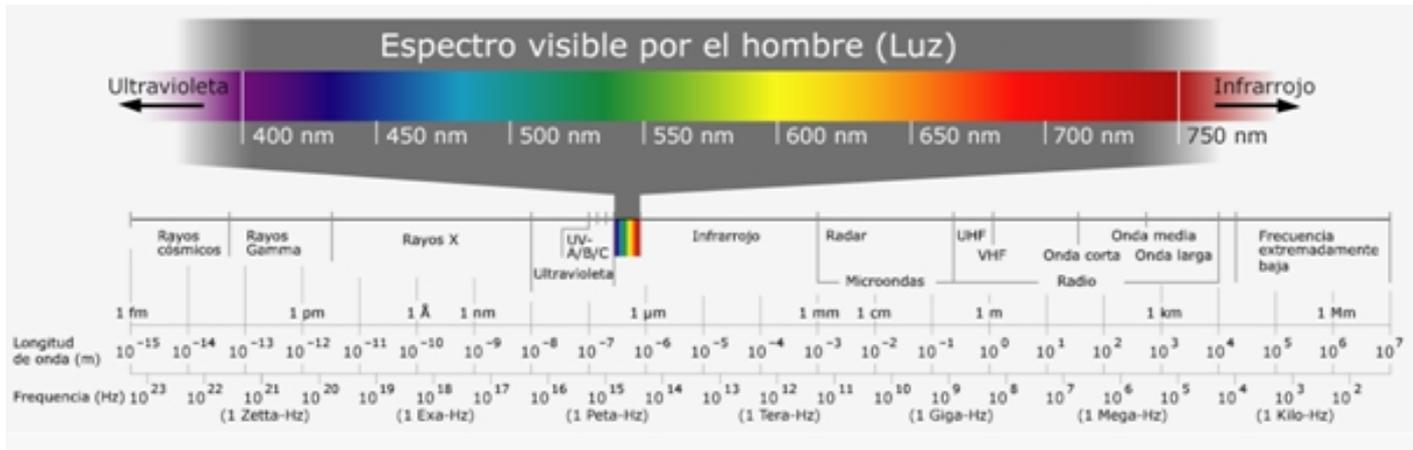


APOYO PARA LA PREPARACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

FÍSICA (PREPARACIÓN A LA UNIVERSIDAD)



Unidad 23: Naturaleza de la luz

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

15 de abril de 2010

Unidad 23: Naturaleza y propagación de la luz

23.1 Planificación de la Unidad

23.1.1 Objetivos

Conocer las distintas teorías sobre la naturaleza de la luz y explicar como han ido evolucionando históricamente hasta llegar a la concepción actual.

Describir las características de las ondas electromagnéticas y como se ordenan en el espectro. Reconocer entre todas las radiaciones las que componen la luz indicando las propiedades que la diferencian del resto de las ondas electromagnéticas.

Conocer las diferencias entre óptica geométrica y óptica física, indicando en que hipótesis se apoya cada una y enumerar los fenómenos luminosos que pueden explicar satisfactoriamente.

Explicar e interpretar, con la teoría ondulatoria de la luz, los fenómenos luminosos : reflexión, refracción, interferencia, polarización y dispersión .

Poner ejemplos que se puedan observar en la naturaleza de los fenómenos anteriores.

23.1.2 Contenidos.

- 23.2 Introducción.
- 23.3 Naturaleza de la luz. Teorías
- 23.4 Espectro de radiación electromagnética.
- 23.5 Velocidad de propagación de la luz
- 23.6 Índice de refracción.
- 23.7 Clasificación de la óptica
- 23.8 Propagación rectilínea.
- 23.9 Reflexión y refracción
- 23.10 Ángulo límite y reflexión total
- 23.11 Interferencia y Difracción.
- 23.12 Polarización.
- 23.13 Dispersión.
- 23.14 Problemas resueltos.
- 23.15 Problemas propuestos.

23.1.3 Actividades

Lectura del resumen del tema

Realización del cuestionario de la unidad

Realización de los ejercicios

Poner ejemplos en el entorno real

Redactar una pequeña reseña (máximo 1 página).

23.1.4 Bibliografía

- Libros de primero y segundo de Bachillerato.
- Serway,R.A; Jewett J.W. (2003). *Física Vol. I y II. (3ª edición)*. Thomson Editores Spain

- Tipler Mosca. (2005). *Física para la Ciencia y la Tecnología Vol I y II* (5ª edición). Ed. Reverté. Barcelona.
- Burbano de Ercilla, S; Burbano García, E; Gracia Muñoz, C (2003). *Física General* (32edición) Editorial Tébar S.L. Madrid.
- Burbano de Ercilla, S; Burbano García, E; Gracia Muñoz, C (2004). *Problemas de Física*

23.1.5 Enlaces relacionados:

Principio de Huygens (Walter Fendt, 1998)

http://web.educastur.princast.es/proyectos/jimena/pj_franciscga/Java/ph11s/huygenspr_s.htm

Fibra óptica: Universidad de Barcelona

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=118884>

Dispersión por prisma: Universidad de Barcelona

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=118883>

Polarización por superposición de ondas

 Software EMANIM 1.0 (Andras Szilagyi):

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=77001>

Polarizacion Universidad de Barcelona

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=118882>

Interferencias. Universidad de Barcelona

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=118879>

lámina de caras plano paralelas.(Universidad de Barcelona)

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=118889>

Difracción de Fresnel y de Fraunhofer (Yniversidad de Barcelona)

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=118881>

Interferómetro de Michelson (U. Barcelona)

<http://moodle.upm.es/titulaciones/oficiales/mod/resource/view.php?id=118886>

23.2 Introducción.

En esta unidad analizaremos algunas de las teorías más relevantes formuladas desde las civilizaciones antiguas hasta el momento actual, para tratar de explicar la naturaleza y comportamiento de la luz.

Aceptada la naturaleza dual de la luz (como onda electromagnética en los fenómenos de propagación y como corpúsculo en la interacción de la luz con la materia) se hace una clasificación de las ondas electromagnéticas (espectro electromagnético), y se explican algunos métodos para la determinación de la velocidad de propagación de la luz.

Seguidamente se aborda el estudio de la propagación de la luz, considerada como una radiación electromagnética que estimula el proceso de visión, es decir, dentro del marco de la óptica física.

La óptica física se ocupa del estudio de la propagación de la luz considerada una onda y por tanto explica los fenómenos luminosos: reflexión, refracción, dispersión, interferencia y difracción.

En la unidad siguiente se estudia la propagación de la luz pero dentro de la óptica geométrica.

En *óptica geométrica* se prescinde de la naturaleza ondulatoria de la luz y se utiliza la *aproximación de rayos* que permite explicar los fenómenos de reflexión, refracción y propagación rectilínea de la luz.

23.3 Naturaleza de la luz. Teorías.

La óptica, estudio de la luz, es una de las ramas más antiguas de la física y el intento de determinar cual es su naturaleza ha dado lugar a grandes controversias.

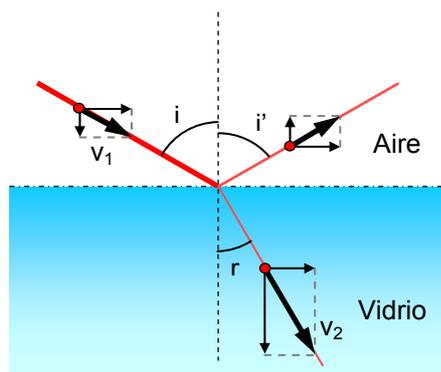
Para las civilizaciones antiguas, como la "escuela atomística", hacia 450 a.C. postulaba que la visión se producía debido a la emisión de imágenes por parte de los objetos, y a través de los ojos llegaban a nuestra alma. La "escuela pitagórica", unos años después, suponía al contrario, que la visión se producía por un fuego invisible que exploraba los objetos.

Basándose en la teoría anterior, Euclides hacia el 300 a.C. introduce el concepto de rayo (emitido por el ojo), la propagación rectilínea de la luz y la ley de la reflexión.

A finales del siglo XVI y comienzos del XVII se producen grandes avances en óptica como consecuencia de las aportaciones de Kepler (1571-1630) y Galileo (1565-1642).

En 1621 Snell descubre experimentalmente la ley de la reflexión y Descartes en 1638 en su "Óptica" enuncia las leyes de la reflexión y de la refracción, pero sin tener en cuenta cual era la naturaleza de la luz.

Teoría corpuscular de Newton.



Isaac Newton (1642-1726), en 1704 presentó en su obra Óptica el modelo corpuscular de la luz. Suponía que la luz estaba constituida por partículas materiales, emitidas a gran velocidad por los cuerpos y al propagarse lo hacían en línea recta constituyendo los rayos de luz.

La reflexión la asociaba a un choque elástico y por tanto el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Para explicar la ley de la refracción añadía una hipótesis suplementaria, suponía que las partículas, procedentes del aire, al aproximarse a la superficie de separación eran atraídas por el otro medio más denso lo que aumentaba su velocidad normal mientras la componente tangencial no se ve alterada.

Esta teoría, conduce a la siguiente relación para la

$$\text{refracción: } \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1}$$

la luz se tendría que desplazar a mayor velocidad en el agua o en el vidrio que en el aire lo está en contradicción con el sentido común.

Teoría ondulatoria de Huygens

En la misma época, Christian Huygens (1629-1695) propuso la teoría ondulatoria, supuso que la luz era un fenómeno ondulatorio que, por analogía con el sonido, necesitaba un soporte material para propagarse y que llamó éter. Con esta teoría se explicaban las leyes de la reflexión y de la refracción suponiendo que la velocidad de propagación era menor en los medios más densos.

