

NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

Contenido:

1. Naturaleza de la luz
2. Velocidad de la luz
3. Frentes de ondas y rayos
4. Índice de refracción
5. Longitud de onda
6. Reflexión y Refracción
7. Reflexión total
8. Desviación
9. Espectro electromagnético
10. Dispersión
11. Prisma
12. Polarización
13. Polarización por reflexión
14. Doble refracción
15. Polarización circular y elíptica
16. Dispersión luminosa
17. Principio de Huygens

Naturaleza de la luz

Teoría Corpuscular

Newton, en el siglo XVII, mantenía la teoría que la luz consistía en una corriente de corpúsculos que salían con cierta velocidad de una fuente y se alejaban en línea recta, por lo cual formaba una sombra detrás de los objetos.

Estos corpúsculos podían penetrar en las sustancias transparentes y reflejarse en la superficie de los cuerpos opacos. Los distintos colores de debían a los distintos tamaños de los corpúsculos.

Teoría Ondulatoria

A mediados del siglo XVII, Huygens mantuvo la teoría que la luz era una onda. Demostró que la reflexión y la refracción podían explicarse con la teoría ondulatoria. Sin embargo, no podía demostrar que siendo un movimiento ondulatorio no se observaba la difracción.

Grimaldi, en aquella época, observó el fenómeno de difracción de la luz, pero sus observaciones no fueron comprendidas en ese momento.

En el siglo XIX, mediante experimentos de Young y Fresnel sobre interferencia de la luz, se demostraron que existían fenómenos ópticos para cuya explicación era inadecuada la teoría corpuscular. Los experimentos de Young permitieron medir las longitudes de onda de las ondas luminosas, y Fresnel demostró que la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de los objetos, por eso la difracción, ya observada por Grimaldi, es muy pequeña y no se nota.

Teoría electromagnética

A finales del siglo XIX Maxwell afirmó que la luz consistía en ondas electromagnéticas de longitud de onda muy pequeña, e hizo un cálculo de cuanto debería ser su velocidad, resultando 300.000.000 m/s. Este valor coincidía con la velocidad de la luz determinada experimentalmente hasta la fecha.

Luego de 15 años, Hertz logró producir ondas de corta longitud de onda, de origen electromagnético, y demostró que poseían todas las propiedades de las ondas luminosas.

Teoría del cuerpo negro

La teoría electromagnética no podía explicar el fenómeno de la emisión fotoeléctrica, que consistía en la expulsión de electrones de un conductor por la luz que incidía sobre su superficie.

Planck, en el 1.900, lanzó una idea, ampliada en el 1.905 por Einstein, que la energía de un haz luminoso está concentrada en pequeños paquetes o fotones. El fotón tenía una frecuencia y su energía era proporcional a ella. El fenómeno fotoeléctrico consistía en la transmisión de energía de un fotón a un electrón.

Experimentos de Millikan demostraron que la energía de los fotones coincidía con la fórmula de Einstein.

El efecto Compton demostró que la luz está formada por fotones. Compton, en el 1.921, demostró que la energía cinética y la cantidad de movimiento, antes y después del choque entre un fotón y un electrón, se conservaban, como si se trataban de cuerpos materiales.

Esta teoría parece exigir la vuelta a la teoría corpuscular.

Punto de vista actual

Los físicos, enfrentados ante experimentos aparentemente contradictorios, aceptan el hecho que la luz parece tener doble naturaleza.

Los fenómenos de propagación de la luz se explican mejor con la teoría ondulatoria electromagnética, mientras, la acción mutua entre la luz y la materia, en los procesos de absorción y emisión, se explican con la teoría corpuscular

Velocidad de la luz

Sin importar cual sea la fuente, la radiación electromagnética viaja en el vacío a la rapidez de la luz. La primera demostración de que la rapidez de la luz no es infinita fue realizada en 1676 por el astrónomo danés Ole Romer, con base en observaciones del movimiento de uno de los satélites de Júpiter. La primera medición terrestre satisfactoria de la rapidez de la luz fue efectuada por el científico francés Armand Fizeau en 1849, usando un haz luz reflejado interrumpido por un disco rotario con muescas. Jean Foucault, en Francia, y Albert Michelson, en Estados Unidos, llevaron a la práctica versiones más refinadas de este experimento en el siglo XIX.

Con base en el análisis de todas las mediciones efectuadas hasta 1983, el valor más probable para la rapidez de la luz es: $c = 299.792.458$ m/s.

En conclusión, la luz es una onda electromagnética, no necesita de medio para propagarse. La velocidad de la luz en el vacío “c” tiene un valor aproximado de 300.000.000 m/s.

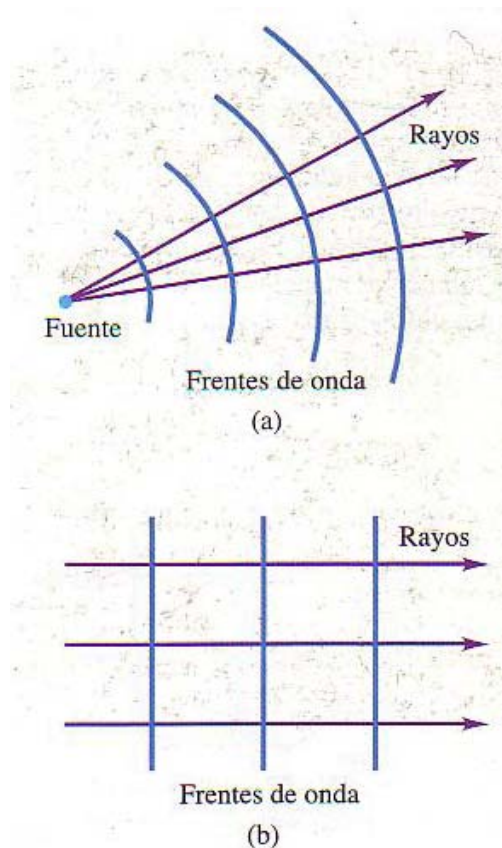
Velocidad de la luz en el vacío (algunas mediciones)				
Fecha	Experimentador	País	Método	Velocidad (m/s)
1667	Galileo	Italia	Linternas y persianas	Método fallido. Extraordinariamente rápida
1676	Roemer	Francia	Satélites de Júpiter	Finita. Mayor a $2 \cdot 10^8$ m/s
1729	Bradley	Inglaterra	Aberración luz de las estrellas	304.000.000
1849	Fizeau	Francia	La rueda dentada	313.300.000
1862	Foucault	Francia	El espejo giratorio	298.000.000
1880	Michelson	E.U.	El espejo giratorio	299.910.000
1906	Rosa y Dorsey	E.U.	La teoría electromagnética	299.781.000
1923	Mercier	Francia	Ondas estacionarias en alambres	299.782.000
1926	Michelson	E.U.	El espejo giratorio	299.796.000
1950	Bergstrand	Suecia	El geodímetro	299.792.700
1950	Essen	Inglaterra	La cavidad de microondas	299.792.500
1950	Bol y Hansen	E.U.	La cavidad de microondas	299.789.300
1951	Aslakson	E.U.	El radar Shoran	299.794.200
1952	Rank	E.U.	Los espectros moleculares	299.766.000
1952	Froome	Inglaterra	El interferómetro de microondas	299.792.600
1958	Froome	Inglaterra	El interferómetro de microondas	299.792.500
1967	Grosse	Alemania	El geodímetro	299.792.500
1973	Evenson	E.U.	Las técnicas del láser	299.792.458
1978	Woods	Inglaterra	Las técnicas del láser	299.792.458
1987	Jennings	E.U.	Las técnicas del láser	299.792.458

