mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por ciertas moléculas del vidrio ordinario. Por consiguiente, usted no puede obtener un bronceado o una quemadura solar a través del vidrio de una ventana. Ahora los lentes para sol están marcados para iniciar los estándares de protección UV que proporcionan para proteger los ojos de esta radiación potencialmente peligrosa. Los soldadores usan anteojos de vidrio especial o máscaras faciales para protegerse los ojos de las grandes cantidades de radiación ultravioleta producidas por los arcos en los sopletes para soldadura. En forma similar, es importante proteger los ojos cuando se utiliza una lámpara solar. El componente ultravioleta de la luz solar reflejada de las superficies cubiertas de nieve puede producir ceguera en ojos no protegidos.

Las “luces negras”, que se emplean en las discotecas, emiten radiación en el violeta y cerca del ultravioleta. La radiación ultravioleta hace que las pinturas y pigmentos fluorescentes de los signos, carteles y la ropa de los artistas brillen con colores vivos. La fluorescencia es el proceso por el cual una sustancia absorbe radiación ultravioleta y emite radiación visible. En las lámparas fluorescentes, un vapor de mercurio excitado eléctricamente emite radiación ultravioleta. El material blanco que recubre el interior del tubo absorbe la radiación ultravioleta y emite luz visible.

Rayos X

Más allá de la región ultravioleta del espectro electromagnético está la región de los importantes rayos X. Nosotros estamos familiarizados con los rayos X, en particular con sus aplicaciones médicas. Los rayos X fueron descubiertos accidentalmente en 1895 por el físico alemán Wilhelm Roentgen (1845-1923), quien observó el brillo de un pedazo de papel fluorescente a causa de una misteriosa radiación (como era desconocida, se refirió a ella como X) que provenía de un tubo de rayos catódicos.

Como usted aprenderá más tarde, la energía de la radiación electromagnética depende de su frecuencia. Los rayos X de alta frecuencia tienen niveles elevados de energía y pueden ocasionar cáncer, quemaduras de la piel y otros efectos perjudiciales. Sin embargo, a intensidades bajas, los rayos X se pueden emplear con relativa seguridad para observar la estructura interna del cuerpo humano y otros objetos opacos. Los rayos X pueden pasar a través de materiales que son opacos a otros tipos de radiación. Mientras más denso sea el material,

mayor será su absorción de rayos X y será menos intensa la radiación transmitida. Por ejemplo al pasar los rayos X a través del cuerpo humano, gran parte de ellos son absorbidos por los huesos más que por otros tejidos. Si la radiación transmitida se dirige a una placa o una película fotográfica, las áreas expuestas muestran variaciones en intensidad que forman una imagen de las estructuras internas.

La combinación de la computadora con los aparatos modernos de rayos X permite la formación de imágenes tridimensionales por medio de una técnica que recibe el nombre de "Tomografía Computarizada", o CT.

Rayos Gamma

Las ondas electromagnéticas del intervalo superior de frecuencias del espectro electromagnético conocido se llaman rayos gamma (rayos γ). Esta radiación de frecuencia elevada es producida en las radiaciones nucleares y los aceleradores de partículas.

RAYOS Y SUPERFICIES DE ONDA

En la figura (4) vemos que podemos dibujar una serie de líneas L, L', L'', \dots perpendiculares a las superficies de ondas S, S', S'', \dots . Estas líneas se conocen como **rayos** y corresponden a las direcciones de propagación de la energía y el momento que transporta la onda. A los puntos sobre las distintas superficies de onda unidos por un mismo rayo, a, a', a'', \dots o b, b', b'', \dots se los denomina **puntos correspondientes**.

El tiempo que tarda la onda para ir de la superficie S a la S'' debe ser el mismo a lo largo de cualquier rayo. Por lo tanto las distancias aa'', bb'', cc'', \dots , deben depender de la velocidad del movimiento ondulatorio en cada punto.

En un medio homogéneo e isótropo, en el que la velocidad es la misma en todos los puntos y todas las direcciones, la separación entre dos superficies de onda debe ser la misma para todos los puntos correspondientes.

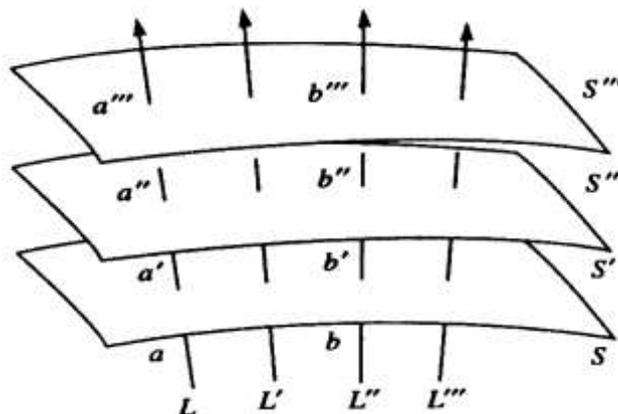


Fig. (4)

Otro hecho importante es que:

En un medio homogéneo e isótropo, los rayos son líneas rectas,

debido a que la simetría requiere que no haya razón para que los rayos se desvíen en una dirección o la otra.



REFLEXION Y REFRACCION DE ONDAS PLANAS

Consideremos una onda plana que se propaga en el medio (1) en la dirección del vector

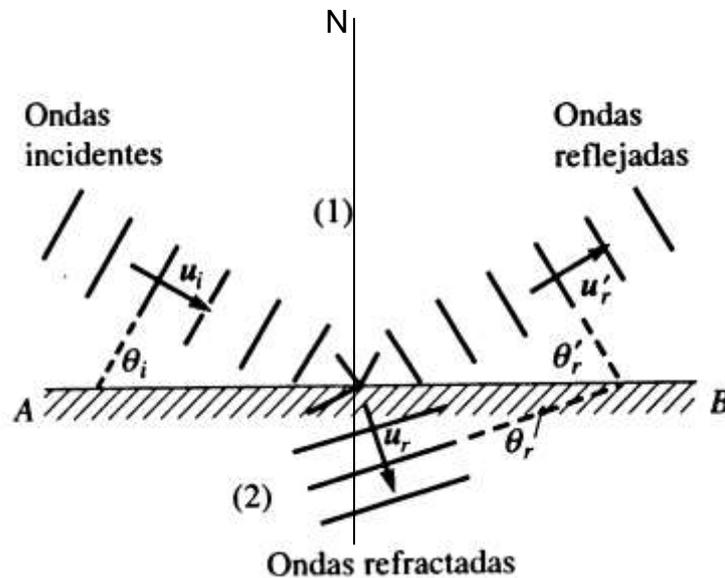


Fig. (5)

unitario \vec{u}_i (Fig. 5). La experiencia indica que, cuando la onda alcanza la superficie plana AB que separa al medio (1) del (2), se transmite una onda al medio (2) y otra es reflejada en el medio (1). Estas son las ondas **refractadas y reflejadas** respectivamente. Cuando la dirección de incidencia no es perpendicular a la superficie AB, la observación muestra que las ondas refractadas se propagan en la dirección indicada por el vector unitario \vec{u}_r , que es distinto de \vec{u}_i y las ondas reflejadas se propagan en la dirección indicada por \vec{u}_r' que es simétrico a \vec{u}_i con respecto a la normal a la superficie AB.

Los ángulos θ_i (ángulo de incidencia), θ_r (ángulo de refracción) y θ_r' (ángulo de reflexión) están relacionados mediante las siguientes leyes comprobadas experimentalmente:

1. Las direcciones de incidencia, refracción y reflexión se encuentran en un mismo plano, normal a la superficie de separación y que por tanto, contiene a la normal N a la superficie.
2. El ángulo de incidencia es igual al de reflexión. Esto es:

$$\theta_i = \theta_r' \quad (8)$$

- 3.- Definiendo el índice de refracción absoluto (n) de cualquier medio como:

$$n = \frac{c}{v} \quad (9)$$

donde:

c : velocidad de la luz en el vacío
v : velocidad de la luz en el medio

resulta que el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es constante (**Ley de Snell**).

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (10)$$

n_1 : índice de refracción del medio incidente

n_2 : índice de refracción del medio refringente

A la constante n_{21} se le conoce como **índice de refracción del medio (2) con respecto al medio (1)**.

Su valor numérico depende de la naturaleza de la onda y de las propiedades de los dos medios.

Estas leyes son válidas aún cuando las ondas y la superficie de separación no sean planas, debido a que en cada punto existe una sección limitada de la superficie que se puede considerar como plana y las direcciones de propagación en ese punto se comportan según las ecuaciones (8) y (10).

Analizaremos a continuación algunos casos puntuales:

I.- Cuando $n_{21} > 1$, es por que $n_2 > n_1$ y $\text{sen } \theta_i > \text{sen } \theta_r$; por lo tanto resulta:

$$\theta_i > \theta_r \quad (11)$$

Lo que indica que la dirección refractada está más próxima a la normal que la dirección incidente (Figura 6)

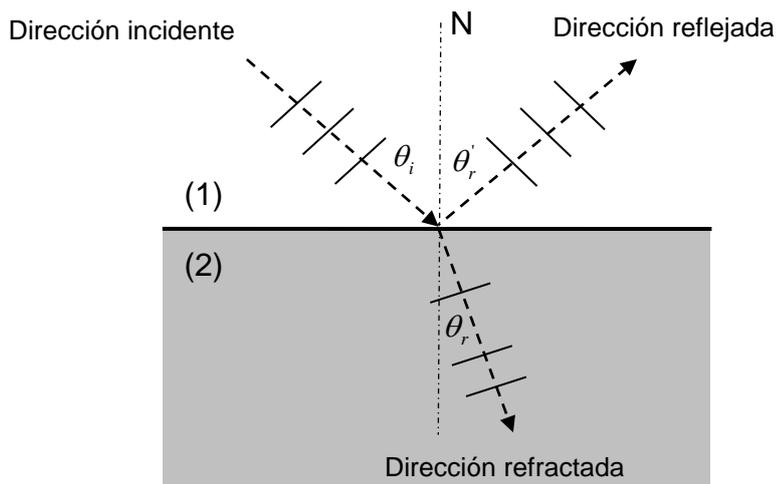


Fig. (6)



II.- Cuando $n_{21} < 1$, es por que $n_2 < n_1$ y $\text{sen } \theta_i < \text{sen } \theta_r$; por lo tanto resulta:

$$\boxed{\theta_i < \theta_r} \quad (12)$$

Lo que indica que la dirección refractada está más alejada de la normal que la incidente (Figura 7).