La expresión de la ley de la refracción a la que llegó es: $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$

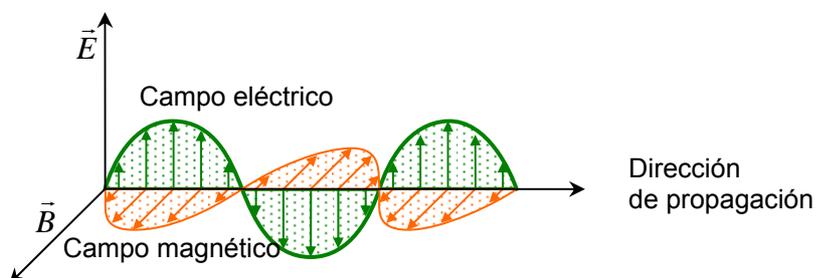
Newton reconoció las ventajas de la teoría ondulatoria que explicaba los colores formados por las películas delgadas, sin embargo rechazó la teoría ondulatoria.

Debido a la gran autoridad de Newton, su teoría corpuscular fue aceptada durante más de un siglo y la teoría ondulatoria no pudo prosperar hasta los comienzos del siglo XIX

Young-Fresnel y Foucault

La aceptación de la teoría ondulatoria se debió a las experiencias del físico inglés Thomas Young en 1801, sobre interferencias luminosas y a los trabajos del físico francés Augustin Fresnel sobre interferencias y difracción basados en un sólido desarrollo matemático.

En 1850 Foucault, midió la velocidad de propagación de la luz en el agua comprobando que era menor que en el aire acabando así con la teoría corpuscular de Newton.



Teoría ondulatoria de Maxwell:

En 1864 el físico y matemático inglés J.C. Maxwell publicó la teoría electromagnética de la luz, en ella

predecía la existencia de ondas electromagnéticas que se propagaban con una velocidad de 3×10^8 m/s, obtenida a partir de las leyes de la electricidad y magnetismo y que coincidía con el valor de la velocidad de propagación de la luz.

Con esto se confirmaba teóricamente que la luz no es una onda mecánica sino una onda electromagnética que puede propagarse sin necesidad de un medio material.

La comprobación experimental de la existencia de ondas electromagnéticas fue efectuada en 1887 por el físico alemán Hertz quien utilizando circuitos eléctricos generó y detectó dichas ondas.

Las ondas electromagnéticas son, en el caso más sencillo, ondas armónicas transversales, constituidas por la oscilación de dos campos, uno eléctrico y otro magnético, de direcciones perpendiculares, siendo ambos a su vez perpendiculares a la dirección de propagación, que se propagan en el vacío a la velocidad de la luz. La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, como postuló Einstein en 1905. En 1963 el National Bureau of Standards oficialmente fija la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío en 299.792,8 km/s. Para la mayoría de las aplicaciones, la velocidad de las ondas electromagnéticas es aproximadamente 300 000 km/s.

La onda electromagnética está caracterizada por la magnitud frecuencia ν , o por la magnitud longitud de onda en el vacío λ_0 , relacionadas entre sí por la velocidad de la luz en el vacío c :

$$c = \nu \lambda_0 \quad \nu = c / \lambda_0 \quad \lambda_0 = c / \nu$$

Cuando una onda electromagnética pasa de un medio a otro de diferente densidad la frecuencia no varía, pero al variar la velocidad lo hace también la longitud de onda. Conclusión: la frecuencia de una onda siempre permanece constante. La relación entre las magnitudes frecuencia, longitud de onda y velocidad en un medio distinto del vacío, será análogas a las que existen en el vacío, pero con la velocidad y la longitud de onda que corresponden al referido medio:

$$v = \nu \lambda \quad \nu = v / \lambda \quad \lambda = v / \nu$$

Teoría corpuscular de la luz según Plank y Einstein.

El estudio de fenómenos como la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y los espectros atómicos no se pudieron explicar con el modelo ondulatorio. Aunque la teoría ondulatoria explica la propagación de la luz, falla cuando se produce interacción con la materia.

En 1900 Max Plank, para obtener la ley de radiación del cuerpo negro, supuso que la emisión de luz no es de forma continua sino por *cuantos* discretos.

La teoría cuántica de Plank permitió que en 1905, que A.Einstein explicara el efecto fotoeléctrico y llamó *fotones* a los corpúsculos luminosos.

El fotón al igual que otras partículas lleva consigo energía y momento desde la fuente, pero a diferencia de otras partículas, tales como protones o electrones, no posee masa en reposo.

La intensidad de la radiación luminosa es directamente proporcional al número de fotones presentes, y la energía contenida en un fotón o cuanto de radiación está definida por:

$$E = h \nu \quad \text{donde } E = \text{energía de un fotón en julios (J) y } h = \text{constante de Planck} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Se puede decir que los fotones de las diversas radiaciones se distinguen entre sí por su energía proporcional a la frecuencia de la onda considerada.

Se aceptaba que la luz se comportaba como una onda electromagnética en los fenómenos de propagación, y como un corpúsculo en los fenómenos de emisión absorción e interacción con la materia.

Naturaleza dual de la luz.

La luz tiene una doble naturaleza, corpuscular y ondulatoria y en cada fenómeno concreto se manifiesta como onda o como corpúsculo

La complementariedad de los aspectos ondulatorio y corpuscular fue puesta de manifiesto por Luis de Broglie (premio Nóbel en 1929) al establecer en 1924, que todo corpúsculo en movimiento (sea material, eléctrico o de cualquier naturaleza) lleva asociado una onda y que la intensidad de una onda en un punto, en un cierto instante, es la probabilidad de que el corpúsculo asociado esté en ese punto en el instante considerado. De esta forma fija la base de la Mecánica Cuántica desarrollada posteriormente por Schrödinger, Heisenberg, Born y Dirac, fundamentalmente.

23.4 Espectro electromagnético

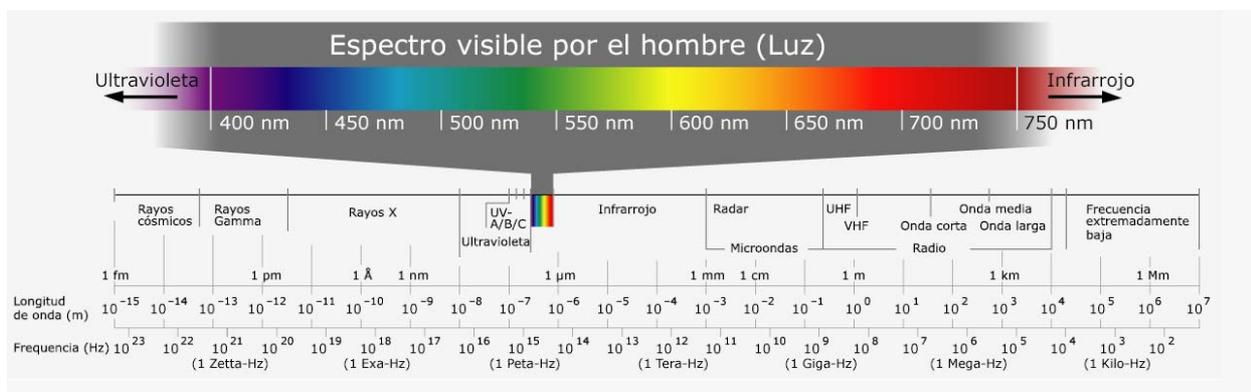
El rango completo de la REM (o conjunto de todas las ondas electromagnéticas) constituye el espectro electromagnético ordenado de acuerdo con su frecuencia, longitud de onda en el vacío o energía del fotón. Se

puede efectuar una clasificación según su principal fuente. Los límites de esta clasificación no son precisos, ya que fuentes diferentes pueden producir ondas con intervalos de frecuencias superpuestos parcialmente. El espectro electromagnético se extiende desde los rayos gamma (corta longitud de onda, elevada frecuencia y alta energía) hasta ondas de radio (larga longitud de onda, baja frecuencia y baja energía). Los límites extremos del espectro no son conocidos con precisión.

La frecuencia o la longitud de onda en el vacío son los descriptores comúnmente utilizados, como se ha indicado anteriormente, para definir las diferentes bandas del espectro.

El rango completo de frecuencias de radiación puede ser expresado en ciclos por segundo o hertz (Hz) y varía desde frecuencias del orden de 10²⁵ Hz, observadas en la radiación cósmica, hasta las más bajas frecuencias, que corresponden a ondas electromagnéticas producidas mediante circuitos oscilantes. Es frecuente utilizar para expresar los valores de frecuencia el megahertz (1 MHz = 10⁶ Hz) o en gigahertz (1 GHz = 10⁹ Hz).

El rango de longitudes de onda se extiende, desde km para las ondas largas de radio hasta alrededor de 10⁻¹⁴ m para los rayos gamma. Por continuidad el rango completo puede ser expresado en términos de metros. No obstante, es a menudo más conveniente especificar las cortas longitudes de onda en angstrom (1 Å = 10⁻¹⁰ m), en nanómetros (1 nm = 10⁻⁹ m), o en micras (1 μm = 10⁻⁶ m)



El espectro electromagnético completo se clasifica habitualmente en la forma siguiente, tal como aparece en la figura:

Ondas de radiofrecuencia

FRECUENCIA		LONGITUD DE ONDA
DESDE	Algunos Hz	Algunos km
HASTA	10 ⁹ Hz	0,3 m

Estas ondas, que se usan en los sistemas de radio y televisión, son generadas por medio de dispositivos electrónicos, principalmente circuitos oscilantes.