Velocidad de la luz (algunos materiales) en luz amarilla ($\lambda = 589 \text{ nm}$)	
Material	Velocidad (m/s)
Vacío	300.000.000
Aire	300.000.000
Agua	226.000.000
Solución de azúcar (50%)	211.000.000
Vidrio refractario	197.000.000
Diamante	124.000.000

Frentes de ondas y Rayos

Un frente de onda es el lugar geométrico de todos los puntos adyacentes en los cuales la fase de vibración de una magnitud física, asociada con la onda, es la misma. Es decir, en cualquier instante, todos los puntos de un frente de onda están en la misma parte de su ciclo de variación.

Para describir las direcciones de propagación de la luz suele ser conveniente representar mediante rayos. En la teoría corpuscular, los rayos son las trayectorias de las partículas. Desde el punto de vista ondulatorio, un rayo es una línea imaginaria a lo largo de la dirección de propagación de la luz.



Optica Geométrica y Optica Física

La rama de la óptica en la cual la descripción de rayos resulta adecuada se conoce como Óptica Geométrica, en tanto, la rama que se ocupa del comportamiento ondulatorio se llama Óptica Física.

Indice de refracción

La velocidad de la luz en una sustancia material es menor que su velocidad en el vacío. La razón de la velocidad de la luz en el vacío a la velocidad de la luz en otra sustancia, se llama Índice de refracción “n”.

$$n = c / v$$

La velocidad de la luz en un gas es aproximadamente igual a su velocidad en el vacío, por esto, puede admitirse que la velocidad de la luz en el aire es igual a su velocidad en el vacío, y el índice de refracción del aire es $n = 1$

En consecuencia, el índice de refracción de un material es mayor que el índice de refracción del aire.

Longitud de onda

La frecuencia de la onda no cambia al pasar de un material a otro. La longitud de onda es diferente, es general, en los distintos materiales.

$\lambda_0 = c / f$ longitud de onda de la luz en el vacío

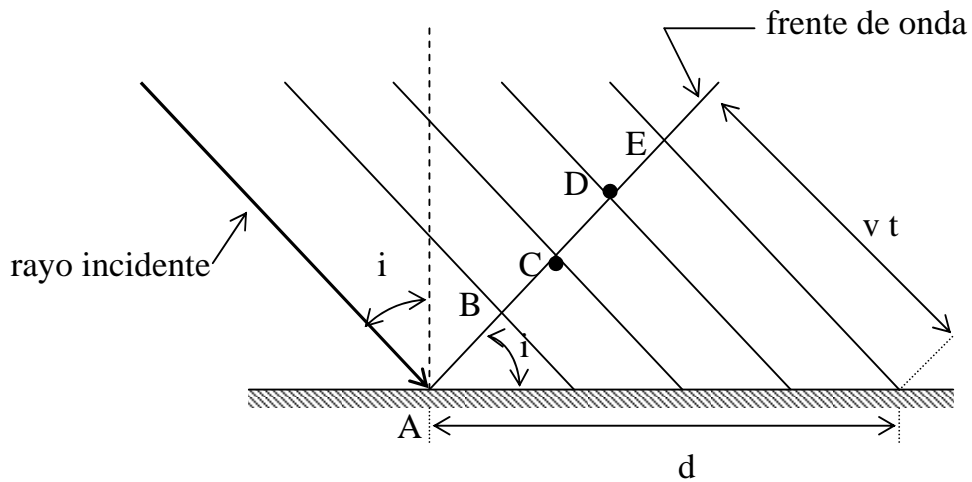
$\lambda = v / f$ longitud de onda en un material

$$\lambda_0 / \lambda = c / v = n$$

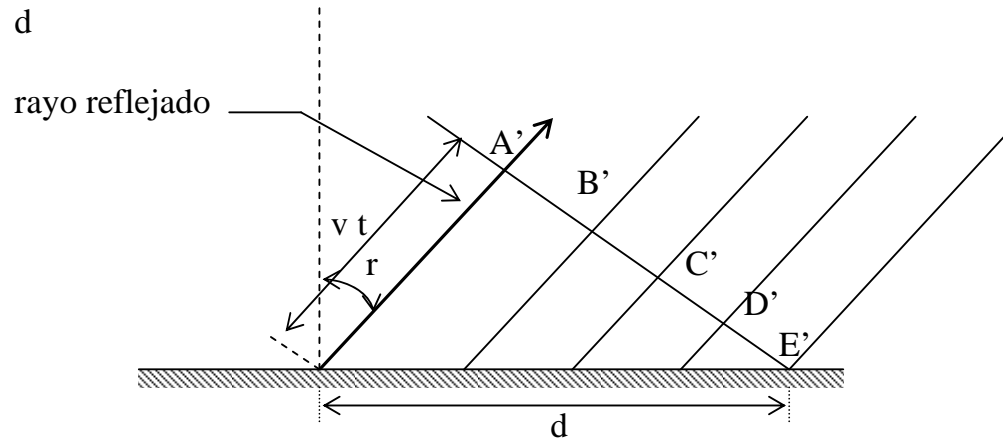
$$\lambda = \lambda_0 / n$$

En consecuencia, la longitud de onda de la luz en un material es menor que la longitud de onda de la luz en el vacío.