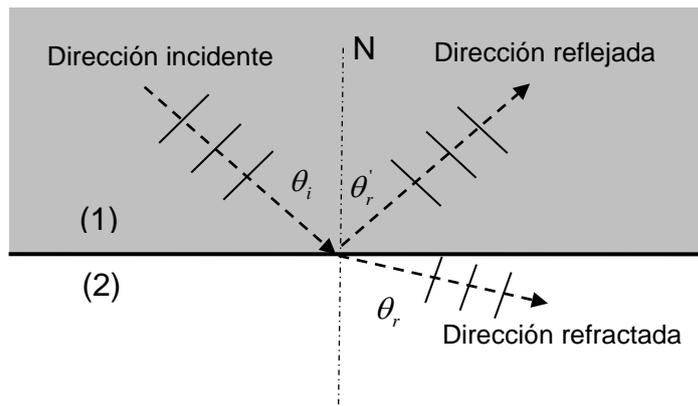


Fig. (7)

III.- Cuando $n_{21} < 1$ y $\theta_r = 90^\circ$, lo que indica que la dirección emergente es paralela a la superficie (Figura 8), implica que:

$$\text{sen } \theta_i = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

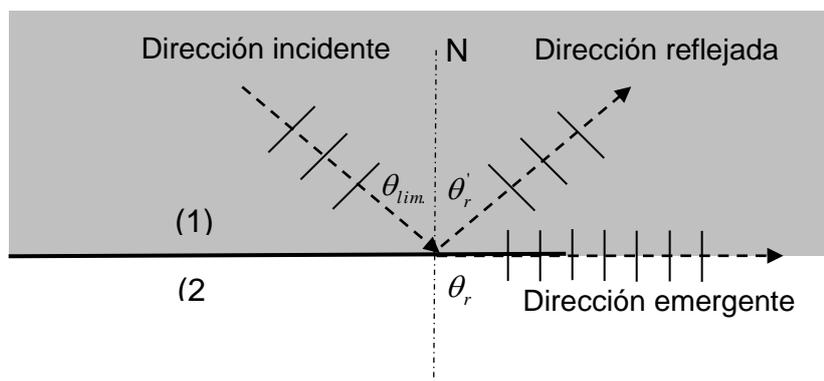


Fig. (8)

Bajo estas condiciones θ_i se conoce como **ángulo límite** y se designa θ_{lim} ; por consiguiente resulta:

$$\boxed{\text{sen } \theta_{lim} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}} \quad (13)$$

IV.- Cuando $n_{21} < 1$ y $\theta_i > \theta_{lim}$; resulta: $\text{sen } \theta_i > \text{sen } \theta_{lim} = \frac{n_2}{n_1}$, por lo tanto $\text{sen } \theta_i > \frac{n_2}{n_1}$

Para que se cumpla esta relación y teniendo en cuenta que: $\text{sen } \theta_i = \frac{n_2}{n_1} \text{sen } \theta_r$; debiera ser $\text{sen } \theta_r > 1$; lo cual es imposible.

Por lo tanto, cuando $n_2 < 1$ y el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, no hay onda refractada, solo reflejada. Decimos entonces que hay una **reflexión total** (Figura (9)).

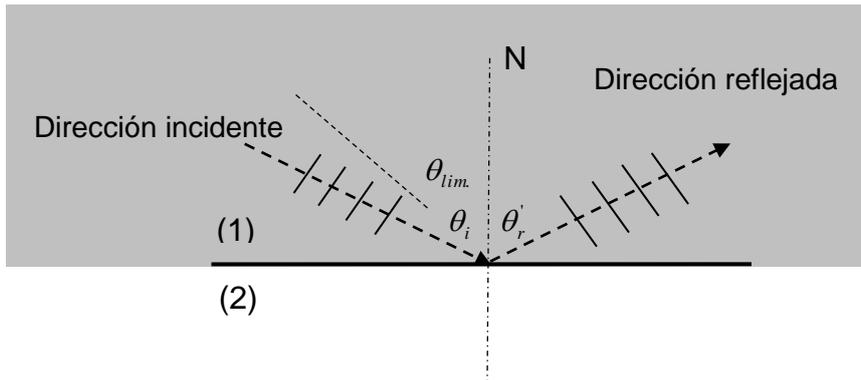


Fig. (9)

Esta situación se puede producir, por ejemplo, cuando la luz pasa del agua o del vidrio al aire.

La reflexión total tiene varias aplicaciones en el diseño de instrumentos ópticos, pero quizá la más importante es en la transmisión de señales en fibras ópticas.

DISPERSIÓN

Cuando una onda es refractada hacia un medio cuyo índice de refracción depende de la frecuencia o longitud de onda (medio dispersivo); el ángulo de refracción dependerá también de la frecuencia o de la longitud de onda.

Si la onda incidente en lugar de ser monocromática (una sola longitud de onda), está compuesta de varias frecuencias o longitudes de onda, cada longitud de onda componente será refractada un ángulo distinto, fenómeno este llamado **dispersión**.

En la Figura (10), se muestran, en el caso particular de las ondas electromagnéticas, los índices de refracción de algunos materiales en función de la longitud de onda en la región visible del espectro.

Recordemos que los colores están asociados con longitudes de ondas. Por tanto, la luz blanca se descompone en colores cuando es refractada al pasar del aire a otra sustancia, como agua o vidrio.

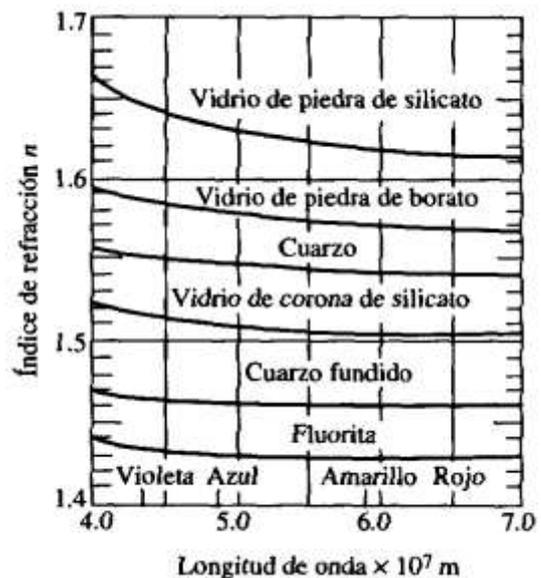


Fig. (10)



Si una pieza de vidrio tiene la forma de una placa con lados paralelos, las direcciones emergentes son paralelas, los diferentes colores se superponen de nuevo y no se observa dispersión alguna (Figura (11)).

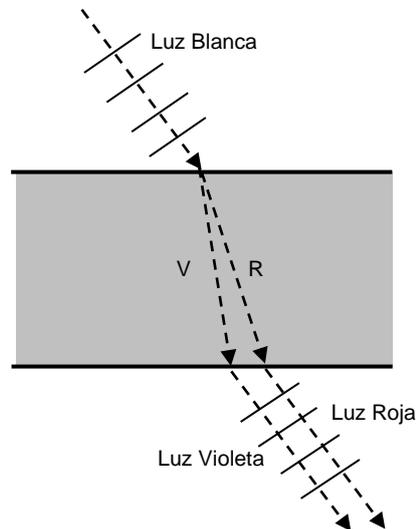


Fig. (11)

Pero si la luz pasa por un prisma (Figura 12) las direcciones emergentes no son paralelas para los diferentes colores y la dispersión se puede observar fácilmente.

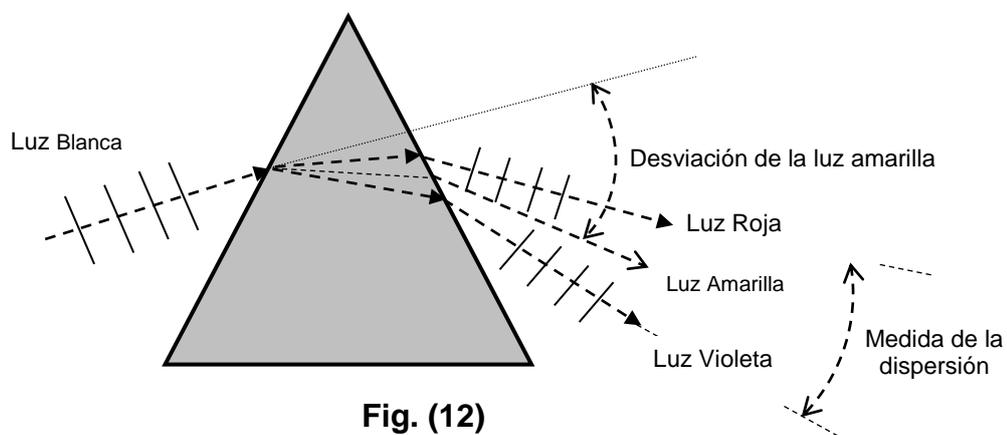


Fig. (12)

Puesto que la desviación producida por el prisma aumenta al aumentar el índice de refracción, la luz violeta es la más desviada y la luz roja, la menos; ocupando los demás colores, posiciones intermedias. Al salir del prisma, la luz se extiende en un haz en forma de abanico. Se dice que la luz se dispersa formando un **espectro**. En la figura (12) puede verse que cuando la luz blanca es dispersada por un prisma, todo el haz es desviado de la dirección incidente.

Una medida cómoda de esta desviación la proporciona el ángulo de desviación de la luz amarilla, puesto que el amarillo equidista aproximadamente del rojo y del violeta. Una medida sencilla de la dispersión la proporciona el ángulo formado por los rayos rojo y violeta.

Los prismas se utilizan para el análisis de la luz en los **espectroscopios**; instrumentos estos utilizados para el estudio de los espectros.

Problema

Determina los ángulos de refracción para la luz de $\lambda_1 = 400\text{nm}$ y $\lambda_2 = 700\text{nm}$ que incide sobre vidrio Flint de silicato con un ángulo de 45°

INTERFERENCIA DE ONDAS LUMINOSAS

En capítulos anteriores hemos visto, que dos ondas pueden sumarse constructiva o destructivamente. En la interferencia constructiva, la amplitud de la onda resultante es mayor que la de cualquiera de las ondas individuales. Las ondas luminosas también interfieren entre sí. Fundamentalmente toda interferencia asociada a ondas luminosas surge cuando se combinan los campos electromagnéticos que constituyen las ondas individuales.

Para observar interferencia sostenida en ondas luminosas, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- Las fuentes deben ser **coherentes**, es decir, deben mantener una fase constante entre sí.
- Las fuentes deben ser **monocromáticas**, es decir, de una sola longitud de onda.
- Debe aplicarse el principio de superposición.

FUENTES COHERENTES

Describiremos ahora las características de las fuentes coherentes. Como vimos cuando estudiamos las ondas mecánicas, se necesitan dos fuentes (que producen dos ondas viajeras) para crear interferencia. Con el fin de producir un patrón de interferencia estable, las ondas individuales deben mantener una relación de fase constante entre sí. Cuando este es el caso, se dice que las fuentes son coherentes. Por ejemplo, las ondas emitidas por dos altavoces uno frente a otro excitados por un solo amplificador pueden interferir entre ellos debido a que los dos son **coherentes**, es decir, responden al amplificador de la misma manera y al mismo tiempo.