Microondas

FRECUENCIA		LONGITUD DE ONDA
DESDE	10 ⁹ Hz	0,3 m
HASTA	3.10 ¹¹ Hz	10 ⁻³ m = 10 ³ μm

Se usan en el radar y otros sistemas de comunicaciones, así como en el análisis de detalles de la estructura atómica y molecular. Se generan también con dispositivos electrónicos.

La región de las microondas se conoce también como UHF (Ultra High Frequency)

Espectro infrarrojo (ir)

FRECUENCIA		LONGITUD DE ONDA
DESDE	3.10 ¹¹ Hz	1,0 . 10 ⁻³ m = 10 ³ μm = 1000 nm

HASTA $4 \cdot 10^{14}$ Hz $7,8 \cdot 10^{-7}$ m = 0,78 μ m = 780 nm

El nombre se debe a su situación en el espectro por encima del rojo. En física el infrarrojo está dividido en: lejano IR (desde 103 mm hasta 5,6 μ m), IR medio (desde 5,6 μ m hasta 1,3 μ m) y el IR próximo (desde 1,3 μ m hasta 0,78 μ m).

Estas ondas son producidas por cuerpos calientes y moléculas. Los procesos de rotación y vibración en las moléculas corresponden a esta región del espectro.

Luz o espectro visible

	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
DESDE	$4 \cdot 10^{14}$ Hz	$7,8 \cdot 10^{-7}$ m = 0,78 μ m = 780 nm
HASTA	$8 \cdot 10^{14}$ Hz	$3,8 \cdot 10^{-7}$ m = 0,38 μ m = 380 nm

La luz es producida por átomos y moléculas como consecuencia del procesos relacionados con la corteza del átomo, principalmente transiciones electrónicas entre niveles de energía.

Los límites de longitudes de onda están establecidos por la sensibilidad del ojo humano. La mayor parte de la energía de la radiación solar corresponde a esta banda y es capaz de atravesar la atmósfera, casi sin absorción y llegar a la superficie de la Tierra

Una gran parte de la energía radiante del sol, alcanza la atmósfera como luz blanca. El ojo humano no es igualmente sensible a las diferentes frecuencias, la sensación producida depende de su valor y se denomina color. De aquí, que la radiación de una frecuencia determinada se denomine monocromática.

La mayoría de los colores que percibimos son el resultado de reflexión y absorción selectiva de longitudes de onda de luz blanca. Por ejemplo la clorofila de una hierba absorbe selectivamente más longitudes de onda azules y rojas de la luz blanca y refleja relativamente más longitudes de onda verdes hacia nuestros ojos. El ojo humano percibe la nieve reciente como blanca porque su superficie refleja todas las longitudes de onda del espectro visible por igual. Por contraste, una lava basáltica reciente aparece como negra porque las longitudes de onda de la luz blanca son absorbidas por su superficie, no dejando esencialmente, longitudes de onda que alcancen el ojo desde el proceso de reflexión.

Espectro ultravioleta (uv)

	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
DESDE	$8 \cdot 10^{14}$ Hz	$3,8 \cdot 10^{-7}$ m = 0,38 μ m
HASTA	$3 \cdot 10^{17}$ Hz	10^{-9} m

Estas ondas son producidas por átomos y moléculas en descargas eléctricas. El Sol es una fuente muy poderosa de radiación ultravioleta, siendo este factor el principal responsable del bronceado de la piel. La radiación ultravioleta del sol interactúa con los átomos presentes en la alta atmósfera, produciendo gran cantidad de iones; esto explica por qué la atmósfera está ionizada a una altura superior a 80 km, recibiendo por este motivo la denominación de ionosfera.

La banda ultravioleta se puede dividir en: ultravioleta próximo (0,4 a 0,3 μ m), ultravioleta medio (0,3 a 0,2 μ m) y ultravioleta lejano (0,2 a 0,01 μ m), El Sol es la fuente natural de radiación UV pero las longitudes de onda menores de 0,3 μ m son incapaces de pasar a través de la atmósfera y alcanzar la superficie de la Tierra.

Rayos x

	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
DESDE	$3 \cdot 10^{17}$ Hz	10^{-9} m
HASTA	$5 \cdot 10^{19}$ Hz	$6,0 \cdot 10^{-12}$ m

Esta parte del espectro electromagnético fue descubierta en 1895 por el físico alemán W. Roentgen cuando estaba estudiando los rayos catódicos. Son producidos por los electrones más fuertemente ligados al núcleo. Se utilizan en medicina debido a que huesos y tejidos tienen diferente absorción de rayos X, lo que permite obtener un contraste definido sobre una placa fotográfica (radiografía).

Rayos gamma

FRECUENCIA		LONGITUD DE ONDA
DESDE	$3 \cdot 10^{18}$ Hz	10^{-10} m
HASTA	$3 \cdot 10^{22}$ Hz	menos de 10^{-14} m

Estas ondas son de origen nuclear y se superponen al límite superior del espectro de rayos X. La energía de sus fotones son del mismo orden de magnitud que las involucradas en los procesos nucleares. La radiación γ es emitida por muchas sustancias radiactivas.

Radiación cósmica

En la radiación cósmica hay ondas electromagnéticas de frecuencias aún mayores (o longitudes de onda más cortas) y en consecuencia los fotones de energía más alta. Estas radiaciones tienen especial interés en la investigación astronómica.

Debido a la gran amplitud del espectro de REM, cuando sus diversas partes se propagan a través de la materia se comportan de forma diferente. Por ejemplo, las ondas que tienen fotones de una energía comparable a las energías características de los electrones atómicos o de los átomos en las moléculas interactúan más fuertemente con los átomos y las moléculas; este es el caso de las radiaciones infrarroja, visible y ultravioleta. En general, la radiación de mayor longitud de onda, que lleva fotones de energía menor, interactúa débilmente con la materia por su baja capacidad de absorción; esto es lo que ocurre con las ondas de radiofrecuencia. La materia también absorbe muy poco las ondas de corta longitud de onda o alta energía, como los rayos X y rayos gamma, pero sus efectos son más profundos, ya que no solo producen ionización atómica y molecular, sino también en muchos casos la fragmentación del núcleo.

23.5 Velocidad de propagación de la luz

¿Es la velocidad de la luz infinita? Es una pregunta que ya los filósofos de la Antigua Grecia se hacían. El primero en creer que la luz se propagaba con una velocidad finita fue Empédocles, en el 450 a.C, aunque no pudo demostrarlo ni realizar ninguna medida. No fue hasta el año 1620, cuando Galileo intentó medir la velocidad de la luz por primera vez, en el mismo año en el que Descartes confirmó que la velocidad de la luz era infinita. La idea de Galileo era observar el retraso con el que llegaba la luz de una cima de una montaña a otra situada a un kilómetro de distancia. Aunque la metodología en principio es correcta, la velocidad de la luz es tan elevada, que el intervalo temporal a medir era demasiado pequeño para los medios de aquella época.

El primero en conseguir hacer una medida de la velocidad de la luz fue el danés Roemer en 1676. Estudiando el movimiento de una de las lunas de Júpiter, lo, observó que el tiempo entre dos eclipses consecutivos era variable según la posición relativa entre Júpiter y la Tierra. El eclipse ocurrido con distancia máxima entre planetas tarda más en verse en la Tierra, pues la luz ha de recorrer una distancia mayor. Con estos datos, obtuvo un primer valor de $2,3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹, frente al valor real por todos conocido, de $3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹.

El primer método terrestre de medida de la velocidad de la luz fue llevado a cabo por el físico francés Fizeau en el año 1849, quien hizo pasar un haz de luz entre los dientes de una rueda dentada. Detrás de ésta, a unos 8km de distancia, colocó un espejo, que reflejaría el haz en la misma dirección en la que había llegado. Variando la velocidad de giro de la rueda dentada, consiguió que el haz de luz reflejado en el espejo chocara contra el siguiente diente de la rueda, determinando con este experimento una velocidad de $3,15 \cdot 10^8$ m·s⁻¹.

Al año siguiente, Foucault mejoró el método utilizado por Fizeau, sustituyó la rueda dentada por un espejo giratorio de ocho caras, que reflejaba un haz incidente sobre un espejo fijo. Cuando el haz volvía al espejo giratorio, el rayo de luz se reflejaba desviado, tanto más cuanto mayor fuera su velocidad de giro. Así observó un valor de $2,98 \cdot 10^8$ m·s⁻¹.

23.6 Índice de refracción.

El índice de refracción absoluto de un medio se define como el cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío y la velocidad en el medio considerado.

$$n = \frac{c}{v}$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Si la velocidad de propagación de la luz es igual en todos los puntos de un medio y en todas las direcciones el medio es homogéneo e isotrópico. Los vidrios ópticos son homogéneos e isotrópicos.

En el vacío el índice de refracción es $n=1$ y también, aproximadamente en el aire. En otros medios el índice de refracción es mayor que la unidad.

Si expresamos las velocidades de propagación en función de la longitud de onda y de la frecuencia de la radiación, tendremos:

$$n = \frac{\lambda_0 \cdot \nu}{\lambda \cdot \nu} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

Siendo: λ_0 la longitud de onda de la radiación en el vacío, λ la longitud de onda en el medio y ν su frecuencia.