Reflexión



$$\sin i = \frac{v t}{d} \dots\dots (1)$$



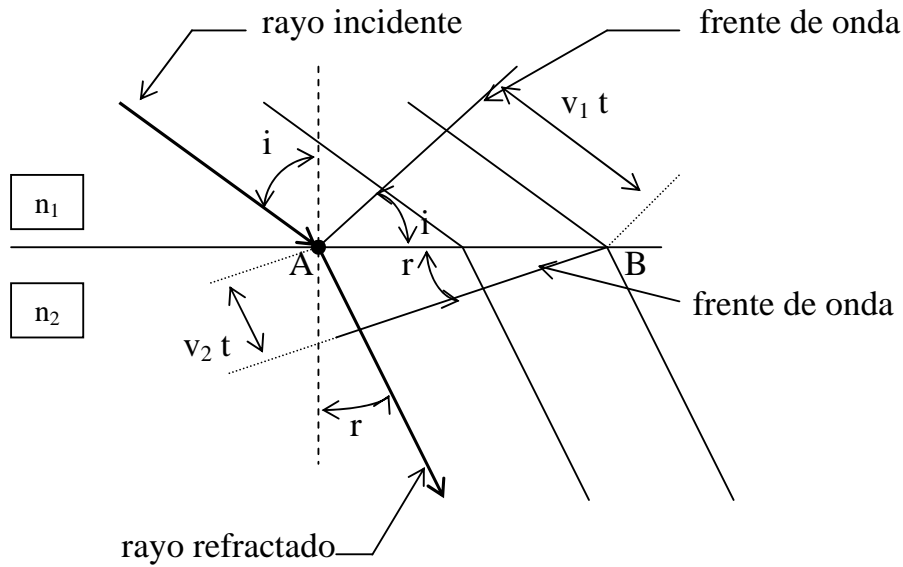
$$\sin r = \frac{v t}{d} \dots\dots (2)$$

De (1) y (2): $\sin i = \sin r$

$$\boxed{i = r} \dots\dots \text{Primera Ley de Snell}$$

El ángulo de incidencia “ i ” es igual al ángulo de reflexión “ r ”

Refracción



$$\sin i = \frac{v_1 t}{AB} \dots\dots(1)$$

$$\sin r = \frac{v_2 t}{AB} \dots\dots (2)$$

i: ángulo de incidencia

r: ángulo de refracción

De (1) y (2):
$$\frac{v_1 t}{\sin i} = \frac{v_2 t}{\sin r}$$

$$(v_1 \sin r = v_2 \sin i) / C$$

$$\frac{\sin r}{n_1} = \frac{\sin i}{n_2}$$

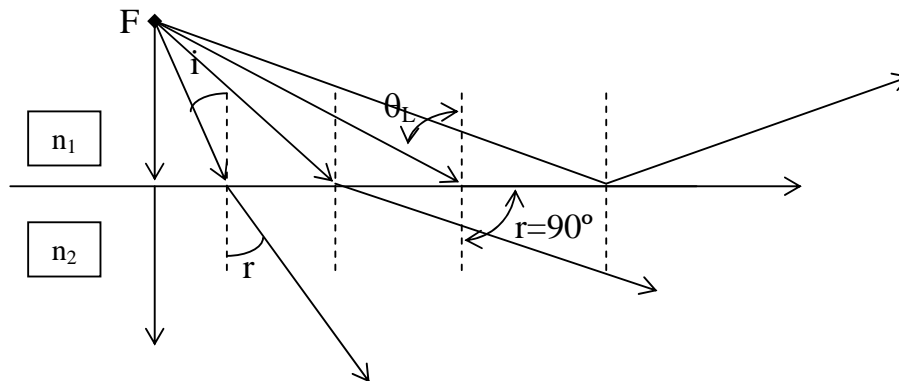
$$\boxed{n_1 \sin i = n_2 \sin r} \dots\dots \text{Segunda Ley de Snell}$$

Leyes de reflexión y refracción

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a su superficie, están en un mismo plano.
2. El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales.
3. La razón entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción, medidos desde la normal a la superficie, es igual a la razón inversa de los índices de refracción.

Reflexión total

Un cierto número de rayos salen de una fuente “F” situada en un medio “ n_1 ”, e inciden en la superficie que separa de otro medio “ n_2 ”, como se muestra en la figura, tal que: “ $n_1 > n_2$ ”



Si “ $n_1 > n_2$ ”, entonces “ $i < r$ ”. A medida que aumenta el valor de “ i ”, mayor aumento tiene “ r ”. El ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge tangente a la superficie de separación ($r = 90^\circ$), se llama “Ángulo Límite” (θ_L) o también ángulo crítico.

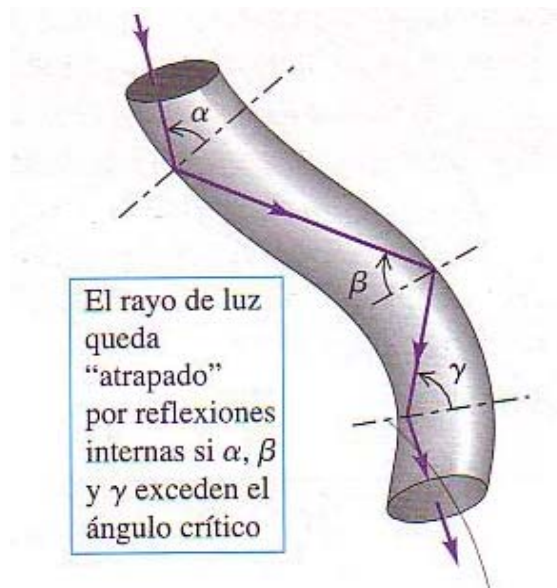
$$n_1 \sen \theta_L = n_2 \sen 90^\circ$$