Si dos fuentes luminosas se colocan una al lado de la otra, no se observan efectos de interferencia debido a que las ondas luminosas de una fuente se emiten independientemente de la otra; por lo tanto, las emisiones de las dos fuentes no mantienen una relación de fase constante entre sí durante el tiempo de observación. La luz de una fuente de luz ordinaria experimenta cambios aleatorios por lo menos una vez cada 10^{-8} s. En consecuencia, las condiciones para interferencia constructiva, destructiva o algún estado intermedio dura tiempos del orden de 10^{-8} s. El resultado es que no se observan efectos de interferencia debido a que el ojo no puede seguir estos cambios de corto tiempo. Se dice que dichas fuentes luminosas son **incoherentes**.

Un método común para producir fuentes de luz coherentes es emplear una fuente monocromática para iluminar una pantalla que contiene dos pequeñas aberturas (usualmente en forma de rendijas). La luz que emerge de una de las dos rendijas es coherente debido a que una sola fuente produce el haz luminoso original y las dos rendijas sirven solo para separar el haz original en dos partes (lo cual, después de todo, fue lo que se hizo con la señal sonora de los altavoces de lado a lado). Todo cambio aleatorio en la luz emitida por la fuente ocurrirá en ambos haces al mismo tiempo, y como resultado es posible observar efectos de interferencia.



EXPERIMENTO DE LA DOBLE RENDIJA DE YOUNG

La interferencia en ondas luminosas de dos fuentes fue demostrada por primera vez por Thomas Young en 1801. Un diagrama esquemático del aparato que utilizó en este experimento se muestra en la figura (13). Incide luz sobre una pantalla, en la cual hay una estrecha rendija S_0 . Las ondas que emergen de esta rendija llegan a una segunda pantalla, que contiene dos rendijas estrechas y paralelas, S_1 y S_2 . Estas dos rendijas sirven como un par de fuentes de luz coherente debido a que las ondas que emergen de ellas se originan del mismo frente de onda y, en consecuencia, mantienen una relación de fase constante.

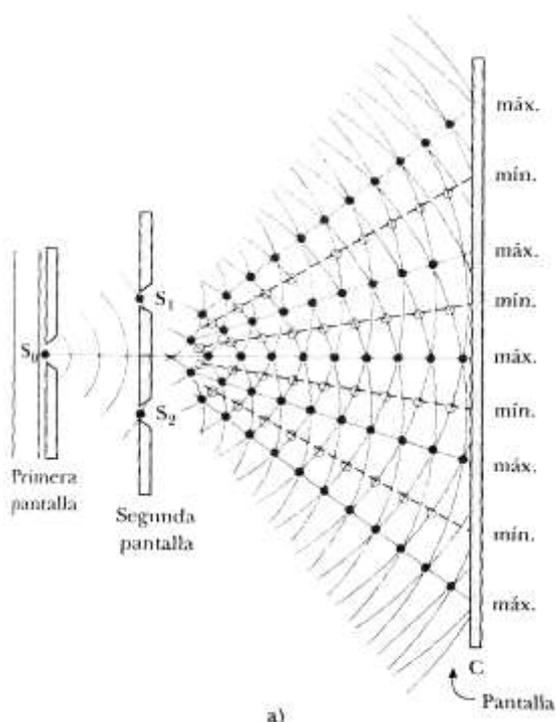


Fig. (13)

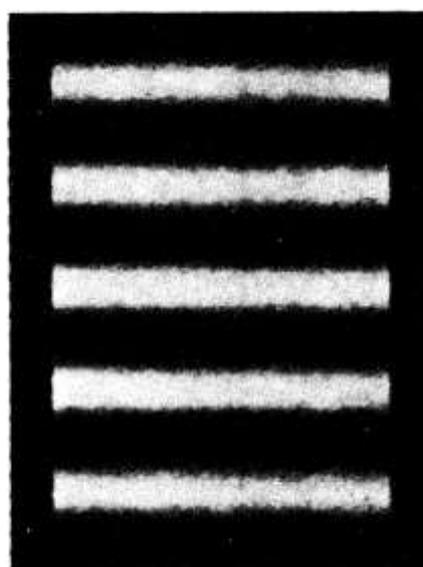


Fig. (14)

La luz de las dos rendijas produce sobre la pantalla C un patrón visible de bandas paralelas brillantes y oscuras denominadas **franjas**. Cuando la luz de S_1 y la de S_2 llegan a un punto sobre la pantalla C en forma tal que ocurra interferencia constructiva en ese punto, aparece una línea brillante. Cuando la luz de las dos rendijas se combina destructivamente en cualquier punto sobre la pantalla, se produce una línea oscura (Figura 14).

La figura (15) es un diagrama esquemático de algunas de las maneras en que dos ondas pueden combinarse en la pantalla. En la figura (15-a), las dos ondas, que salen en fase de las dos rendijas incide sobre la pantalla en el punto central P. Puesto que estas ondas viajan igual distancia, llegan a P en fase, y como resultado, hay interferencia constructiva en ese punto y se observa un área brillante. En la figura (15-b), las dos ondas luminosas también empiezan en fase, pero ahora la onda superior tiene que recorrer una longitud de onda más que la onda inferior para alcanzar el punto Q sobre la pantalla. Puesto que la onda superior cae detrás de la inferior exactamente una longitud de onda, las dos llegan en fase a Q y por ello aparece una segunda luz brillante en este punto.

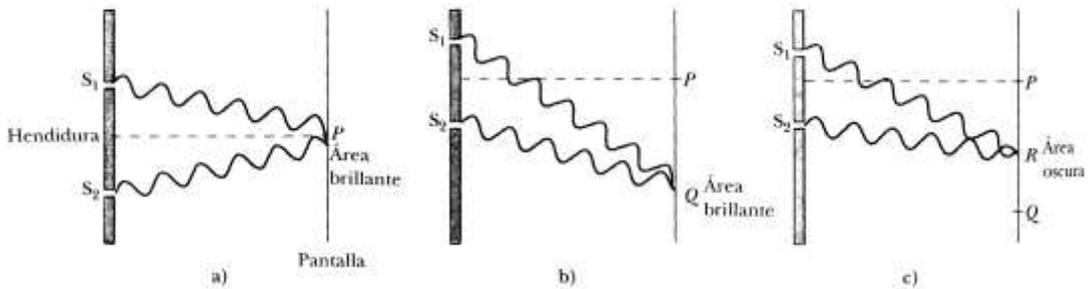


Fig. (15)

Considere ahora el punto R, a la mitad entre P y Q en la figura (15-c). En esta posición, la onda superior, ha caído la mitad de una longitud de onda detrás de la onda inferior. Esto significa que el valle de la onda inferior se superpone con la cresta de la onda superior, y da origen a interferencia destructiva en R. Por esta razón se observa una región oscura en ese punto.

Podemos describir el experimento de Young cuantitativamente con la ayuda de la figura (16). La pantalla se localiza a una distancia perpendicular L de la pantalla que contiene las rendijas S_1 y S_2 , las cuales se encuentran separadas por una distancia d y la fuente es monocromática. En estas condiciones, las ondas que emergen de S_1 y S_2 tienen la misma frecuencia y amplitud y están en fase. La intensidad luminosa sobre la pantalla en cualquier punto arbitrario P es la resultante de la luz que proviene de ambas rendijas.

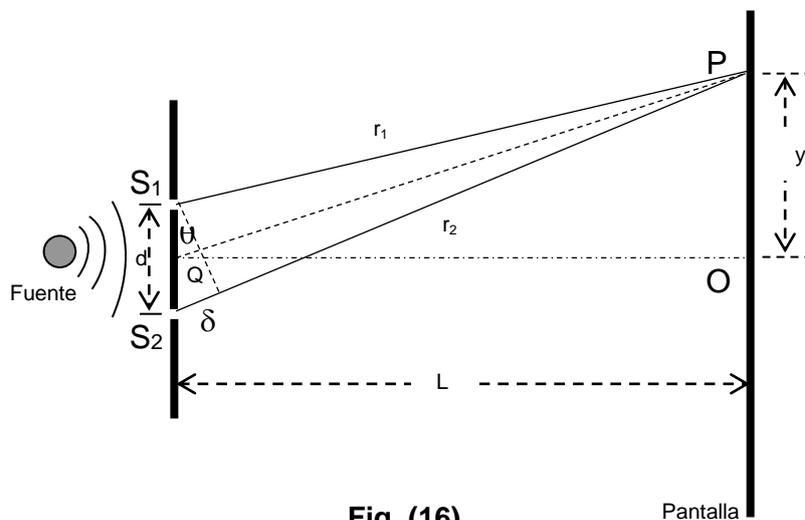


Fig. (16)

Observe que con el fin de llegar a P, una onda de la rendija inferior viaja más lejos que una onda de la rendija superior una distancia igual a $d \sen \theta$. Esta distancia se denomina **diferencia de trayectoria**, donde:

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sen \theta$$

Esta ecuación supone que r_1 y r_2 son paralelas, lo que es aproximadamente cierto puesto que L es mucho más grande que d. El valor de esta diferencia de trayectoria determina si o no las dos ondas están en fase cuando llegan a P. Si la diferencia de trayectorias es cero o algún múltiplo entero de la longitud de onda, las dos ondas están en fase en P y se produce interferencia



constructiva. Por lo tanto la condición para franjas brillantes, o **interferencia constructiva**, en P es:

$$\delta = d \operatorname{sen} \theta = m\lambda \quad m = (0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (14)$$

El número m recibe el nombre de número de orden. De esta forma resulta:

La banda brillante central en $\theta = 0$ ($m = 0$), recibe el nombre de **máximo de orden cero**.

El primer máximo a un lado u otro, cuando $m = \pm 1$, se denomina **máximo de primer orden**, y así sucesivamente.

Cuando la diferencia de trayectorias es un múltiplo impar de $\frac{\lambda}{2}$, las dos ondas que llegan a P están a 180° fuera de fase y dan origen a interferencia destructiva. Por lo tanto, la condición para franjas oscuras o **interferencia destructiva** es:

$$\delta = d \operatorname{sen} \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (15)$$

Es útil obtener expresiones para las posiciones de franjas brillantes y oscuras medidas verticalmente de O a P. Además de nuestra suposición de que $L \gg d$, suponemos que $d \gg \lambda$. Esta situación prevalece en la práctica debido a que con frecuencia L es del orden de 1 m en tanto que d es una fracción de 1 mm y λ es una fracción de un micrómetro para la luz visible. En estas condiciones, θ es pequeño, por lo que podemos emplear la aproximación $\operatorname{sen} \theta \approx \tan \theta$. En la figura (17), del triángulo OPQ vemos que:

$$\operatorname{sen} \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L} \quad (16)$$

Con este resultado más la ecuación (14), vemos que las posiciones de las franjas brillantes medidas desde O están dadas por:

$$y_{\text{brillantes}} = \frac{\lambda L}{d} m \quad (17)$$

De manera similar, con las ecuaciones (15) y (16) encontramos que las franjas oscuras se localizan en:

$$y_{\text{oscuras}} = \frac{\lambda L}{d} \left(m + \frac{1}{2}\right) \quad (18)$$

El experimento de la doble rendija de Young brinda un método para medir la longitud de onda de la luz. De hecho, Young utilizó esta técnica para hacer exactamente eso. Además, el experimento dio una gran credibilidad al modelo ondulatorio de la luz.