El índice de refracción relativo del medio 2 respecto del medio 1 es:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2}$$

La velocidad de propagación de la luz en los medios materiales es, en la mayoría de los casos, función de su frecuencia, a este fenómeno se le denomina dispersión.

23.7 Clasificación de la óptica.

La óptica es la parte de la física que estudia los fenómenos relacionados con la luz.

Se puede clasificar en:

Óptica geométrica: Se ocupa de la propagación de la luz por el método de los rayos luminosos. Estudia la luz sin tener en cuenta su naturaleza. Permite explicar la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz.

Óptica física Estudia el comportamiento de la luz desde el punto de vista de la teoría de ondas. Además de interpretar los fenómenos luminosos anteriores, permite explicar los fenómenos de interferencia, difracción y polarización.

Óptica cuántica: Estudia los procesos en los que se produce interacción de la luz con la materia.

En estas situaciones falla la teoría ondulatoria, como ocurre con el caso del efecto fotoeléctrico.

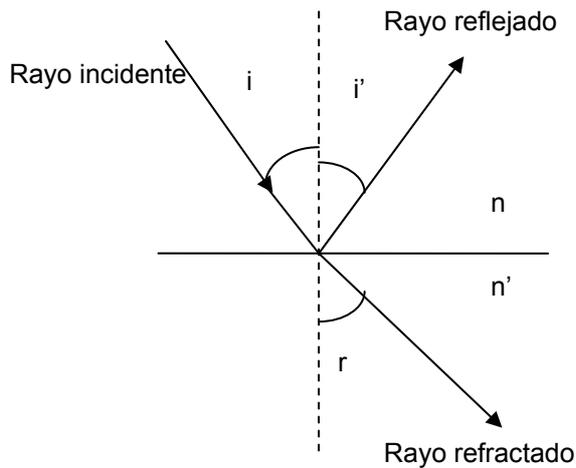
23.8 Propagación rectilínea.

La propagación de la luz es rectilínea en medios homogéneos e isotrópicos. Así es aceptado en óptica geométrica y el rayo luminoso caracteriza la luz y nos indica su dirección de propagación.

Las sombras proyectadas en una pantalla, cuando se ilumina un cuerpo opaco por un foco puntual, reproducen la forma del objeto mediante los rayos tangentes a el constituye la sombra geométrica.

En realidad la propagación no siempre es rectilínea. Cuando un haz luminoso pasa a través de una rendija se extiende una cierta proporción sobre la zona de sombra geométrica. Esto solo puede explicarse atribuyendo a la luz un carácter ondulatorio. El rayo luminoso es perpendicular al frente de onda.

23.9 Reflexión y refracción



Cuando una onda incide en la superficie de separación de dos medios parte se refleja y parte se refracta.

Ley de la reflexión

El rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie en el punto de incidencia, están situados en el mismo plano (plano de incidencia).

El ángulo de incidencia i es igual al ángulo de reflexión i'

$$i = i'$$

Ley de la refracción

El rayo incidente, el refractado y la normal están situados en el mismo plano (plano de incidencia).

Los ángulos de incidencia i y de refracción r , cumplen la Ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n'}{n} = \frac{v}{v'}$$

23.10 Ángulo límite. Reflexión total.

De acuerdo con la ley de Snell,

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n'}{n}$$

Los ángulos de incidencia y de refracción son inversamente proporcionales a los índices de refracción de los medios.

Analizamos las dos situaciones que se pueden presentar:

Cuando un rayo de luz pasa de un medio de menor índice de refracción a otro de mayor índice ($n_1 < n_2$), el ángulo de refracción será menor y el rayo refractado se acerca a la normal

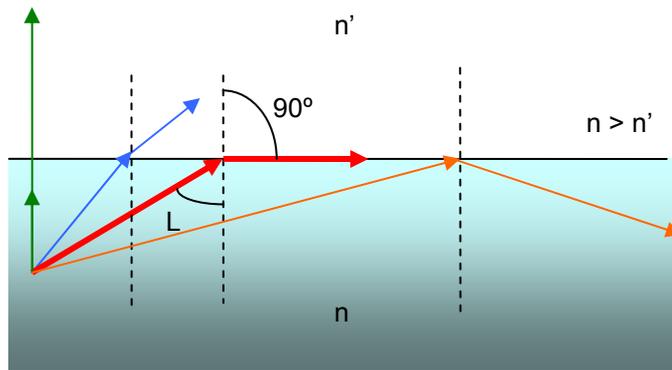
$$\text{sen } r = \frac{n}{n'} \cdot \text{sen } i, \text{ siempre existe rayo refractado.}$$

Si la incidencia es de un medio de mayor índice de refracción a otro de menor índice ($n_1 > n_2$), el rayo refractado se aleja de la normal.

- Al aumentar el ángulo de incidencia también lo hace el ángulo de refracción.
- Para un cierto valor del ángulo de incidencia, llamado ángulo límite (L), el ángulo de refracción vale

$$90^\circ. \text{ para dicha incidencia se cumple: } \text{sen } L = \frac{n'}{n}$$

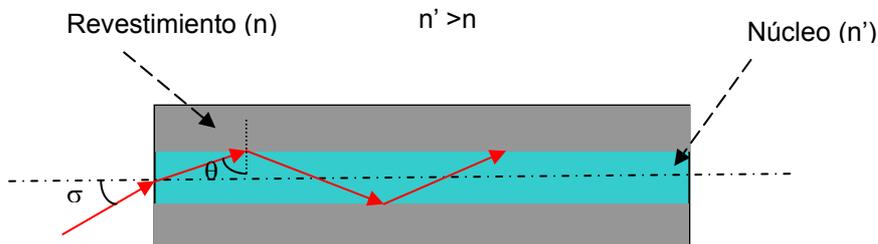
- Para ángulos de incidencia mayores que el límite se produce el fenómeno de reflexión total y toda la luz vuelve al primer medio.



Fibra óptica

Una aplicación muy importante del fenómeno de reflexión total lo constituyen las fibras ópticas. Están formadas por conductos cilíndricos construidos con materiales dieléctricos, como vidrio ó plástico y capaces de transmitir ondas electromagnéticas debido a fenómenos de reflexión total dentro de la fibra. El cable de la fibra óptica está formado por un núcleo rodeado de un revestimiento de menor índice de refracción que el núcleo.

Si la luz incide en un extremo de la fibra con un ángulo adecuado σ , la luz se mantiene dentro del núcleo de la fibra como consecuencia de la reflexión total ($\theta > L$) producida en la superficie de separación entre el núcleo y el revestimiento.



23.11 Interferencia y difracción luminosas

Interferencia Luminosa

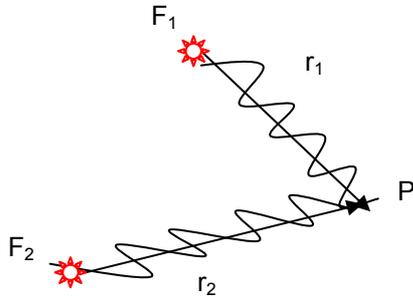
Se conoce como interferencia luminosa la modificación de la intensidad obtenida por la superposición de dos o más haces luminosos. La interferencia puede ser constructiva o destructiva.

Estos fenómenos no fueron advertidos hasta 1801 cuando aún prevalecía la teoría corpuscular. Con la observación y demostración de las interferencias T. Young, puso de manifiesto el carácter ondulatorio de la luz.

Para poder explicar las interferencias necesitamos aplicar:

- El principio de Huygens: Cada punto de un frente de ondas puede considerarse como un manantial de ondas secundarias que se propagan en todas las direcciones con una velocidad igual a la velocidad de propagación de las ondas. El nuevo frente de onda se obtiene construyendo la envolvente de las ondas secundarias, superficie tangente a dichas ondas. Al pasar la luz por una abertura se extiende penetrando en la región no expuesta a las ondas incidentes.

- Principio de superposición: La perturbación resultante en cualquier punto y en cualquier instante se puede hallar sumando las perturbaciones instantáneas que se producirían en el punto por las ondas individuales como si cada una de ellas actuara sola.
El principio de superposición es lineal, podemos hacer la suma escalar ya que consideramos las perturbaciones paralelas.
Si F_1 y F_2 son dos focos luminosos que emiten unas perturbaciones de expresión $E_{01}\text{sen}(\omega t + \varphi_1)$ y $E_{02}\text{sen}(\omega t + \varphi_2)$ respectivamente. La perturbación en P será la suma de:



$$E_1 = E_{01}\text{sen}(\omega t - kr_1 + \varphi_1)$$

$$E_2 = E_{02}\text{sen}(\omega t - kr_2 + \varphi_2)$$

La amplitud de la perturbación resultante se puede obtener de la expresión:

$$E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01} \cdot E_{02} \cos[k(r_2 - r_1) + \Delta\varphi]$$

Donde $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$

El proceso natural de emisión de luz es debido a excitaciones atómicas que se producen muchas veces por segundo emitiendo trenes de onda con cambios al azar de fase por lo que $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ varía muchas veces en la unidad de tiempo. El valor medio de la función $\cos[k(r_2 - r_1) + \Delta\varphi] = 0$ y la amplitud en cualquier punto es $E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2$

No se observan interferencias ya que la amplitud y la intensidad es igual en todos los puntos

Para poder observar las interferencias es preciso que la diferencia de fase sea constante, es decir que los focos sean coherentes.