$$\sen \theta_L = \frac{n_2}{n_1}$$

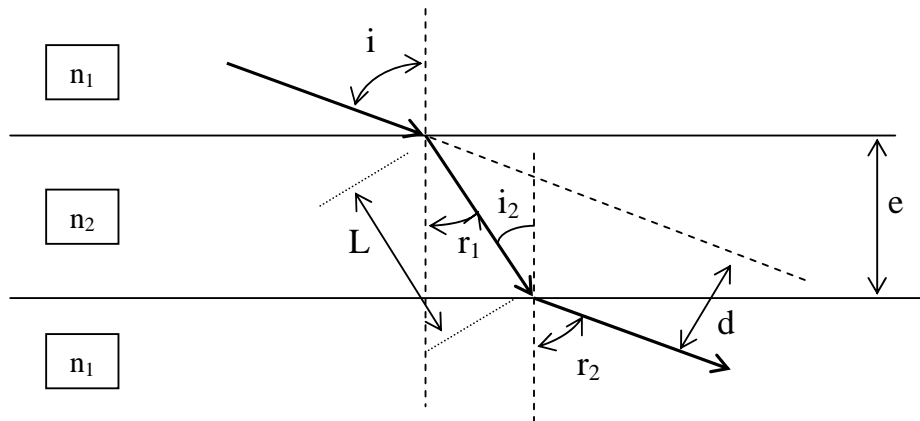
Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, el rayo es reflejado totalmente en la superficie de separación.

La reflexión total solo puede tener lugar cuando un rayo incide sobre la superficie de un medio cuyo índice de refracción es menor que el del medio en el cual se está propagando.

Ejemplo: fibras ópticas



Refracción en láminas de caras paralelas (Desviación)



$$n_1 \sen i = n_2 \sen r_1 \dots\dots (1)$$

$$n_2 \sen i_2 = n_1 \sen r_2 \dots\dots (2)$$

$$r_1 = i_2 \dots\dots (3)$$

(3) en (2): $n_2 \sen r_1 = n_1 \sen r_2 \dots\dots (4)$

De (1) y (4): $i = r_2$

Si “ $i = r_2$ ”, el rayo emergente es paralelo al incidente, y desplazado una distancia “ d ”.

Llamamos: $r_1 = i_2 = r$

$$d = L \sen (i - r) \dots\dots (5)$$

$$e = L \cos r$$

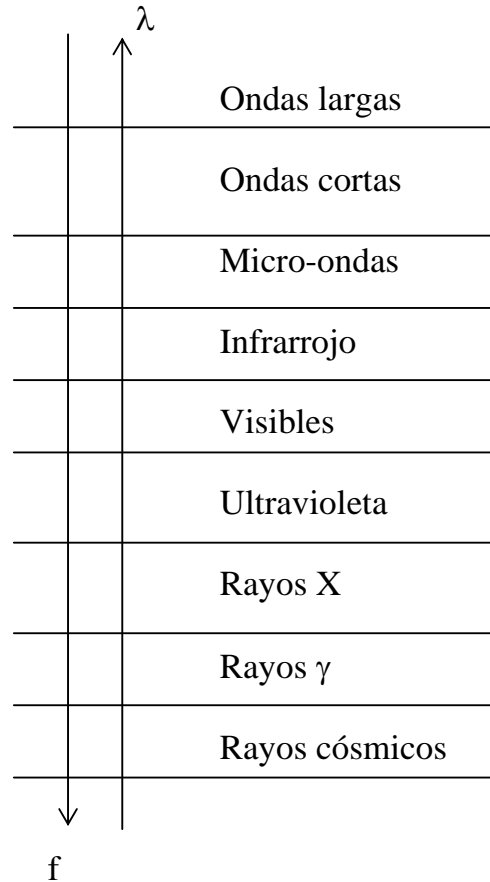
$$L = \frac{e}{\cos r} \dots\dots (6)$$

(6) en (5):

$$d = e \frac{\sen (i - r)}{\cos r}$$

Espectro electromagnético

La longitud de las ondas electromagnéticas capaces de impresionar el sentido de la vista, varía entre 4.000 \AA y 7.800 \AA , aproximadamente.



λ : longitud de onda de la luz

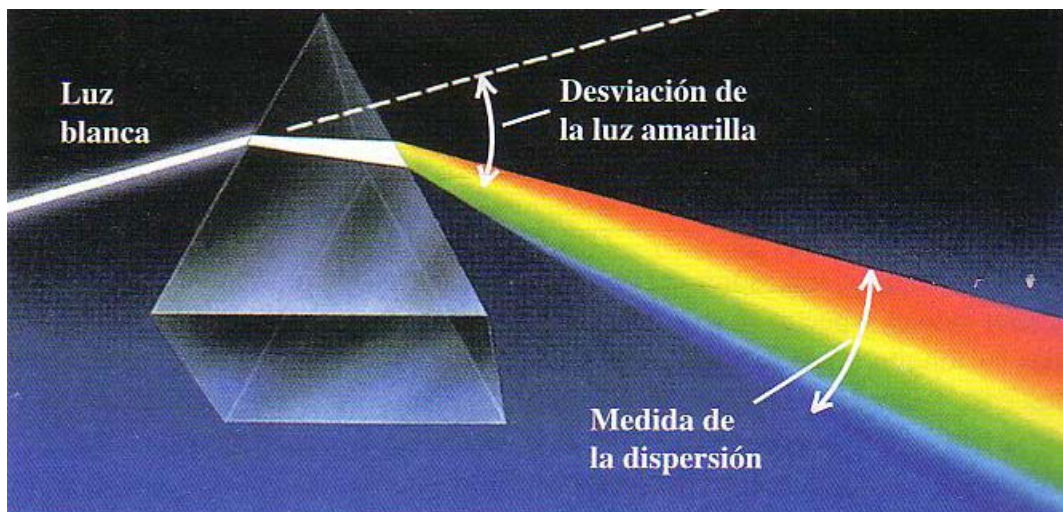
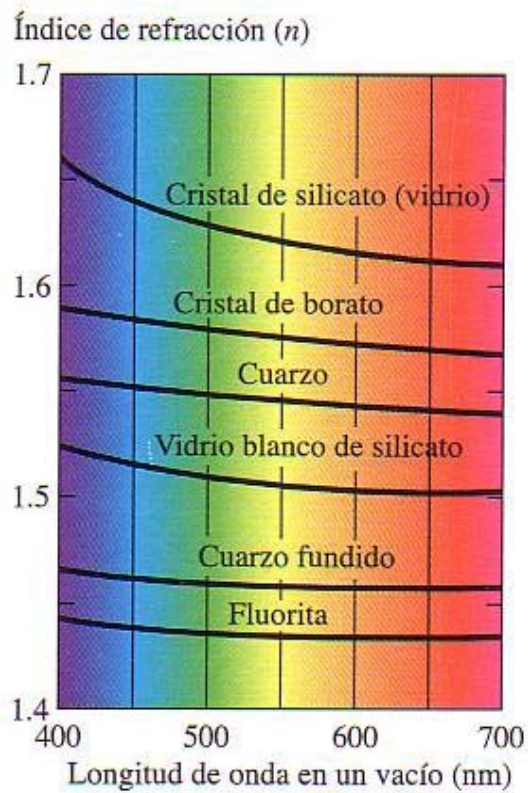
f : frecuencia de la luz