DISTRIBUCION DE INTENSIDADES

Calcularemos a continuación la distribución de la intensidad luminosa correspondiente al patrón de interferencia de la doble rendija.

Las dos rendijas se comportan como fuentes coherentes de ondas sinusoidales; por lo tanto tienen la misma frecuencia y una diferencia de fase constante ϕ

La intensidad de campo eléctrico resultante en el punto P sobre la pantalla (Fig. 17) es la superposición vectorial de las dos ondas.

La intensidad de campo eléctrico en el punto P debido a cada una de las ondas puede ser escrita de la siguiente forma:

$$E_1 = E_0 \text{ sen } \omega t \quad (19)$$

$$E_2 = E_0 \text{ sen}(\omega t + \phi)$$

La diferencia de fase ϕ en P depende de la diferencia de trayectorias $\delta = r_2 - r_1 = d \text{ sen } \theta$

Aplicando el principio de superposición podemos obtener el campo eléctrico resultante en P:

$$E_p = E_1 + E_2 = E_0 [\text{sen } \omega t + \text{sen}(\omega t + \phi)] \quad (20)$$

Utilizando la identidad trigonométrica: $\text{sen } A + \text{sen } B = 2 \text{ sen} \left(\frac{A+B}{2} \right) \cos \left(\frac{A-B}{2} \right)$

resulta:

$$E_p = E_0 \left[2 \text{ sen} \frac{\omega t + \omega t + \phi}{2} \cos \frac{\omega t - \omega t - \phi}{2} \right]$$

$$E_p = E_0 \left[2 \text{ sen} \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right) \cos \left(-\frac{\phi}{2} \right) \right]$$

$$\boxed{E_p = 2E_0 \cos \frac{\phi}{2} \text{ sen} \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right)} \quad (21)$$

De la ecuación (21) deducimos que el campo eléctrico resultante en P tiene la misma frecuencia que la luz en las rendijas, pero E_p oscila con una amplitud igual a $2E_0 \cos \frac{\phi}{2}$

Obsérvese que si:

$\phi = 0 ; 2\pi ; 4\pi ; \dots$	Amplitud en P es igual $2E_0$	Interferencia Constructiva
$\phi = \pi ; 3\pi ; 5\pi ; \dots$	Amplitud en P es igual a 0	Interferencia Destructiva

Recordemos que la Intensidad de una onda es proporcional a su amplitud elevada al cuadrado.

De esta forma, si I_0 es la intensidad en P debida a la luz de una sola de las rendijas (con la otra tapada), tendremos que:

$$I_0 \propto E_0^2 \quad \Longrightarrow \quad I_0 = k E_0^2$$



Según la ecuación (21) la amplitud de la onda resultante es $2E_0 \cos \frac{\phi}{2}$, por lo tanto la intensidad I_p debida a la luz de ambas rendijas es:

$$I_p \propto 4E_0^2 \cos^2 \frac{\phi}{2} \quad \Longrightarrow \quad I_p = k 4E_0^2 \cos^2 \frac{\phi}{2}$$

Combinando estas dos expresiones resulta:

$$\boxed{I_p = 4I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2}} \quad (22)$$

Ecuación esta que nos da la intensidad para la doble rendija, en el punto P en función de ϕ .

Hemos visto que la diferencia de fase ϕ en P, depende de la diferencia de los caminos recorridos por las ondas desde las rendijas hasta el punto P ; $\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$

Por lo tanto:

$$\text{Si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta = m\lambda \\ \phi = m 2\pi \text{ rad} \end{array} \right. \quad \text{Interferencia Constructiva}$$

$$\text{Si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \\ \phi = \left(m + \frac{1}{2}\right)2\pi \text{ rad} \end{array} \right. \quad \text{Interferencia destructiva}$$

Dividiendo miembro a miembro, obtenemos:

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

$$\boxed{\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta} \quad (23)$$

Sustituyendo la ecuación (23) en la (22), resulta:

$$\boxed{I_p = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right)} \quad (24)$$

Puesto que $\sin \theta \approx \frac{y}{L}$ para pequeños valores de θ , podemos escribir la ecuación (24) de la siguiente forma:

$$\boxed{I_p \approx 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda L} y \right)} \quad (25)$$

Verifiquemos que estas expresiones estén de acuerdo con las ecuaciones (14) y (15).

Sustituyendo la ecuación (14) en la (24), obtenemos:

$$I_p = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} m\lambda\right) = 4I_0 \cos^2(m\pi); \quad (m = 0; 1; 2; 3; \dots) \quad \text{Interferencia Constructiva}$$

Como $\cos^2(m\pi) = 1$; resulta: $I_p = 4I_0$

Sustituyendo la ecuación (15) en la (24) obtenemos:

$$I_p = 4I_0 \cos^2\left[\frac{\pi}{\lambda}\left(m \pm \frac{1}{2}\right)\lambda\right]; \quad (m = 0; 1; 2; 3; \dots) \quad \text{Interferencia Destructiva}$$

Como $\cos^2\left[\pi\left(m \pm \frac{1}{2}\right)\right] = 0$; resulta: $I_p = 0$

Efectivamente la ecuación (24) proporciona las posiciones de las franjas oscuras y brillantes que están de acuerdo con las ecuaciones (14) y (15).

La figura (17) , muestra una gráfica de la distribución de la intensidad luminosa sobre la pantalla.

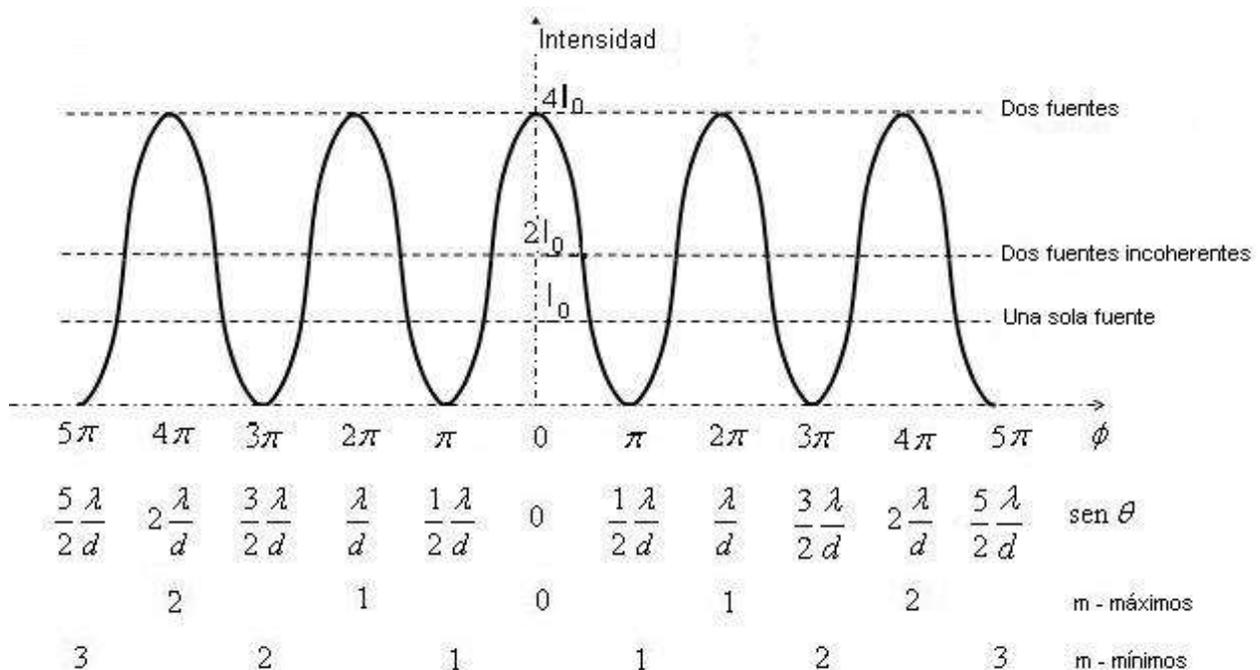


Fig. (17)

Obsérvese que el patrón de interferencia se compone de franjas igualmente espaciadas de la misma intensidad. Este resultado solo es válido si la distancia rendijas pantalla L es grande con respecto a la separación de las rendijas y solo para valores pequeños de θ .

Para destacar la diferencia entre fuentes coherentes e incoherentes, consideremos nuevamente la expresión (22).

$$I_p = 4I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2}$$



Haciendo uso de la identidad trigonométrica: $2 \cos^2 \frac{\phi}{2} = 1 + \cos \phi$; resulta:

$$I_p = 2I_0(1 + \cos \phi)$$

$$I_p = 2I_0 + 2I_0 \cos \phi$$

(Para fuentes coherentes)

Si la luz de las rendijas se originase en fuentes distintas, estas serían fuentes incoherentes y la diferencia de fase ϕ en cada punto de la pantalla variaría rápida y aleatoriamente con el tiempo.

En este caso el segundo término tendría un promedio temporal cero en cada punto de la pantalla y la intensidad sería:

$$I_p = 2I_0$$

(Para fuentes incoherentes)

Esto es, la intensidad sería simplemente la suma de las intensidades de las dos fuentes actuando solas.

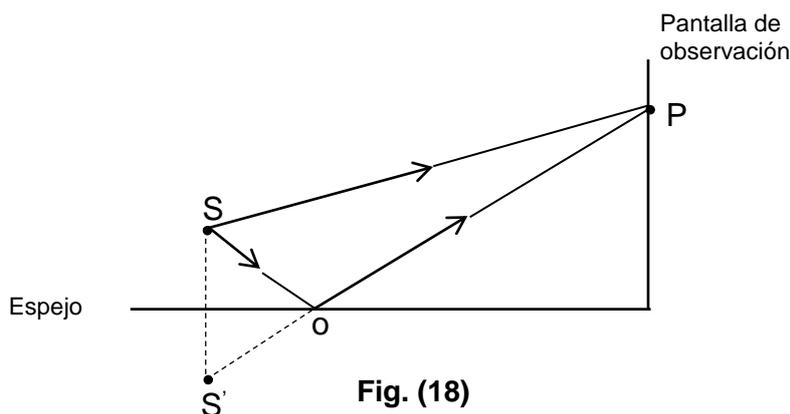
Al encontrar la intensidad debida a la combinación de ondas de **fuentes coherentes**, sumábamos las amplitudes de los campos eléctricos y elevábamos al cuadrado el campo resultante, obteniendo así un **diagrama de interferencia estable**.

Para encontrar la intensidad debida a la combinación de ondas de **fuentes incoherentes**, primero elevamos al cuadrado las amplitudes de los campos eléctricos, para determinar la intensidad de cada fuente, y luego sumamos estas intensidades, de forma que los efectos combinados de las ondas de fuentes incoherentes producen un **diagrama de interferencias que no es estable**.

CAMBIO DE FASE DEBIDO A LA REFLEXION

Hemos visto que la iluminación de un par de rendijas con una sola fuente produce dos fuentes de luz coherentes (experiencia de Young).