- Focos coherentes: Dos focos son coherentes cuando mantienen *constante la diferencia de fase*. el coseno es función de la posición del punto ($r_2 - r_1$) y la amplitud también con lo que se puede observar la figura de interferencia.

Si los focos son coherentes y suponemos para simplificar que $\Delta\varphi = 0$

la **interferencia constructiva** se dará si:

$\cos[k(r_2 - r_1)] = 1 \Rightarrow E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01} \cdot E_{02} \Rightarrow E = E_{01} + E_{02}$ y la amplitud es la suma de las amplitudes.

$$\text{Si } \cos[k(r_2 - r_1)] = 1 \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = m2\pi \Rightarrow r_2 - r_1 = m\lambda$$

la **interferencia destructiva** se dará si:

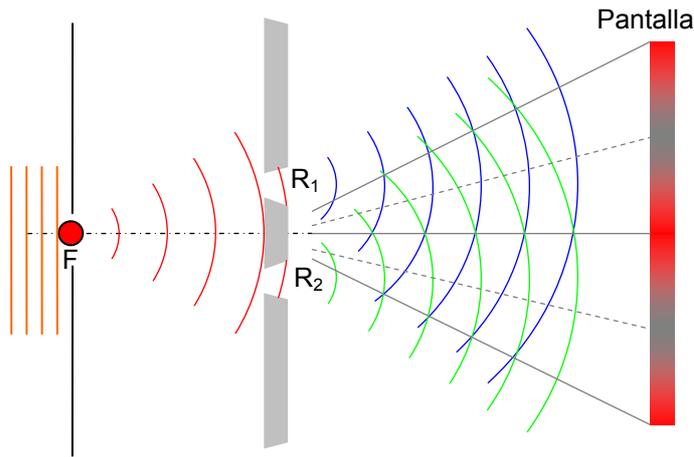
$\cos[k(r_2 - r_1)] = -1 \Rightarrow E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 - 2E_{01} \cdot E_{02} \Rightarrow E = E_{01} - E_{02}$ y la amplitud es la diferencia de las amplitudes.

$$\text{Si } \cos[k(r_2 - r_1)] = -1 \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = (2m + 1)\pi \Rightarrow r_2 - r_1 = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$$

Experimento de Young de la doble rendija

Con este experimento Young obtuvo haces coherentes desdoblado un haz luminoso procedente de un foco luminoso único.

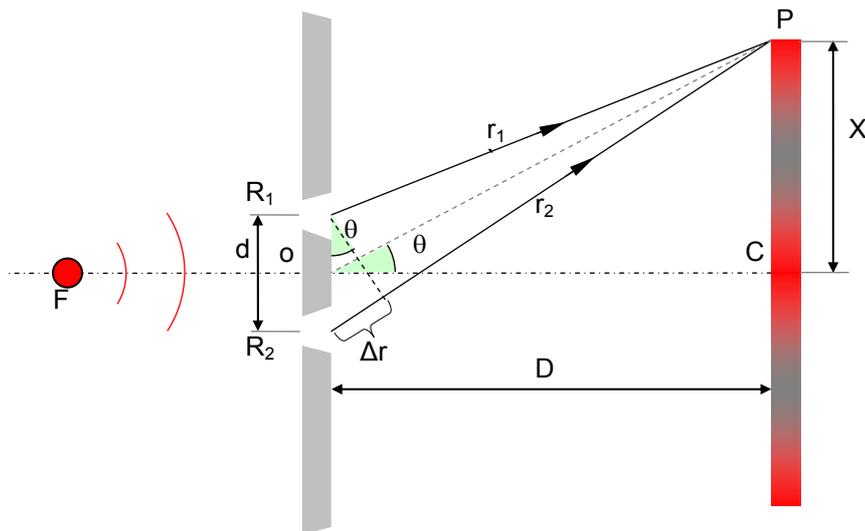
Utilizó dos pantallas opacas paralelas en las que practicó, un orificio en la primera y dos en la segunda situados simétricamente respecto a la normal trazada por F.



El primer orificio F actúa de foco y las dos rendijas R_1 y R_2 son dos focos coherentes.

Por haber partición del frente de onda la amplitud de estos focos es aproximadamente igual que la amplitud del foco F del que provienen.

El *patrón de interferencia* que se recoge en la pantalla como consecuencia de la interferencia está formado por una franja central brillante y alternancia de franjas brillantes y oscuras.



Par obtener la posición en la pantalla de las franjas brillantes aplicamos la condición de interferencia constructiva y teniendo en cuenta la geometría del dibujo

$$r_2 - r_1 = m\lambda$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{sen}\theta = \frac{\Delta r}{d}$$

$$\text{sen}\theta \approx \text{tg}\theta = \frac{X}{D}$$

$$d \cdot \text{sen}\theta = m\lambda$$

$$d \cdot \frac{X}{D} = m\lambda$$

$$\Rightarrow X_{\text{Máxx}} = m \cdot \frac{D}{d} \cdot \lambda \quad m=0 \text{ máximo central brillante.} \Rightarrow X_{\text{Máxx}} = 0$$

$$m=1, 1^{\text{a}} \text{ franja brillante. } m=2 \Rightarrow X_{\text{Máxx}} = \frac{D}{d} \cdot \lambda.$$

Análogamente las franjas oscuras

$$\text{Mínimos: } r_2 - r_1 = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$d \cdot \text{sen} \theta = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$d \cdot \frac{X}{D} = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow$$

$$X_{\text{Mín}} = (2m + 1) \cdot \frac{D}{d} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

1º mínimo $m = 0$
(1ª franja)

$$(X_{\text{Mín}})_1 = \frac{D}{d} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

2º mínimo $m = 1$
(2ª franja)

$$(X_{\text{Mín}})_2 = 3 \frac{D}{d} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Interferómetros.

Un interferómetro es un instrumento que emplea la interferencia para medir longitudes de onda o bien para medir distancias.

Los interferómetros pueden dividirse en dos tipos principalmente los basados en la división del frente de onda y los que se fundan en la división de la amplitud.

Difracción luminosa

La difracción es la flexión de la luz alrededor de un obstáculo, se produce cuando el tamaño del obstáculo es de dimensiones semejantes a la longitud de onda de las ondas luminosas.

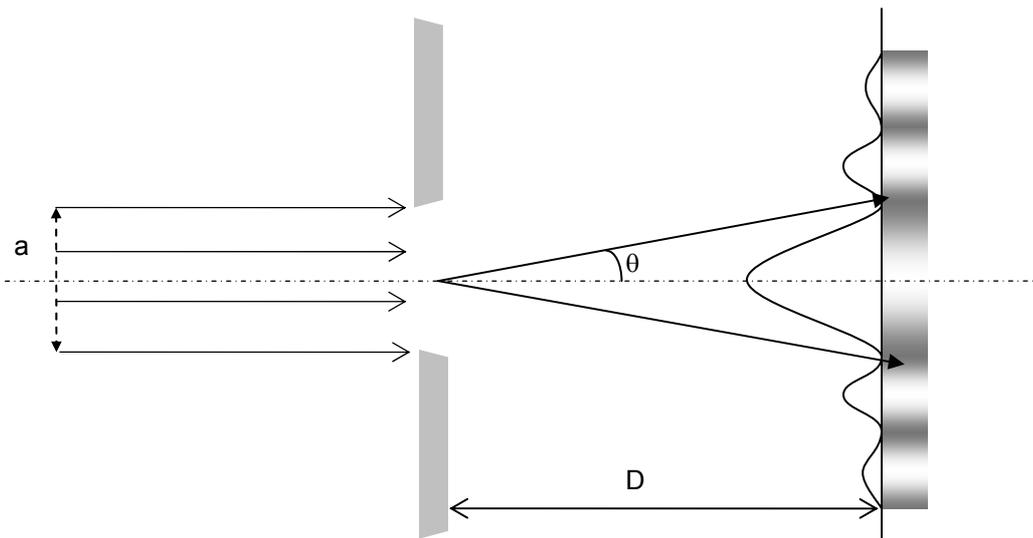
Los fenómenos de difracción se dividen en dos tipos. Aquellos en los que el manantial luminoso y la pantalla en la que se observa la difracción se encuentran muy alejados de la abertura que ocasiona el fenómeno. y aquellos en los que el manantial o la pantalla o ambos están a distancia finita de la abertura.

Por razones históricas los primeros se denominan difracción de Fraunhofer y los segundos de Fresnel. El proceso físico es el mismo pero mas sencillo de justificar matemáticamente es el de Fraunhofer.

Estudio de difracción de Fraunhofer para una rendija de anchura a .

Sea un haz de luz monocromática que se aproxima a la rendija, por estar el foco muy alejado, el frente de onda será plano al alcanzar la rendija. Por este motivo todos los puntos de la rendija están en fase y la figura de difracción que se forma en la pantalla se puede explicar como las interferencias.

La figura de difracción es ahora diferente consta de una ancha franja central brillante y a los lados otras franjas cada vez menos brillantes, que se alternan con franjas oscuras como se puede observar en la figura. Se supone que la pantalla está muy alejada de la rendija



Estudiamos el comportamiento del conjunto de rayos paralelos que forman el haz y que abandonan la rendija con distintas inclinaciones.