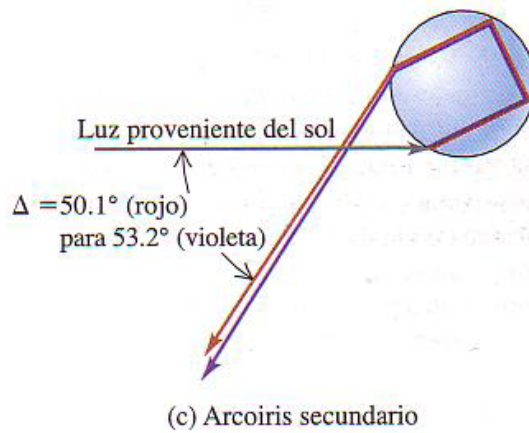
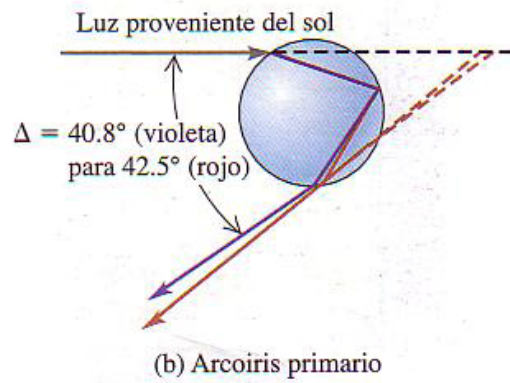
Dispersión

La luz blanca ordinaria es una superposición de ondas con longitudes de onda que abarcan todo el espectro visible.

La luz de cualquier longitud de onda se propaga con igual velocidad en el vacío, en tanto, la velocidad en una sustancia material es diferente para las distintas longitudes de onda.

Como consecuencia, los índices de refracción de un mismo material son diferentes para ondas de diferentes longitudes de onda. Este efecto se llama “Dispersión”





Refracción en un prisma

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r_1$$

$$n_2 \sin r_2 = n_1 \sin e$$

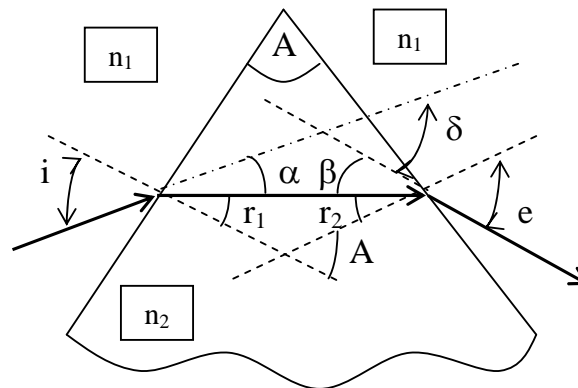
$$A = r_1 + r_2$$

$$\alpha = i - r_1$$

$$\beta = e - r_2$$

$$\delta = \alpha + \beta = i - r_1 + e - r_2 = i + e - (r_1 + r_2)$$

$$\delta = i + e - A$$



Desviación mínima en un prisma

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r_1 \dots\dots (1)$$

$$n_2 \sin r_2 = n_1 \sin e \dots\dots (2)$$

$$A = r_1 + r_2 \dots\dots (3)$$

$$\delta = i + e - A \dots\dots (4)$$

$$\frac{d\delta}{di} = 1 + \frac{de}{di} = 0 \longrightarrow \frac{de}{di} = -1 \dots\dots (5)$$

$$0 = \frac{dr_1}{di} + \frac{dr_2}{di} \longrightarrow \frac{dr_2}{di} = - \frac{dr_1}{di} \dots\dots (6)$$

$$n_1 \cos i = n_2 \cos r_1 \frac{dr_1}{di} \dots\dots (7)$$

$$n_2 \cos r_2 \frac{dr_2}{di} = n_1 \cos e \frac{de}{di} \dots\dots (8)$$

$$(5) \text{ y } (6) \text{ en } (8): \quad - n_2 \cos r_2 \frac{dr_1}{di} = - n_1 \cos e$$

$$n_1 \cos e = n_2 \cos r_2 \frac{dr_1}{di} \dots\dots (9)$$

$$(7) / (9): \quad \frac{\cos i}{\cos e} = \frac{\cos r_1}{\cos r_2} \dots\dots (10)$$

$$\text{de } (1): \quad n_1^2 \sin^2 i = n_2^2 (1 - \cos^2 r_1)$$

$$n_1^2 \sin^2 i = n_2^2 - n_2^2 \cos^2 r_1$$

$$\cos^2 r_1 = \frac{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}{n_2^2} \dots\dots (11)$$

$$\text{de } (2): \quad n_1^2 \sin^2 e = n_2^2 (1 - \cos^2 r_2)$$

$$n_1^2 \sin^2 e = n_2^2 - n_2^2 \cos^2 r_2$$

$$\cos^2 r_2 = \frac{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 e}{n_2^2} \dots\dots (12)$$