Otro método para producir un patrón de interferencia partiendo de una sola fuente luminosa es el espejo de Lloyd's (Figura 18). Dicha figura muestra un espejo y una pantalla de observación perpendiculares entre si. S representa una fuente luminosa próxima al espejo.



P es un punto de la pantalla alcanzado por las ondas electromagnéticas ya sea por trayectoria directa SP o a través de la previa reflexión en el espejo SOP. A la onda reflejada puede considerársela como proveniente de una fuente virtual S'. Se observa sobre la pantalla un patrón de interferencia debido a ondas que provienen de S y S' respectivamente. Sin embargo las posiciones de las franjas oscuras y brillantes se invierte en relación con el patrón de interferencia

logrado con las dos fuentes coherentes reales de la experiencia de Young. Esto se debe a que las fuentes S y S' difieren en fase 180° ; cambio este producido por la reflexión.

Una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° cuando se refleja en un medio de mayor índice de refracción que el del medio en el que la onda está viajando. No ocurre esto cuando la reflexión se produce en un medio de índice de refracción menor. Tampoco experimenta cambio de fase la porción de la onda electromagnética que se refracta en cualquiera de los dos casos antes mencionados.

INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS

Es común observar efectos de interferencia en películas delgadas, de aceite en agua y pompas de jabón.

Cuando la luz blanca incide sobre estas películas se observan diversos colores, los cuales son el resultado de la interferencia de las ondas reflejadas en las dos superficies de la película.

Consideremos una película de espesor uniforme t e índice de refracción n , como en la figura (19).

Supongamos que las ondas luminosas que viajan en el aire lo hacen casi perpendicularmente a las dos superficies de la película (Para mayor claridad dicho ángulo de incidencia se ha exagerado en la figura).

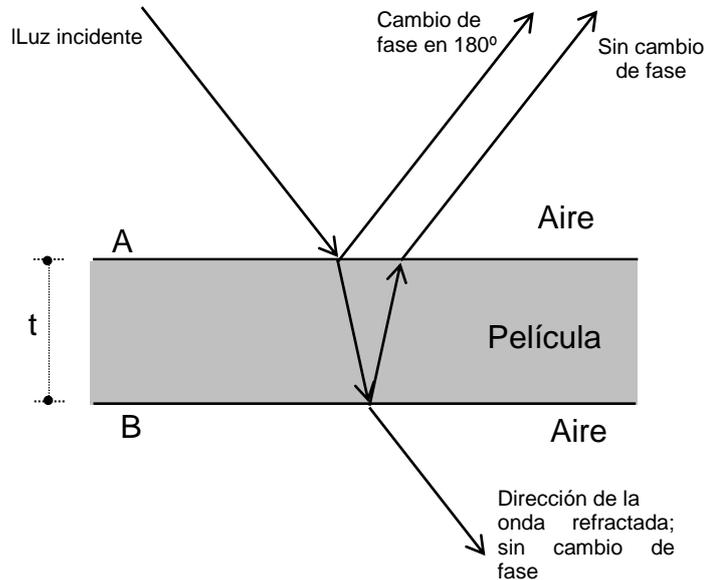


Fig. (19)

A los efectos de determinar si las ondas reflejadas intervienen constructiva o destructivamente, recordemos:

- Una onda que viaja de un medio de índice de refracción n_1 hacia un medio de índice de refracción n_2 experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión cuando n_2 es mayor que n_1 .



- El índice de refracción de cualquier medio fue definido de acuerdo con la ecuación (9) como:

$$n = \frac{c}{v} ; \text{ por lo tanto considerando la ecuación (7) podemos escribir: } n = \frac{c}{v_n} = \frac{\lambda f}{\lambda_n f} = \frac{\lambda}{\lambda_n} \text{ es}$$

decir $n = \frac{\lambda}{\lambda_n}$, donde:

λ : Longitud de onda de la luz en el espacio libre.

λ_n : Longitud de onda de la luz en el medio de índice n.

Por lo tanto la longitud de onda de la luz en un medio cuyo índice de refracción es n, resulta:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (26)$$

Ahora apliquemos estas reglas a la película de la figura (19).

La onda que se refleja en la superficie superior A, experimenta un cambio de fase de 180° con respecto a la onda incidente, y la onda que se refleja en la superficie inferior B, si bien no experimenta cambio de fase en la reflexión, viaja una distancia extra $2t$ antes de que las ondas se recombinen.

Por lo tanto, tomando en cuenta los dos factores: a) La diferencia en la longitud de la trayectoria óptica para las dos ondas y b) el cambio de fase de 180° en la reflexión, resulta:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad (m = 0; 1; 2; 3....) \quad \text{Interferencia Constructiva} \quad (27)$$

$$2t = m\lambda_n \quad (m = 0; 1; 2; 3....) \quad \text{Interferencia Destructiva} \quad (28)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (26) podemos escribir las condiciones (27) y (28) de la siguiente forma:

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0; 1; 2; 3....) \quad \text{Interferencia Constructiva} \quad (29)$$

$$2nt = m\lambda \quad (m = 0; 1; 2; 3....) \quad \text{Interferencia Destructiva} \quad (30)$$

Obsérvese que las condiciones anteriores de interferencia constructiva y destructiva son válidas cuando el medio sobre la superficie de la película es el mismo que el medio debajo de la superficie inferior.

A título de ejercitación puede usted plantearse situaciones similares, modificando los índices de refracción de los medios que intervienen y analizando casos de interferencia con luz reflejada y con luz transmitida.

DIFRACCION

La difracción es un fenómeno característico del movimiento ondulatorio que se presenta cuando una onda es distorsionada por un obstáculo. Este puede ser una pantalla con una pequeña abertura, una ranura que solo permite el paso de una pequeña fracción de la onda incidente o un objeto pequeño, como un cable o un disco, que bloquea el paso de una pequeña parte del frente de onda.

Por ejemplo, sabemos por nuestra experiencia diaria, en especial para el caso de las ondas sonoras y las ondas en la superficie del agua, que las ondas se extienden alrededor de los obstáculos que se interponen en su camino. Este efecto se hace cada vez más notorio a medida que las dimensiones de las ranuras o de los obstáculos se aproximan a la longitud de onda de las ondas.

Consideraremos sólo la difracción que se presenta cuando las ondas incidentes son planas, de manera que los rayos son paralelos, y observaremos el patrón a una distancia lo bastante grande para que solo se reciban los rayos difractados paralelamente. Este fenómeno se conoce con el nombre de **difracción de Fraunhofer** (Joseph von Fraunhofer: 1787-1826), quien fue uno de los primeros en estudiar el fenómeno.

PRINCIPIO DE HUYGENS

El principio de Huygens (contemporáneo de Newton), establece que la propagación de una onda luminosa puede determinarse suponiendo que en cada punto del frente de onda, surge un nuevo frente de ondas esféricas centradas en dicho punto.

En 1680 aproximadamente, Christiaan Huygens (1629-1695) propuso un procedimiento geométrico para trazar la propagación de ondas.

Según Huygens, cuando el movimiento ondulatorio llega a la superficie de onda S (Figura 20), cada punto a, b, c, \dots de la superficie se convierte en una fuente secundaria que emite **ondas secundarias** (indicadas por los semicírculos pequeños), que llegan a la siguiente capa de puntos. Estos puntos son alcanzados por la perturbación, formando la siguiente superficie de onda S' , que es tangente a las ondas secundarias. El proceso se repite y así se produce la propagación de la onda.

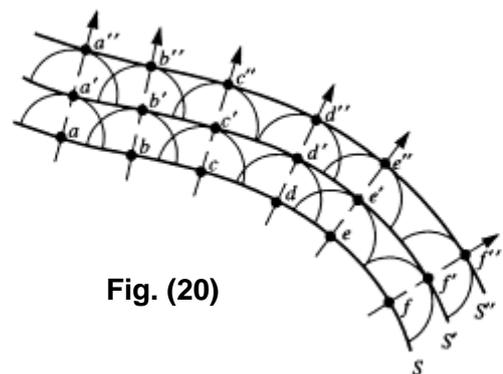


Fig. (20)

DIFRACCION DE FRAUNHOFER PRODUCIDA POR UNA RANURA RECTANGULAR

En esta sección discutiremos el diagrama de difracción debido a la luz que pasa a través de una

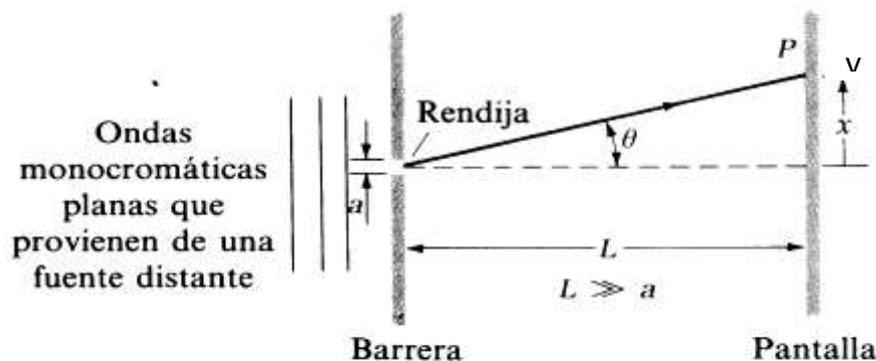


Fig.(21)



rendija estrecha; considerando que la fuente y la pantalla van a estar alejadas de la rendija en comparación con la anchura de esta.

La figura (21) muestra un haz de luz monocromática de longitud de onda λ que incide sobre una rendija de anchura a , de forma que la luz que pasa a través de la rendija coincide luego sobre la pantalla y produce el diagrama de difracción mostrado en la figura (22-a).

La figura (22-b) muestra la distribución de intensidad en función del $\text{sen } \theta$, siendo θ el ángulo que determina el punto en la pantalla. El diagrama de difracción consiste en un máximo brillante central flanqueado por varios máximos secundarios, de forma que la intensidad de estos máximos secundarios disminuye con la distancia al centro del diagrama.

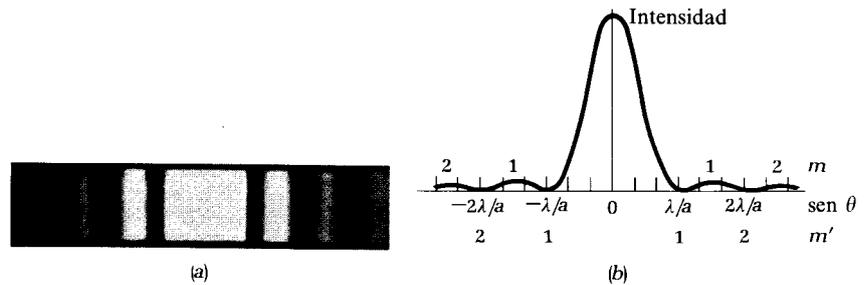


Fig. (22)

Analizaremos el diagrama de difracción mostrado, reemplazando mentalmente la rendija de anchura a , por una serie de rendijas elementales paralelas, cada una de anchura Δx (figura 23). Cuanto más elementales sean las rendijas que imaginemos, menor será su anchura, y más precisas serán nuestras conclusiones.