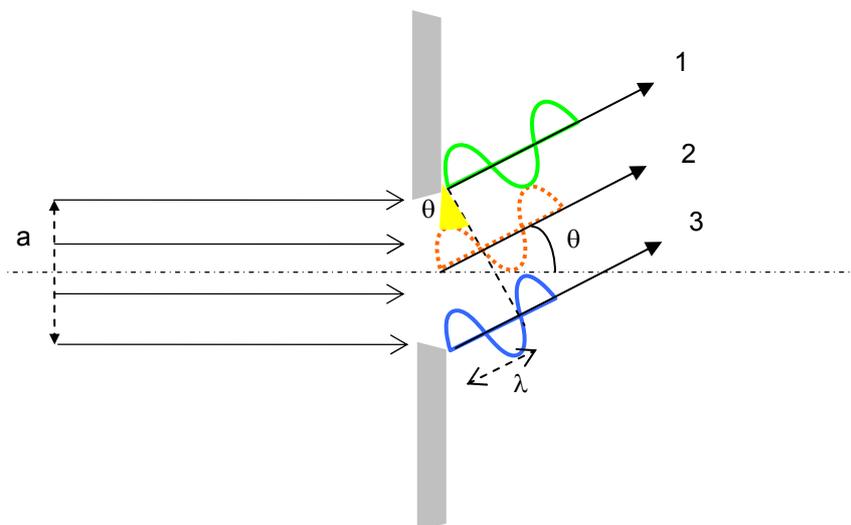
Si consideramos el conjunto de rayos que salen paralelos al eje, cuando se superpongan en la pantalla, teóricamente en el infinito, no llevan desfase y producirán un máximo,.

Al tomar rayos paralelos con inclinación seguirán produciendo interferencia constructiva hasta que el ángulo de inclinación sea θ , que demostraremos obedece a la expresión: $\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{a}$ y corresponde al primer mínimo.

Para explicar el mínimo tomamos el rayo 1 y el rayo 2, como difieren en $\frac{\lambda}{2}$ cuando lleguen a la pantalla interferirán destructivamente. De igual modo un rayo más abajo del 1 se cancela con otro que lo esté del rayo. Todos los rayos interfieren destructivamente y forman el primer mínimo.

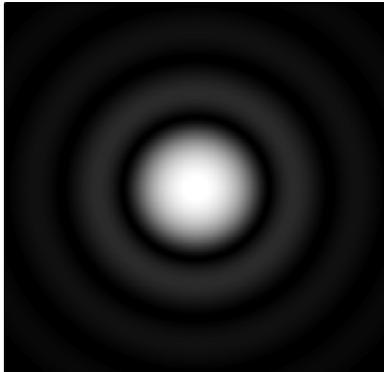
Utilizando un razonamiento similar demostraríamos que el resto de mínimos se obtienen de la expresión:

$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{a}$, con $m=1$ para el primero y $m=2, 3 \dots$ para los siguientes.



Cuando la abertura es circular en lugar de rendija rectangular, lo que es mas frecuente, la figura de difracción está formada por un disco central brillante rodeado por anillos alternativamente brillantes y oscuros. La expresión para el primer mínimo es ahora

$$\text{sen } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{a} \text{ y } a \text{ representa el diámetro de la abertura}$$



El 85% de la energía está en disco central brillante que es el disco de Airy. Por tanto la luz procedente de un foco puntual al ser difractada por una abertura circular (monturas de las lentes y diafragmas) no dará un punto geométrico sino un disco rodeado de anillos. El poder separador de un instrumento óptico queda determinado por el fenómeno de la difracción.

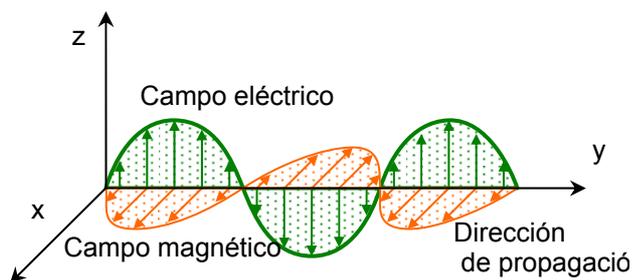
23.12 Polarización

Los fenómenos de interferencia y difracción ponen de manifiesto la naturaleza ondulatoria de la luz, los fenómenos de polarización demuestran que las ondas luminosas son ondas transversales. La polarización de una onda caracteriza la dirección de las oscilaciones, en el caso de la luz las magnitudes oscilantes son los campos eléctrico y magnético.

Es costumbre que la dirección de polarización se defina respecto al vector campo eléctrico \vec{E} . La luz puede polarizarse de varias maneras:

Polarización lineal.

Se produce cuando el vector eléctrico \vec{E} se mantiene paralelo a una dirección fija en el espacio que se denomina dirección de polarización. Al avanzar el vector \vec{E} determina el plano de polarización.



En este caso la dirección de polarización es z. El plano de polarización es YZ

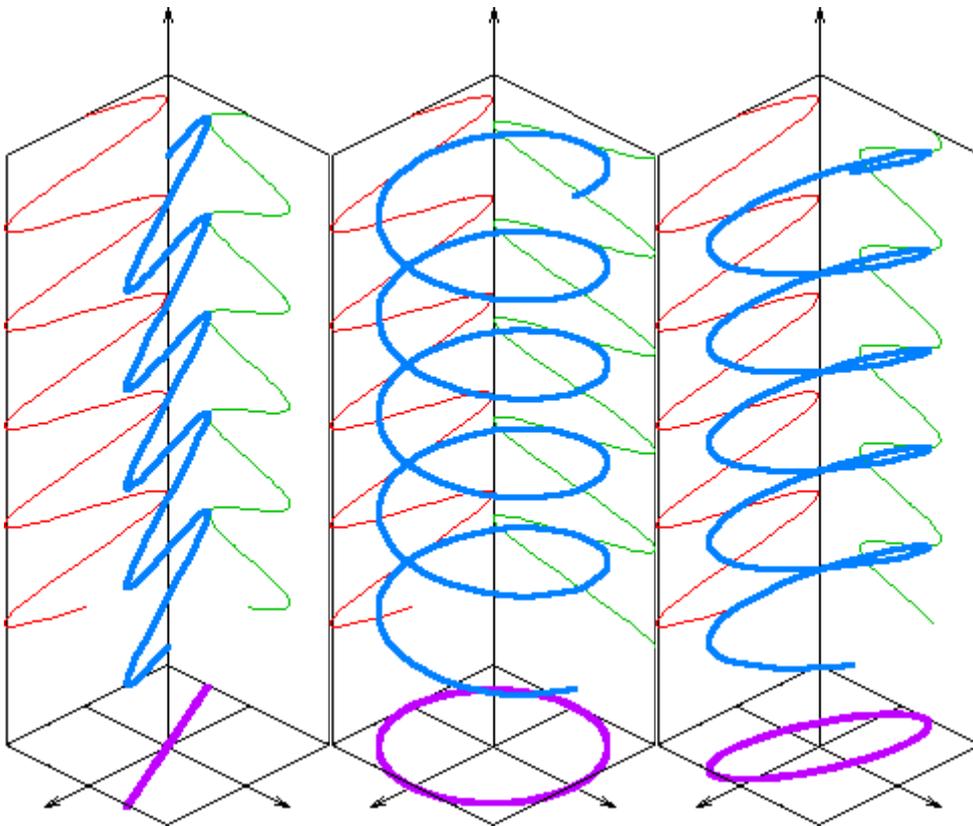
Polarización circular.

Se produce cuando el vector \vec{E} mantiene su módulo constante mientras que su dirección gira en el espacio con una velocidad angular constante. El extremo de \vec{E} describe al avanzar una circunferencia

Polarización elíptica.

Es similar a la circular salvo que el módulo de \vec{E} no es constante y el extremo describe una elipse.

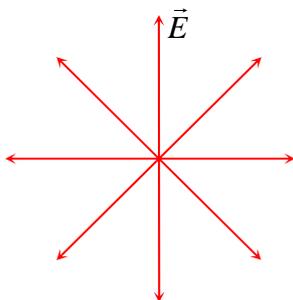
En la siguiente figura se muestra un ejemplo de polarización lineal, circular y elíptica.



Luz no polarizada.

La mayoría de las ondas producidas por una sola fuente están polarizadas por ejemplo la onda electromagnética generada por un solo átomo o una molécula.

Una fuente luminosa típica, contiene millones de átomos que actúan independientemente, emitiendo trenes de ondas cuyas polarizaciones no están relacionadas de modo que la luz resultante es una mezcla de polarizaciones al azar, es luz no polarizada.



Representación de luz no polarizada.

Métodos para obtener luz polarizada a partir de luz no polarizada

Polarización por reflexión

En 1812, el físico francés D. Brewster, descubrió que cuando la luz no polarizada se refleja en una superficie plana entre dos medios transparentes, la luz reflejada está total o parcialmente polarizada. El grado de polarización depende del ángulo de incidencia

Se denomina **ángulo de polarización** o **ángulo de Brewster**, al ángulo de incidencia tal que los rayos reflejado y refractado son perpendiculares entre sí, la luz reflejada está completamente polarizada

Luz reflejada polarizada con el vector campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia

Luz refractada ligeramente polarizada, debido a que sólo se refleja una pequeña porción de la luz incidente.