$$(11) \text{ y } (12) \text{ en } (10): \frac{\cos^2 i}{\cos^2 e} = \frac{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 e}$$

$$n_2^2 \cos^2 i - n_1^2 \sin^2 e \cos^2 i = n_2^2 \cos^2 e - n_1^2 \sin^2 i \cos^2 e$$

$$n_2^2 \cos^2 i - n_1^2 (1 - \cos^2 e) \cos^2 i = n_2^2 \cos^2 e - n_1^2 \sin^2 i \cos^2 e$$

$$n_2^2 \cos^2 i - n_1^2 \cos^2 i + n_1^2 \cos^2 e \cos^2 i = n_2^2 \cos^2 e - n_1^2 \sin^2 i \cos^2 e$$

$$n_2^2 \cos^2 i - n_1^2 \cos^2 i = n_2^2 \cos^2 e - n_1^2 \sin^2 i \cos^2 e - n_1^2 \cos^2 e \cos^2 i$$

$$(n_2^2 - n_1^2) \cos^2 i = (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i - n_1^2 \cos^2 i) \cos^2 e$$

$$(n_2^2 - n_1^2) \cos^2 i = [n_2^2 - n_1^2 (\sin^2 i + \cos^2 i)] \cos^2 e$$

$$(n_2^2 - n_1^2) \cos^2 i = (n_2^2 - n_1^2) \cos^2 e$$

$$\cos^2 i = \cos^2 e$$

$$\text{Luego: } \underline{i = e}$$

$$\text{Si "i = e": } r_1 = r_2 = r$$

Fórmulas de refracción en un prisma para el caso de desviación mínima

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

$$A = 2 r$$

$$\delta_{\min} = 2 i - A$$

Si llamamos “ n_p ” al índice de refracción del prisma y “ n_e ” al índice de refracción del medio externo:

$$n_e \sin i = n_p \sin r$$

$$\frac{n_p}{n_e} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

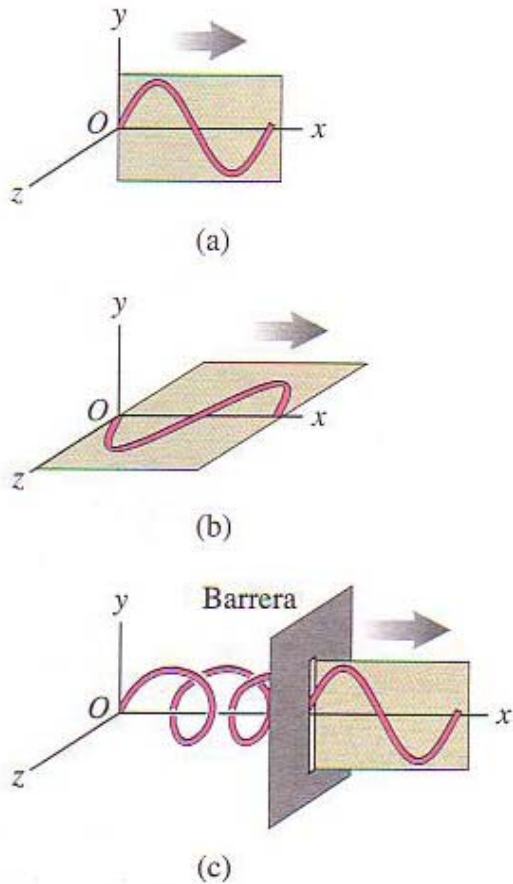
$$\frac{n_p}{n_e} = \frac{\sin \left[\frac{\delta_{\min} + A}{2} \right]}{\sin \left[\frac{A}{2} \right]}$$

Polarización

La polarización es una característica de todas las ondas transversales. En el caso de una cuerda que cuyos desplazamientos se producen a lo largo del eje “y” y la onda se propaga a lo largo del eje “x”, la cuerda siempre se halla en el plano “xy”. De igual manera, la cuerda se halla en el plano “xz” cuando los desplazamientos se producen en el eje “z” y la onda se propaga en el eje “x”.

Cuando la onda tiene solo desplazamientos en el eje “y” se dice que está linealmente polarizada en la dirección “y”, y si la onda tiene desplazamientos solo en “z” se dice que está linealmente polarizada en la dirección “z”.

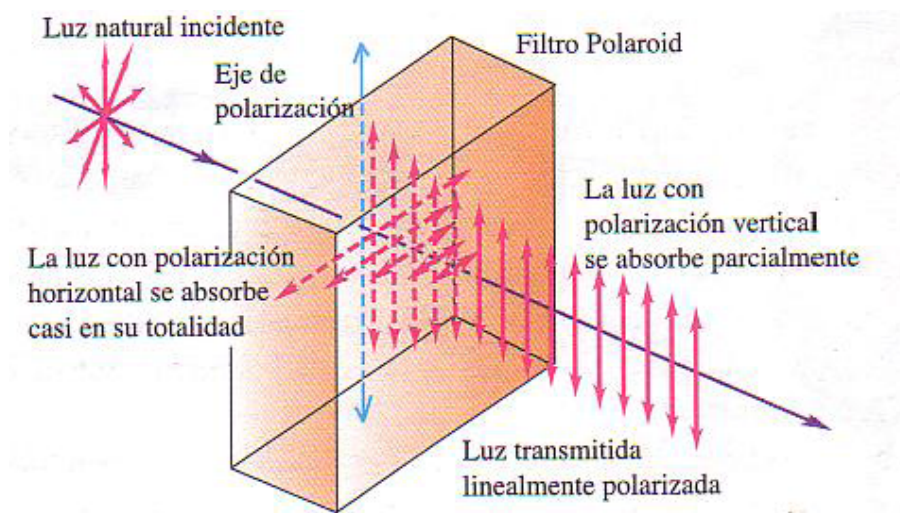
En el caso de las ondas mecánicas se puede construir un filtro polarizador que permite el paso de ondas con cierta dirección de polarización. En el caso de la figura, la cuerda puede deslizarse verticalmente en la ranura, pero todo movimiento horizontal es imposible. El filtro deja pasar las ondas polarizadas en la dirección “y” e impide el paso de las que están polarizadas en la dirección “z”.