En la figura, hemos representado 12 rendijas elementales de forma que $\Delta x = \frac{a}{12}$. Como las ondas incidentes en las rendijas son planas, dichas ondas emergen en fase de cada rendija elemental.

La figura (23-a) muestra esquemáticamente las ondas que forman el máximo central.

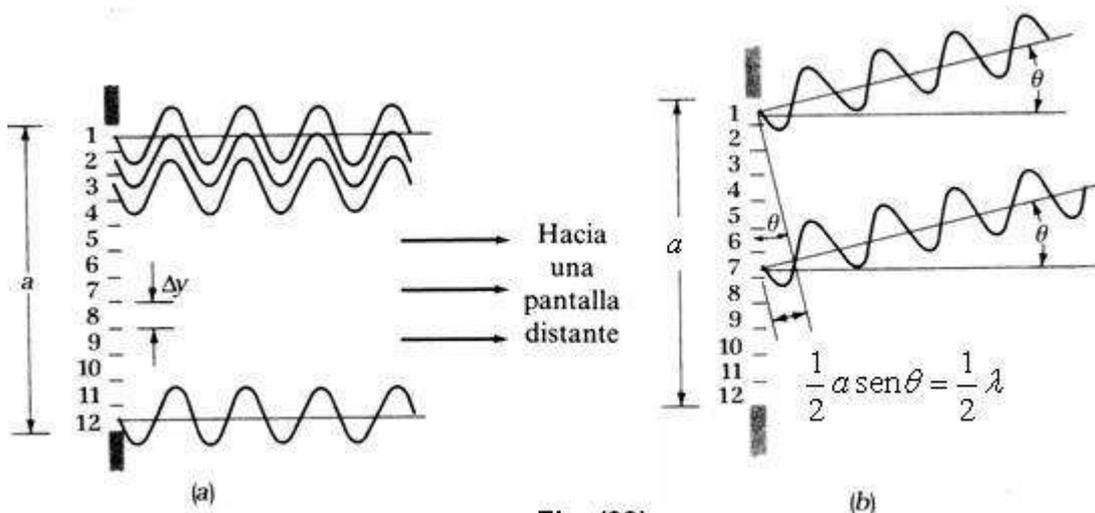


Fig. (23)

Cuando $L \gg a$, las líneas según la dirección de propagación de estas ondas son esencialmente paralelas, y cada onda viaja aproximadamente la misma distancia. Por tanto, llegan al centro de la pantalla en fase, interfieren constructivamente y forman un máximo de intensidad.

La figura (23-b) muestra las ondas que forman uno de los mínimos adyacentes al máximo central. Para llegar a la pantalla, las ondas de la rendija elemental 7 viajan media longitud de onda más que las ondas de la rendija elemental 1; este par de ondas llega a la pantalla con una diferencia de fase $\phi = \pi \text{ rad}$ y consecuentemente, interfieren destructivamente. De igual manera, los pares de ondas de las rendijas elementales 8 y 2, 9 y 3, 10 y 4, 11 y 5, y 12 y 6, llegan a la pantalla con $\phi = \pi \text{ rad}$, interfiriendo también destructivamente, y esto describe el comportamiento de las 12 rendijas elementales.

Así pues, en este punto de la pantalla la intensidad es un mínimo (el primer mínimo).

En la figura (23-b) observamos que el ángulo θ que localiza esta posición en la pantalla viene dado por:

$$\frac{a}{2} \text{sen } \theta = \frac{\lambda}{2} \quad \text{por lo tanto,} \quad \boxed{a \text{sen } \theta = \lambda}$$

La figura (23-c) muestra las ondas que forman el siguiente mínimo.

Hasta llegar a la pantalla, las ondas provenientes de la rendija elemental 4 viajan media longitud de onda más que las ondas que emergen de la rendija elemental 1, de modo que este par llega con una diferencia de fase $\phi = \pi \text{ rad}$ y produce interferencia destructiva. Igualmente los pares de ondas de las rendijas elementales 5 y 2, 6 y 3, 10 y 7, 11 y 8 y 12 y 9 llegan con una diferencia de fase $\phi = \pi \text{ rad}$ e interfieren destructivamente.

En la figura (23-c), observamos que el ángulo correspondiente a este punto de la pantalla viene dado por:

$$\frac{a}{4} \text{sen } \theta = \frac{\lambda}{2} \quad \text{o bien,} \quad \boxed{a \text{sen } \theta = 2\lambda}$$

Repitiendo razonamientos análogos concluimos en que los mínimos de intensidad, aparecen en los ángulos θ dados por:

$$\boxed{a \text{sen } \theta = \pm m\lambda} \quad (m = 1; 2; 3; 4; \dots) \quad (31)$$

(\pm) : indica los sucesivos mínimos a un lado y otro del máximo central

Nótese que $m = 0$ no está incluido, ya que este valor de m corresponde al centro del diagrama, o posición media del máximo central.

Los máximos secundarios mostrados en la figura 22 están situados aproximadamente en el punto medio entre dos mínimos adyacentes. Así pues, los ángulos θ que localizan los máximos secundarios vienen dados por:

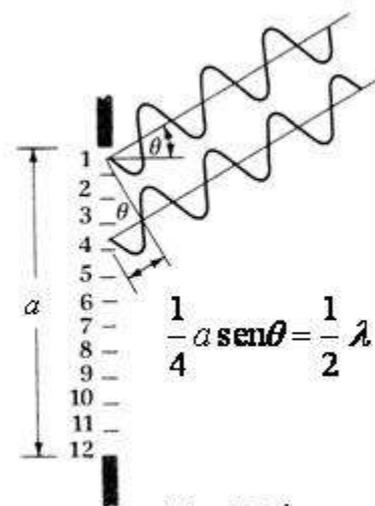


Fig. (23c)



$$a \sin \theta = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (m \approx 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; \dots) \quad (32)$$

Para caracterizar la anchura del diagrama de difracción por una rendija, tomamos la distancia entre los dos mínimos con $m = 1$ (**ancho del máximo central**).

Teniendo en cuenta que $L \gg a$ y $m = 1$, podemos escribir la ecuación (31) de la siguiente forma:

$$a \frac{y}{L} = \pm \lambda \quad \text{o bien} \quad y = \pm \frac{\lambda}{a} L$$

La distancia entre los dos mínimos resulta:

$$\boxed{2 \frac{\lambda}{a} L} \quad \text{Ancho del máximo central}$$

Notemos que el ancho angular del máximo central es el doble que el de los demás

Concluimos en que:

- Para una anchura de rendija fija, la luz de mayor longitud de onda experimenta mayor difracción.
- Para una longitud de onda fija, una rendija más estrecha origina mayor difracción que otra más ancha.

Esto significa que si tratamos de colimar un haz de luz para que ilumine una región mínima de la pantalla, ocurre que cuanto más estrecha hagamos la rendija tanto más se esparce la luz en la región correspondiente a la sombra geométrica de la barrera.

Puede que esto contradiga lo que esperaba, sin embargo, es un fenómeno característico del comportamiento ondulatorio.

DIFRACCION DE FRAUNHOFER PRODUCIDA POR UNA ABERTURA CIRCULAR

Cuándo en una pantalla que tiene una abertura circular inciden perpendicularmente ondas planas, el patrón de difracción consiste en un disco brillante, rodeado por anillos oscuros y brillantes que se alternan.

El radio del disco central y de los anillos sucesivos no sigue una secuencia sencilla. Omitiremos el análisis matemático del problema, que es mucho más complicado que en el caso de una ranura rectangular.

Suponiendo que R es el radio de la abertura (Figura 24), el ángulo correspondiente al primer anillo oscuro está dado por:

$$\boxed{\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{2R}} \quad (33)$$

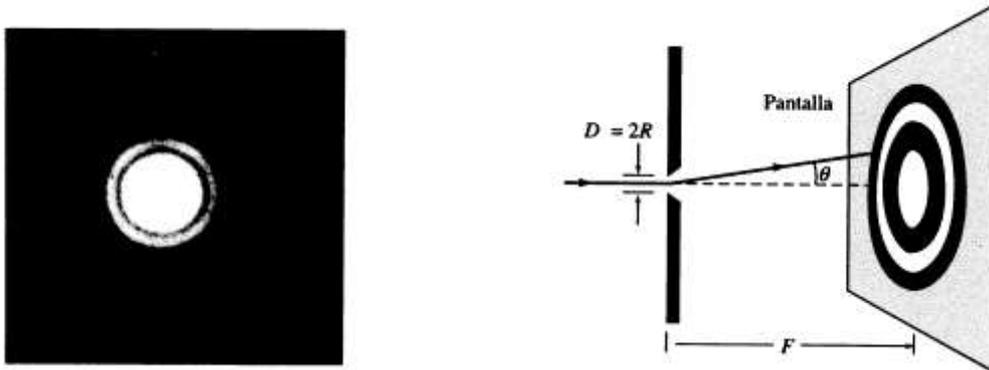


Fig. (24)

Cuando la longitud de onda es mucho menor que R, podemos escribir:

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{2R} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \tag{34}$$

Donde $D = 2R$ es el diámetro de la abertura y θ está expresado en radianes.

Una lente puede considerarse como una abertura circular que limita el frente de onda. Por consiguiente la imagen de un punto, que se supone es otro punto, es en realidad un patrón de difracción. Sin embargo, el radio de una lente en general es tan grande comparado con la longitud de onda de la luz que, en la práctica, se pueden ignorar los efectos de difracción.

DIFRACCION DE FRAUNHOFER PRODUCIDA POR DOS RANURAS PARALELAS IGUALES

Supongamos ahora dos ranuras paralelas, largas y delgadas de anchura a y separadas por una distancia d (Figura 25), tal que $d \gg a$.

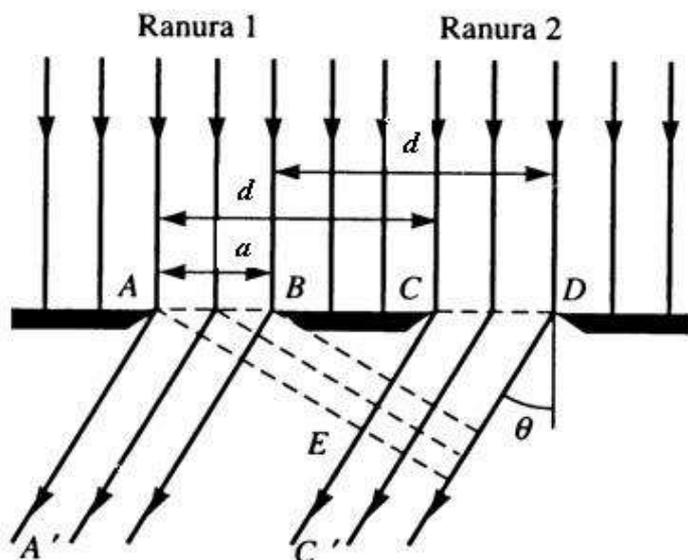


Fig. (25)



A partir de cada una de ellas emerge un frente de onda difractado.