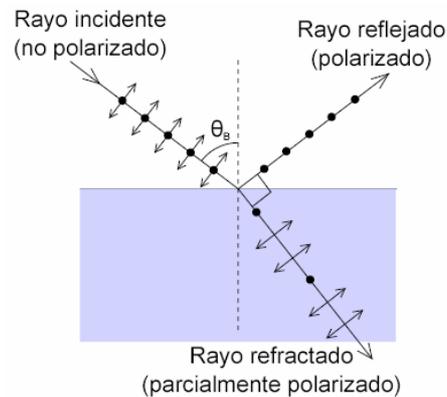
Si el rayo incide desde un medio de índice de refracción n_1 sobre otro de índice de refracción n_2 al aplicar la ley de Snell teniendo en cuenta que el ángulo de polarización es complementario del de refracción

$$\text{sen } r = \cos \theta_B$$

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_B = n_2 \cdot \text{sen } r = n_2 \cdot \cos \theta_B$$

Ley de Brewster:

$$\text{tg } \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$



Polarización por absorción

Algunos cristales naturales, adecuadamente cortados, absorben y transmiten la luz de forma diferente dependiendo de la polarización de la luz. Pueden utilizarse para obtener luz polarizada.

El filtro de polarización más conocido son las láminas de Polaroid.

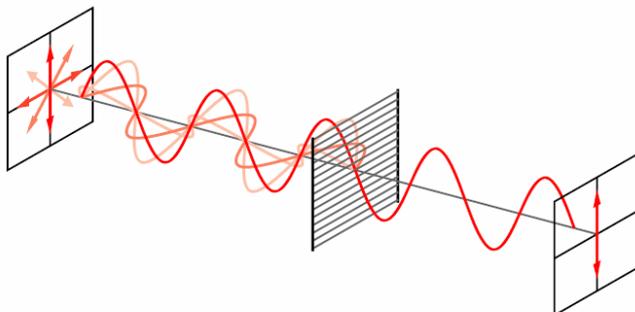
En su estructura existen cadenas largas de hidrocarburos alineadas en una misma dirección, de forma que cuando la luz incide con su vector campo eléctrico paralelo a dichas cadenas se establecen corrientes eléctricas a lo largo de las mismas y la energía luminosa es absorbida.

Si el campo eléctrico incide en dirección perpendicular a las cadenas, la luz es transmitida.

La dirección perpendicular a la de las cadenas se denomina eje de transmisión

Incide un haz de luz no polarizada sobre un polarizador con su eje de transmisión en la dirección vertical como se muestra en la figura.

La luz incidente cuyo vector tiene su campo eléctrico \vec{E} en la dirección de del eje de transmisión es transmitida, mientras que el resto es absorbida. Se obtiene luz linealmente polarizada.



Sistema polarizador –analizador: ley de Malus

Dos películas polarizadoras sucesivas, con sus ejes de transmisión girados un ángulo θ .

Por el polarizador pasa una intensidad I_0 (mitad de la incidente), con su campo eléctrico \vec{E} en la dirección del eje de transmisión de la primera película.

La componente del campo eléctrico en la dirección del eje de transmisión de la segunda película es $E \cos \theta$

Como la intensidad es proporcional a E^2 se transmitirá una intensidad

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad \text{Ley de Malus}$$

Si $\theta = 90^\circ$ (ejes de transmisión del polarizador y del analizador cruzados) no habrá luz transmitida ($I=0$)

Polarización por dispersión

Algunas partículas o moléculas absorben y vuelven a radiar (dispersar) energía luminosa.

La energía dispersada se sustrae del haz incidente

La luz dispersada en direcciones perpendiculares a la de incidencia está polarizada

Ejemplos:

Las moléculas de aire en la atmósfera terrestre dispersan la luz del sol. La intensidad de la luz dispersada aumenta con la frecuencia (se dispersa en mayor medida el azul que el rojo)

Razón por la cual la luz solar que percibimos está parcialmente polarizada (razón por la que se utilizan filtros polarizadores en fotografía)

Razón por la cual vemos el cielo azul (nos llega luz dispersada). Si no lo veríamos negro

Razón por la cual los atardeceres son anaranjados. (percibimos la luz reflejada en las nubes, luz que ha atravesado una gran distancia a través de la atmósfera terrestre, y de las que han sido sustraídas las componentes azules)

Polarización por birrefringencia o doble refracción

Fenómeno que se presenta en la calcita y otros cristales y materiales. Son materiales homogéneos pero anisótropos: la velocidad de propagación de la luz en ellos varía según la dirección de propagación.

Un rayo de luz que incide normalmente sobre un cristal birrefringente se separa en dos rayos de luz, polarizados en direcciones perpendiculares: el rayo ordinario: no se desvía y el rayo extraordinario: se desvía

Existe una dirección (eje óptico) a lo largo del cristal en la que ambos rayos se propagan con igual velocidad.

Cuando la luz incide normal a la lámina pero con la dirección del eje óptico no ocurre nada inusual (los dos rayos se propagan en la misma dirección y con igual velocidad).



Cuando incide normal a la lámina pero formando ángulo con el eje óptico los rayos se propagan en distintas direcciones y con distintas velocidades.

Cuando incide normal a la lámina y perpendicular al eje óptico los dos rayos se propagan en la misma dirección pero con velocidades diferentes, por lo que emergen con una cierta diferencia de fase que depende del espesor de la placa y de la longitud de onda de la radiación incidente (el número de longitudes de onda contenidos en la placa es distinto para los dos rayos).

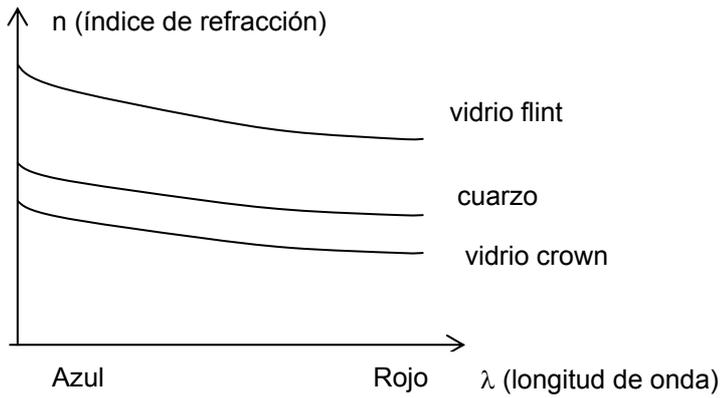
Una lámina cuarto de onda tiene un espesor y está construida con un material que hace que las ondas emerjan (rayos ordinario y extraordinario) con una diferencia de fase de 90° y por tanto la onda resultante (radiación emergente) está polarizada circularmente.

Si salen desfasados 180° , lámina de media onda, la superposición de los dos da lugar a una radiación polarizada linealmente.

23.13 Dispersión:

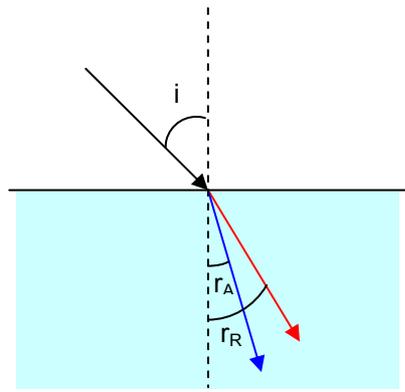
Es la dependencia del índice de refracción de una sustancia con la longitud de onda y por tanto con la frecuencia de la luz. El único medio no dispersivo es el vacío.

Como puede verse en la figura, el índice de refracción de diversos materiales utilizados en óptica, disminuye ligeramente al aumentar la longitud de onda.



Al incidir, desde el aire ($n=1$), en un medio dispersivo, un haz de luz formada por diferentes radiaciones de distintas longitudes de onda, la luz roja λ_{Rojo} es la que se refracta con mayor ángulo que la azul λ_{Azul} . Esto es debido a que al aplicar la ley de la refracción:

$$\left. \begin{aligned} \text{sen } i &= n_R \cdot \text{sen } r_R = n_A \cdot \text{sen } r_A \\ \lambda_{\text{Rojo}} &> \lambda_{\text{Azul}}; n_{\text{Rojo}} < n_{\text{Azul}} \end{aligned} \right\} r_{\text{Rojo}} > r_{\text{Azul}}$$



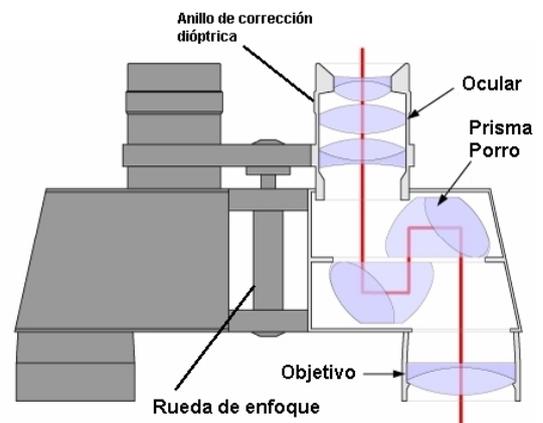
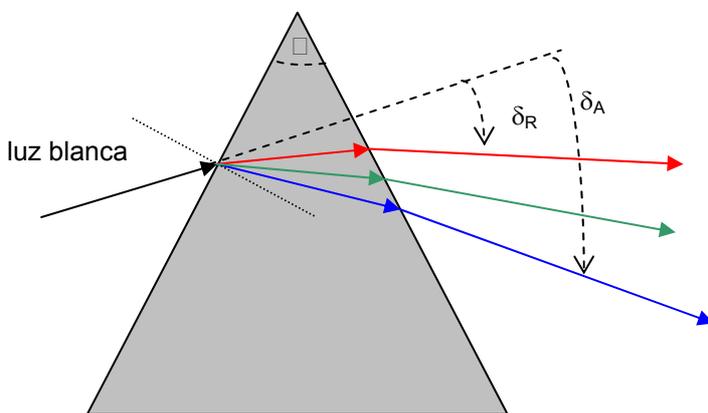
Para estudiar la dispersión se utiliza el *prisma óptico* (medio transparente limitado por dos caras planas no paralelas que forman un ángulo α denominado ángulo del prisma).