Filtros polarizadores

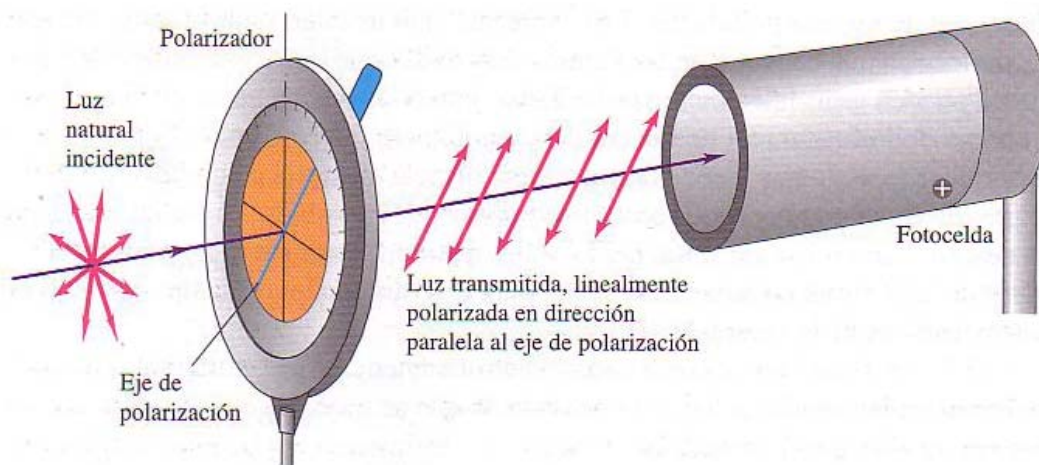
La situación es diferente en el caso de la luz visible. La luz proveniente de fuentes ordinarias (bombillas eléctricas incandescentes, fluorescente, etc) no están polarizadas. Toda fuente de real luz es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles. Este tipo de luz se llama luz no polarizada o luz natural.

Para crear luz polarizada a partir de una luz natural se necesita de un filtro polarizador. El filtro polarizador más común para la luz visible es un material llamado Polaroid (se usa frecuentemente en lentes de sol y lentes fotográficos). Un filtro polaroid transmite el 80 % o más de la intensidad de las ondas polarizadas paralelamente a cierto eje del material, llamado eje de polarización, y solo el 1 % o menos de las ondas que están polarizadas perpendicularmente a dicho eje.



Un filtro polarizador ideal permite el paso del 100 % de la luz incidente que está polarizada en la dirección del eje del polarizador, y bloque totalmente la luz polarizada perpendicularmente al eje.

En la figura una luz no polarizada incide sobre un filtro polarizador plano. El vector de la onda incidente se puede representar en términos de las componentes paralela y perpendicular al eje de polarización. Solo se transmite la componente paralela al eje, por tanto, la luz emergente está linealmente polarizada en la dirección paralela al eje de polarización.

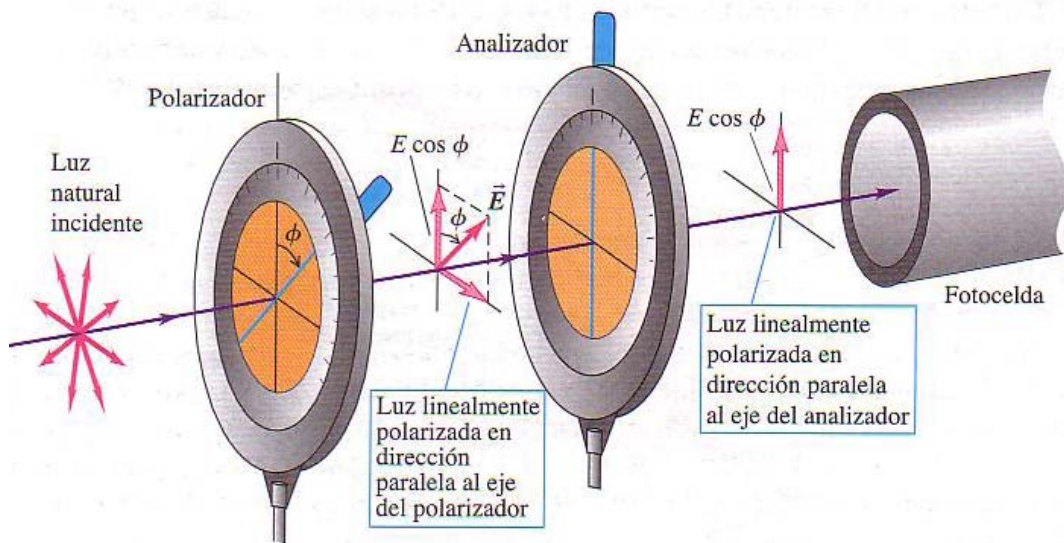


Cuando una luz no polarizada incide en un polarizador ideal, la intensidad de luz polarizada transmitida es la mitad de la intensidad de luz incidente no polarizada, sin importar la dirección del eje del polarización.

Ley de Malus

En la figura, una luz linealmente polarizada que emerge de un polarizador, pasa a través de un segundo polarizador (llamado también analizador), tal que ambos polarizadores forman entre si un ángulo “ θ ”.

La luz linealmente polarizada que ha transmitido el primer polarizador se descompone en sus componentes paralela y perpendicular al eje del analizador. Solo la componente paralela cuya amplitud es “ $E \cos \theta$ ” es transmitida por el segundo polarizador. La intensidad transmitida es máxima cuando “ $\theta = 0^\circ$ ” y es cero cuando “ $\theta = 90^\circ$ ”.