El patrón que observamos es el resultado de la interferencia de tales ondas difractadas.

Es decir, tenemos ahora una combinación de dos fenómenos: **difracción e interferencia**.

Si consideramos que las dos ranuras son idénticas, el patrón de interferencia es el que corresponde a dos fuentes coherentes (Figura 17) con máximos en las direcciones dadas por la ecuación (14); es decir:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad m = (0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots)$$

Por lo tanto los máximos de interferencia están situados en los puntos en que:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d} \quad m = (0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots) \quad \text{Máximos de Interferencia} \quad (35)$$

La distribución de intensidades del patrón de interferencia está modulada por la distribución de intensidades del patrón de difracción de una ranura (Figura 22 b)

Como ya hemos visto, los ceros del patrón de difracción están dados por la ecuación (31), es decir:

$$a \sin \theta = m\lambda \quad m = (\pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots)$$

Obsérvese que $m = 0$ no está incluido, ya que este valor de m corresponde al centro del diagrama, o posición media del máximo central.

Por lo tanto los ceros de difracción se encuentran en las direcciones:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a} \quad m = (\pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots) \quad \text{Ceros de Difracción} \quad (36)$$

La separación angular entre dos máximos de interferencia está dada por:

$$\frac{(m+1)\lambda}{d} - \frac{m\lambda}{d} = \frac{\lambda}{d} \quad \text{Separación angular de los máximos de interferencia}$$

La separación angular entre dos ceros de difracción resulta:

$$\frac{(m+1)\lambda}{a} - \frac{m\lambda}{a} = \frac{\lambda}{a} \quad \text{Separación angular de los ceros de difracción}$$

Como d es mucho mayor que a obtenemos:

$$\frac{\lambda}{a} > \frac{\lambda}{d}$$

por lo tanto:

La separación de los ceros de difracción

ES MAYOR QUE

La separación de los máximos de interferencia

La Figura (26) muestra la distribución de intensidades resultante.

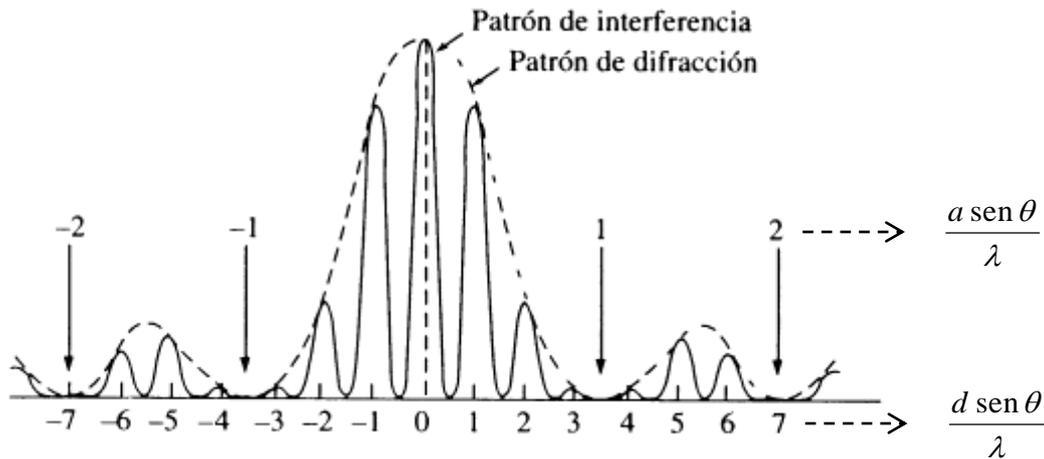


Fig. (26)

Obsérvese que por ser la separación de los ceros de difracción mayor que la separación entre los máximos de interferencia, resulta que las franjas brillantes correspondientes a dos ranuras son mucho más afinadas que las producidas por una sola. La figura (27) muestra la fotografía correspondiente.



Fig. (27)

REDES DE DIFRACCION

La rejilla o red de difracción, un útil dispositivo para analizar fuentes luminosas, se compone de un gran número de rendijas paralelas del mismo ancho a igualmente espaciadas por una distancia d . Una red puede hacerse marcando líneas rectas paralelas sobre una placa de vidrio con una máquina de rayado de precisión.

En una red de transmisión, el espacio entre dos líneas cualesquiera es transparente a la luz y en consecuencia actúa como una rendija individual.



Las redes con muchas líneas muy cercanas entre si pueden tener espaciamentos de rendijas muy pequeños. Por ejemplo, una red rayada con 5000 líneas/cm tiene un espaciamento de rendija

$$d = \frac{1}{5000} \text{ cm} = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}.$$

Consideremos una red de difracción en la cual N sea el número de ranuras y supongamos que sobre ella inciden perpendicularmente ondas planas (Figura 28)

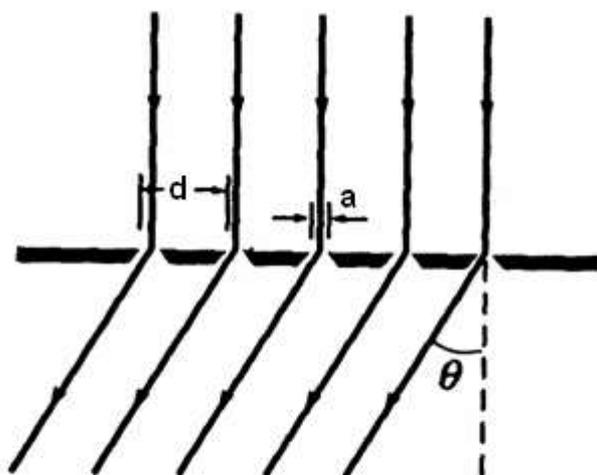


Fig. (28)

De manera parecida al caso de las dos ranuras paralelas, en la dirección correspondiente al ángulo θ , observamos la interferencia producida por las N fuentes, modulada por el patrón de difracción de una ranura.

Si el número de ranuras es grande, el patrón estará formado por una serie de franjas brillantes correspondientes a los máximos del patrón de interferencia, que para incidencia normal, según la ecuación (14) están dados por:

$$\text{sen } \theta = \frac{m\lambda}{d} \quad (m = 0 ; \pm 1 ; \pm 2 ; \pm 3 ; \dots) \quad \text{Máximos de Interferencia} \quad (37)$$

pero sus intensidades están moduladas por el patrón de difracción, cuyos ceros, según la ecuación (31) están dados por:

$$\text{sen } \theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = \pm 1 ; \pm 2 ; \pm 3 ; \dots) \quad \text{Ceros de Difraccion} \quad (38)$$

La expresión (37) puede emplearse para calcular la longitud de onda a partir del conocimiento del espaciamento de la rejilla y del ángulo de desviación.

La figura (29) muestra la distribución de intensidades producida por una rejilla o red de difracción de 8 ranuras (N=8).

De acuerdo con el valor de m, los máximos principales se clasifican como primer orden de difracción, segundo orden, tercer orden, etc.

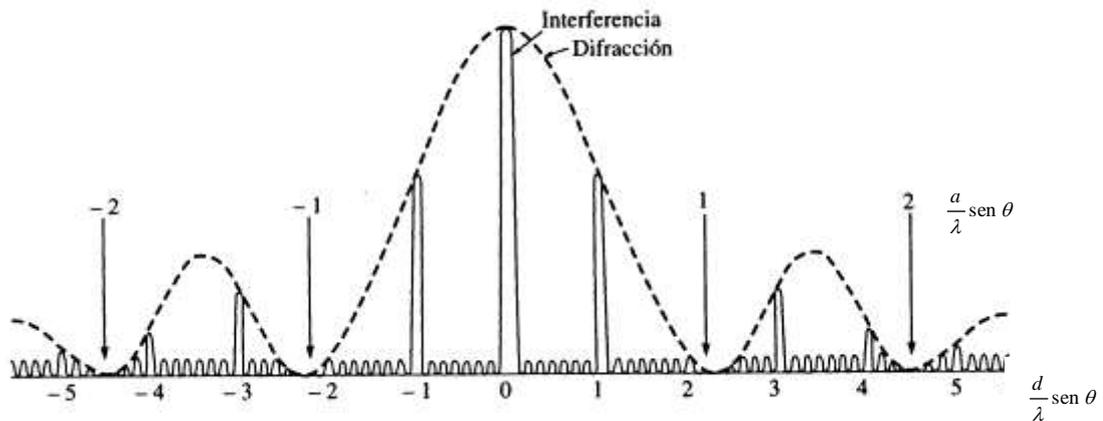


Fig. (29)

Cuando sobre una rejilla de difracción incide luz de varias longitudes de onda, las diferentes longitudes de onda producen máximos de difracción a diferentes ángulos, excepto para el orden cero, que es común para todas.

El conjunto de máximos de un cierto orden para todas las longitudes de onda constituye un **espectro**, de manera que tenemos espectros de primer orden, segundo orden, tercer orden, etc.; y cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor será la desviación para cualquier orden del espectro. Por lo tanto, el rojo se desvía más que el violeta, que es lo opuesto a lo que pasa cuando la luz se dispersa en un prisma.

Una rejilla de difracción puede ser también por reflexión, para lo cual se graban una serie de líneas paralelas sobre una superficie metálica. Los espacios entre las líneas reflejan la luz, produciendo un patrón de **interferencia - difracción**.

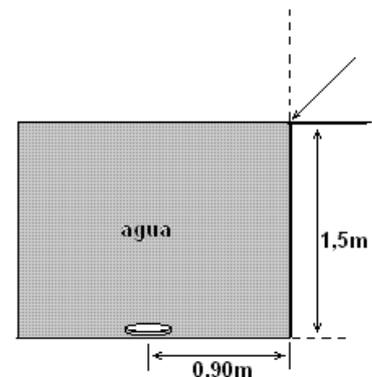
Las rejillas de difracción se pueden utilizar para el análisis de varias regiones del espectro electromagnético y poseen ventajas notables sobre los prismas. Una de ellas es que las rejillas no dependen de las propiedades de dispersión del material, sino solo de su forma geométrica.