Al incidir luz blanca sobre el prisma, las diferentes radiaciones que la componen emergen con distinta desviación dando lugar al *espectro* de la luz blanca que puede ser recogida en una pantalla.

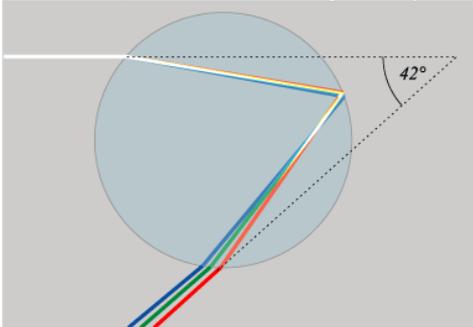
El ángulo de desviación δ es característico de cada longitud de onda.

El prisma es el espectroscopio más sencillo. Un espectroscopio es un dispositivo capaz de dispersar la luz formando un espectro.

Los prismas se pueden utilizar para dispersar la luz como acabamos de explicar o para desviarla, como por ejemplo ocurre en los prismáticos.



El arco iris se forma al incidir la luz solar en las gotas de agua y como consecuencia del efecto combinado de la refracción, la reflexión total y la dispersión.



23.14 Problemas resueltos.

Problema 1

En un experimento de interferencias luminosas con doble rendija, la separación entre las rendijas es de 0,5 mm y la luz utilizada tiene una frecuencia de 6×10^{14} Hz. Determinar, explicando los pasos a seguir y efectuando el esquema correspondiente:

- A qué distancia del plano de las rendijas se debe colocar una pantalla para que las franjas de interferencia brillantes observadas estén separadas 10 mm.
- ¿En qué posiciones, referidas al punto de la pantalla que equidista de ambas rendijas, se forman la 1ª y la 4ª franjas oscuras.

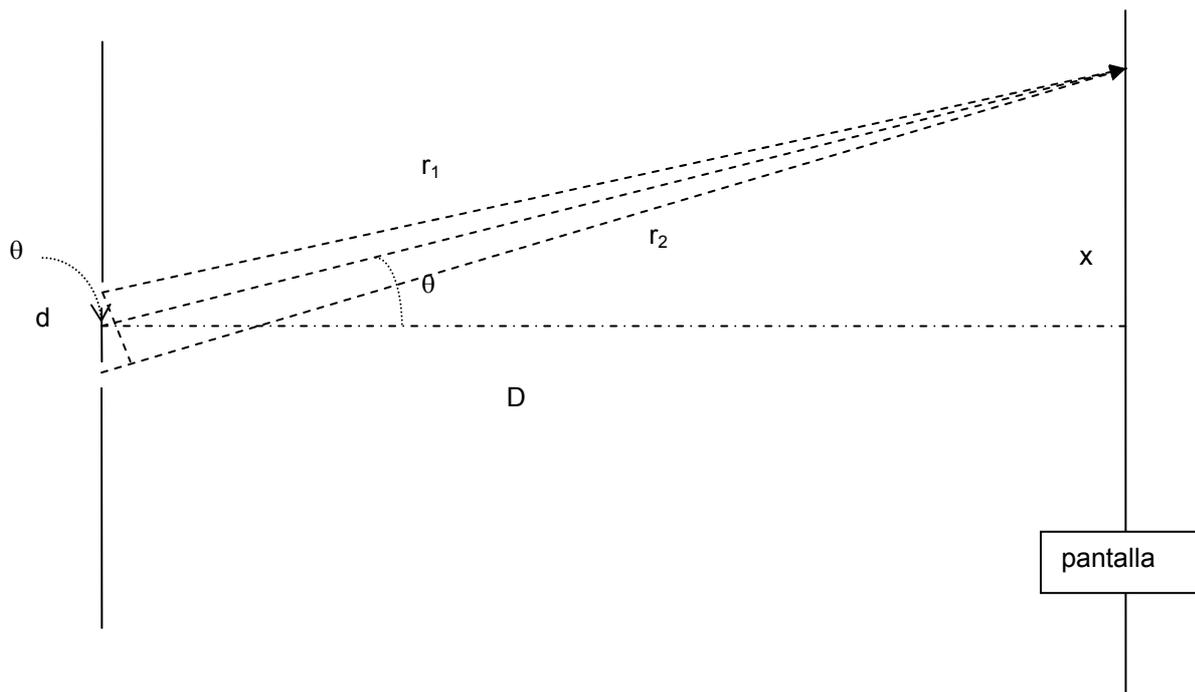
Dato: $c = 3 \times 10^8$ m/s

Experimento de interferencias con doble rendija

$$d = 0,5 \text{ mm}$$

$$\nu = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^{14}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$



Máximos de interferencia. Posiciones sobre la pantalla

$$r_2 - r_1 = m\lambda$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{sen } \theta = \frac{r_2 - r_1}{d}$$

$$\text{sen } \theta \approx \text{tg } \theta = \frac{X}{D}$$

$$d \cdot \text{sen } \theta = m\lambda$$

$$d \cdot \frac{X_{\text{Max}}}{D} = m\lambda \Rightarrow X_{\text{Máx}} = m \cdot \frac{D}{d} \cdot \lambda$$

$$m = 0 \quad \text{Máximo central } (X_{\text{Máx}})_{\text{centr}} = 0$$

$$m = 1 \quad \text{Primer máximo } (X_{\text{Máx}})_1 = \frac{D}{d} \lambda \text{ (ambos lados del centro)}$$

$$m = 2 \quad \text{Segundo máximo } (X_{\text{Máx}})_2 = 2 \cdot \frac{D}{d} \lambda$$

Distancia entre próximos consecutivos: $\Delta X = \frac{D}{d} \lambda$

a)

$$\Delta X = 10 \text{ mm}$$

$$D = \frac{\Delta X \cdot d}{\lambda} = \frac{10 \cdot 0,5}{5 \cdot 10^{-4}} = 10^4 \text{ mm} = 10 \text{ m}$$

b) 1ª y 4ª franjas oscuras

$$\text{Mínimos: } r_2 - r_1 = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$d \cdot \text{sen } \theta = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$d \cdot \frac{X_{\text{Mín}}}{D} = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow X_{\text{Mín}} = (2m + 1) \cdot \frac{D}{d} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

1º Primer mínimo $m = 0$

(1ª franja)

$$(X_{\text{Mín}})_1 = \frac{D}{d} \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm}$$

4º mínimo $m = 3$

$$(X_{\text{Mín}})_4 = 7 \cdot \frac{D}{d} \cdot \frac{\lambda}{2} = 35 \text{ mm}$$

23.15 Problemas propuestos.

Problema 1

Una fuente luminosa emite 500 W de luz con una longitud de onda de 450 nm ¿Cuántos fotones por segundo están saliendo de la fuente? ¿Cuál es la frecuencia de la radiación emitida?

Problema 2

Un haz de luz paralelo incide (desde el aire) sobre una sustancia transparente con un ángulo de 56° respecto a la normal, parte del haz se refleja y la otra es refractada. Se observa que los haces reflejado y refractado son mutuamente perpendiculares. ¿Cuál es el índice de refracción de la sustancia transparente? ¿Cuál es el ángulo límite en la discontinuidad?

Problema 3

El ángulo crítico de la luz en cierta sustancia (en el aire) es 38° . ¿Cuál es el ángulo de polarización?

Problema 4

Un haz de luz natural incide con un ángulo desconocido sobre una superficie de agua. ¿Cuál es el valor del ángulo de incidencia si el haz reflejado está polarizado linealmente en su totalidad? ¿Cuál es el ángulo de refracción del haz transmitido?

Problema 5

¿Qué es el espectro de radiación electromagnética? Ordenar dicho espectro según valores crecientes de la frecuencia de la radiación, indicando el nombre de las diferentes regiones del mismo.

Considerando los límites de las siguientes regiones del espectro:

microondas: $109 \text{ Hz} \rightarrow 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$; *visible*: $4 \times 10^{14} \text{ Hz} \rightarrow 8 \times 10^{14} \text{ Hz}$; *ultravioleta*: $8 \times 10^{14} \text{ Hz} \rightarrow 3 \times 10^{17} \text{ Hz}$;

Obtener los valores de la longitud de onda en el vacío λ_0 y la energía del fotón (en julios y en electrónvoltios) correspondientes a dichos límites.

Datos: $1 \text{ eV} = 1,621 \times 10^{-19} \text{ J}$; constante de Plank $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Problema 6

Una onda electromagnética armónica de frecuencia $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (luz roja) se propaga según el sentido positivo del eje X. Hallar una expresión matemática para el vector campo eléctrico \vec{E} si la onda está polarizada en el plano $x=y$, la amplitud del campo eléctrico es 30 V/m y se propaga en el vacío ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Problema 7

Se utiliza una radiación monocromática de frecuencia $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (luz roja) para generar interferencias en

Un experimento de doble rendija de Young,

Si las rendijas están separadas entre sí $0,4 \text{ mm}$ y la pantalla donde se observan las interferencias está situada a 12 m del plano de las rendijas, determinar:

- La separación entre dos franjas oscuras consecutivas.
- En qué posiciones, referidas al punto de la pantalla que equidista de ambas rendijas, se forman:
 - La tercera franja brillante.
 - La cuarta franja oscura.