PROBLEMAS

- 1) ¿Cuál es la velocidad de la luz (589nm) en el diamante? ($n_d = 2,42$) ($1,24 \cdot 10^8 \text{m/s}$)
- 2) Un láser He-Ne ($\lambda = 632,8 \text{nm}$ en el aire) se dirige hacia el alcohol etílico ($n = 1,36$), ¿cuáles son la longitud de onda y la frecuencia de la luz en el alcohol? ($4,74 \cdot 10^{14} \text{Hz}$, $465,3 \text{nm}$)
- 3) Alguien usa un traje de baño rojo, que refleja luz con longitud de onda $\lambda_a = 629 \text{nm}$ en el aire ($n_a = 1$) principalmente. ¿Cuál es la longitud correspondiente en el agua ($n_{\text{agua}} = 1,33$) ¿cambian de color los trajes de baño bajo el agua? Explica porqué. (473nm)
- 4) Supone que un rayo de luz va por el aire antes de incidir sobre una placa de vidrio de caras paralelas planas ($n_v = 1,5$) con un ángulo de 60° respecto de la normal al punto de incidencia. a) ¿A qué ángulo se transmitirá en el vidrio? b) Demuestra que el rayo sale de la cara inferior, paralelo al rayo incidente. ($\theta = 35^\circ$)

- 5) Una moneda está en el fondo de una piscina, debajo de 1,5m de agua y 0,90m de la pared. Si un rayo de luz incide sobre la superficie del agua en la pared, como indica la figura, ¿con qué ángulo con respecto a la pared debe dirigirse el rayo para que ilumine la moneda? (43°)



- 6) Imagina un rayo de luz que viaja dentro de un bloque de cristal, para el que $n_v = 1,56$. Ahora supone que la luz llega al extremo del bloque, donde la interfase es vidrio-aire. ¿Cuál es el ángulo de incidencia mínimo que hará que la luz sea reflejada de regreso al vidrio? ($39,9^\circ$)
- 7) El vidrio de un prisma tiene un índice de refracción $n_1 = 1,554$ para la luz con una longitud de onda $\lambda_1 = 440 \text{nm}$ y un índice de refracción $n_2 = 1,538$ para la luz con una longitud de onda $\lambda_2 = 650 \text{nm}$. Si un rayo formado por la luz de estas dos longitudes de onda inciden en una de las superficies del prisma con un ángulo de 70° con respecto a la normal a la superficie, ¿cuál es la separación angular de los rayos resultantes en el vidrio? ($0,45^\circ$)
- 8) Una pantalla de observación está a una distancia de 1,2 m de una fuente de doble rendija. La distancia entre las dos rendijas es 0,030 mm. La franja brillante de segundo orden ($m=2$) está a 4,5 cm de la línea central.
 - a) Determine la longitud de onda de la luz (560nm)
 - b) Calcule la distancia entre franjas brillantes adyacentes. ($0,0224 \text{m}$)
- 9) Una fuente luminosa emite luz visible de dos longitudes de onda $\lambda = 430 \text{nm}$ y $\lambda' = 510 \text{nm}$. La fuente se emplea en un experimento de doble rendija en el cual $L = 1,5 \text{m}$ y $d = 0,025 \text{mm}$. Encuentre la separación entre las franjas de tercer orden. ($0,0144 \text{m}$)
- 10) Un par de estrechas rendijas paralelas separadas por 0,25 mm se iluminan con luz verde ($\lambda = 546,1 \text{nm}$). El patrón de interferencia se observa sobre una pantalla a 1,2 m del plano de las rendijas. Calcule la distancia
 - a) del máximo central a la primera región brillante a cada uno de sus lados. ($2,62 \cdot 10^{-3} \text{m}$)
 - b) entre la primera y la segunda bandas oscuras. ($2,62 \cdot 10^{-3} \text{m}$)

11) Un experimento de Young se realiza con luz monocromática. La separación entre las rendijas es 0,50 mm, y el patrón de interferencia sobre una pantalla a 3,3 m muestra el primer máximo a 3,4 mm del centro del patrón ¿Cuál es la longitud de onda? (515nm)

12) Una luz azul de 480 nm llega perpendicularmente a un par de rendijas muy angostas y paralelas, separadas 0,15 mm. En una pantalla, a 2 m de distancia, se forma una figura de franjas. ¿A qué distancia del eje central, y a cada lado de él, se encontrarán las bandas claras de segundo orden? (0,0128m)

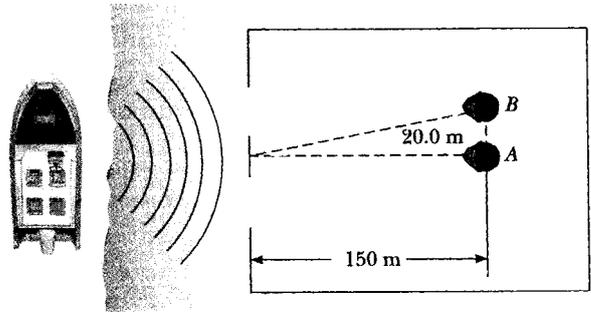
13) En un día en el que la velocidad del sonido es 354 m/s, una onda sonora de 2000 Hz incide sobre dos rendijas separadas 30 cm.

a) ¿A qué ángulo se localiza el primer máximo? (36, 157°)

b) Si la onda sonora se sustituye por microondas de 3 cm, ¿qué separación de rendijas produce el mismo ángulo para el primer máximo? (5,08 cm)

c) Si la separación de rendijas es de $1 \mu\text{m}$, ¿luz de qué frecuencia produce el mismo ángulo del primer máximo? ($508 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$)

14) Un almacén a la orilla del río tiene dos puertas abiertas, como muestra la figura. Un bote en el río hace sonar su bocina. Para la persona A el sonido es intenso y claro. Para la persona B el sonido apenas es audible. La longitud de onda principal de las ondas sonoras es de 3 m. Considere que B está en la posición del primer mínimo y determine la distancia entre las dos puertas. (11,3m)



15) Dos rendijas están separadas por 0,032 mm. Un haz de luz de 500 nm incide sobre ellas y produce un patrón de interferencia. Determine el número de máximos observados en el intervalo angular $-30^\circ < \theta < 30^\circ$. (63)

16) En la figura siguiente considere $L = 120 \text{ cm}$ y $d = 0,25 \text{ cm}$. Las rendijas se iluminan con luz coherente de 600 nm. Calcule la distancia y sobre el máximo central para el cual la intensidad promedio sobre la pantalla es 75% del máximo. ($4,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$)

17) Dos estrechas rendijas paralelas separadas 0,85mm se iluminan con luz de 600nm, y una pantalla de observación se encuentra a 2,80m de las rendijas. a) ¿Cuál es la diferencia de fase entre las dos ondas que interfieren sobre la pantalla en un punto a 2,5mm de la franja brillante central? b) ¿Cuál es la proporción entre la intensidad en este punto y la intensidad en el centro de la franja brillante? (a) $7,95 \text{ rad}$, b) $0,453$)

18) Calcule el espesor mínimo de la película de una burbuja de jabón ($n = 1,33$) que origina interferencia constructiva en la luz reflejada si la película se ilumina con luz cuya longitud de onda en el espacio libre es 600 nm. (112,78 nm)

19) Una película delgada de alcohol etílico ($n = 1,36$) se reparte en una placa de vidrio y se contempla directamente desde arriba, a medida que el líquido se va evaporando. En cierto momento, un punto de la película parece rojo brillante ($\lambda_0 = 700 \text{ nm}$), ¿cuál es el espesor mínimo del alcohol en ese momento? Sugerencia: compare el índice de refracción de la película con el de los medios a cada uno de sus lados, ¿hay un desplazamiento de fase debido a reflexiones interna y externa? (257nm)



- 20) Una película delgada de aguarrás ($n= 1,36$) cubre una placa de vidrio flint de lantano ($n= 1,80$). ¿Cuál es el espesor mínimo que debe tener la película para que aparezca verde ($\lambda_0 = 560$ nm) al ser vista desde arriba con luz blanca? ($206nm$)
- 21) Una celda solar de silicio ($n= 3,5$) se recubre con una película delgada de monóxido de silicio ($n= 1,45$) con el propósito de minimizar las pérdidas reflectivas en la superficie. Determine el espesor mínimo de película que produce la menor reflexión a una longitud de onda de 552 nm, la cual se encuentra en el centro del espectro visible. ($95,17nm$)
- 22) Una delgada película de aceite ($n =1,25$) cubre un pavimento húmedo y liso. Cuando se observa en dirección perpendicular al pavimento, la película aparece predominantemente roja (640 nm) y no hay color azul (512 nm). ¿Cuál es su espesor? ($512nm$)
- 23) Luz de un laser He-Ne ($\lambda= 632,8$ nm) incide sobre una rendija. ¿Cuál es el ancho mínimo para el cual no se observarán mínimos de difracción. ($632,8nm$)
- 24) La franja brillante de segundo orden en un patrón de difracción de una sola rendija está a 1,4mm del centro del máximo central. La pantalla se encuentra a 80cm de la rendija de 0,8mm. Suponiendo luz incidente monocromática, calcula la longitud de onda. ($560nm$)
- 25) La pupila del ojo de un gato se estrecha como una rendija de 0,50mm de ancho con luz de día. ¿Cual es la resolución angular? Emplea luz de 500nm en su cálculo. ($10^{-3}rad$)
- 26) Luz de 587,5nm de longitud de onda ilumina una sola rendija de 0,75mm de ancho. a) ¿A qué distancia de la rendija debe localizarse una pantalla si el primer mínimo en el patrón de difracción va a estar a 0,85mm del centro de la pantalla; b) ¿Cuál es el ancho del máximo central? ($a-1,085m, b-1,7mm$)
- 27) Una pantalla se pone a 30 cm de una rendija, la cual está iluminada con luz de 690nm. Si la distancia entre el primero y el tercer mínimos en el patrón de difracción es 3mm, ¿cuál es el ancho de la rendija? ($1,38 \cdot 10^{-4} m$)
- 28) Una rendija con 250 líneas/mm se usa con una fuente incandescente. Suponga que el espectro visible varía en longitud de onda de 400 a 700nm. ¿En cuantos órdenes puede uno ver a) el espectro visible completo, y b) la región de ondas más cortas. ($a-5, b-10$)
- 29) El ancho completo de una rendija de 3cm ancho se ilumina por medio de un tubo de descarga de sodio. Las líneas en la rendija están espaciadas uniformemente a 775nm. Calcula la separación angular en el espectro de primer orden entre las dos longitudes de onda que forman la doble línea del sodio ($\lambda= 589nm$ y $\lambda= 589,6nm$). ($0,04435^\circ$)

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso M., Finn E.J. "Física". Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. E.E.U.U. 1995.
- Blatt, F. "Fundamentos de Física". Prentice - Hall Hispanoamericana, Méjico, 1991.
- Giancoli, D.C. "Física; principios y aplicaciones". Reverté S.A., España, 1985.
- Halliday - Resnick "Fundamentos de Física". CECSA, Méjico, 1980.
- Peña, A. - García, J. "Física" 2º Bachillerato (Logse). Mc Graw-Hill, España, 1996.
- Hecht, E," Física 2" Algebra y trigonometría. Segunda edición. Ed.Thomson México 1999
- Roederer, Juan G.; Mecánica elemental, Ed Eudeba, Buenos Aires, 2002
- Lea S.M., Burke J.R., "La naturaleza de las cosas" Física: Vol I. Ed. Internacional Thomson, México, 1998.

Sears F y Zemansky, M. "Física". Aguilar, Madrid, 1981.

Serway R. A. "Física". Ed Mac Graw Hill, México, 1993.

Tipler, P. A.; Física (2º Edición), Ed. Reverté, Barcelona, 1983.

Tipler, P.A.; Física para la ciencia y la Tecnología (4ª Ed.) Ed. Reverté, Barcelona, 2000.

Wilson J. D.; "Física". Prentice - Hall Hispanoamericana, Méjico, 1994.