La intensidad de una onda es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda, por tanto, para valores intermedios del ángulo “ θ ”:

$$E = E_{\max} \cos \theta$$

$$I = \text{cte } E^2$$

$$I_{\max} = \text{cte } E_{\max}^2$$

$$I / I_{\max} = E^2 / E_{\max}^2 = E_{\max}^2 \cos^2 \theta / E_{\max}^2 = \cos^2 \theta$$

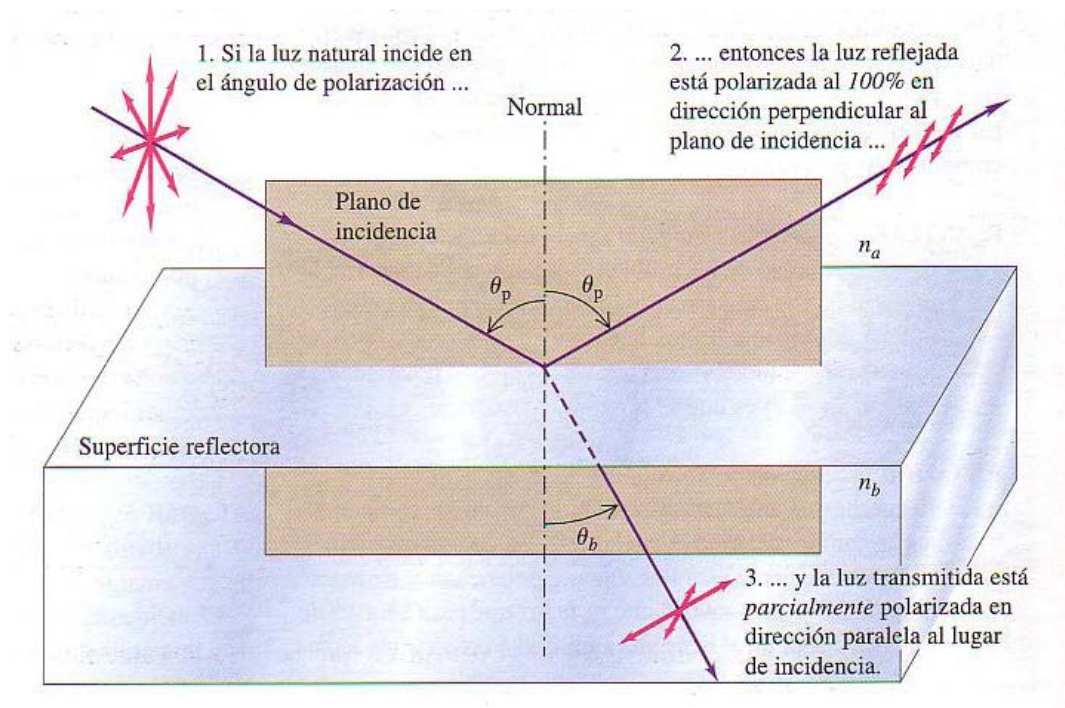
$$I = I_{\max} \cos^2 \theta$$

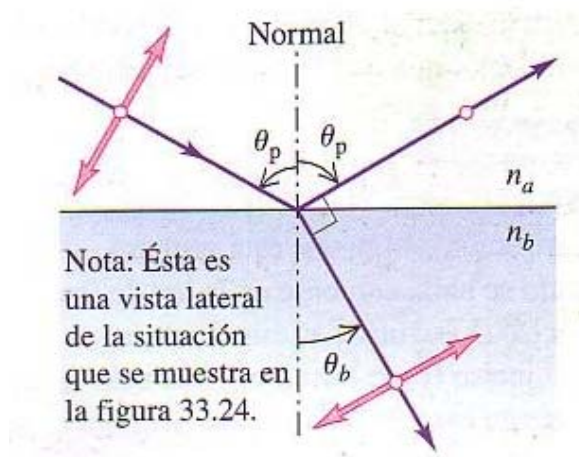
I_{\max} : intensidad de luz transmitida para “ $\theta = 0^\circ$ ”

Polarización por reflexión

Una luz no polarizada se puede polarizar por reflexión en forma parcial o total. Cuando una luz no polarizada incide sobre una superficie reflectora entre dos materiales transparentes, el plano que contiene los rayos incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie, se llama plano de incidencia. Las ondas cuyo vector es perpendicular al plano de incidencia (paralelo a la superficie reflectora) se reflejan con más intensidad que aquellas que están en el plano de incidencia. En este caso, la luz reflejada está parcialmente polarizada en la dirección perpendicular al plano de incidencia.

Para un ángulo de incidencia llamado “ángulo de polarización θ_p ” la luz cuyo vector está en el plano de incidencia no se refleja sino que se refracta en su totalidad. En tanto, del vector perpendicular al plano de incidencia una parte de la luz se refleja y otra parte se refracta. La luz reflejada está totalmente polarizada perpendicular al plano de incidencia. La luz refractada está parcialmente polarizada en la dirección paralela al plano de incidencia, es una mezcla de la componente paralela al plano, refractada totalmente, y el resto de la componente perpendicular.





Ley de Brewster

Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización, el rayo reflejado y el rayo refractado son perpendiculares.

Incidencia: $i = \theta_p$

Refracción: $r = 90 - i = 90 - \theta_p$

Ley de Snell: $n_a \sin i = n_b \sin r$
 $n_a \sin \theta_p = n_b \sin (90 - \theta_p)$
 $n_a \sin \theta_p = n_b \cos \theta_p$

$\tan \theta_p = n_b / n_a$

Porcentaje de Polarización:

Reflexión: $I_{\perp} = 0,5 I_0 \sin^2 (i - r) / \sin^2 (i + r)$

$$I_{||} = 0,5 I_0 \tan^2 (i - r) / \tan^2 (i + r)$$

Refracción: $I'_{\perp} = 0,5 I_0 - I_{\perp}$

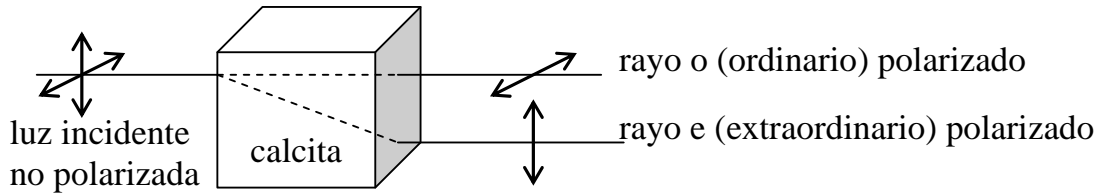
$$I'_{||} = 0,5 I_0 - I_{||}$$

$$PP = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \times 100$$

Doble refracción

Isótopos ópticos: son materiales que se comportan de igual manera en todas las direcciones

Anisótopos ópticos: son materiales que no se comportan de igual manera en todas las direcciones, como la calcita.



A la calcita llega un rayo polarizado y salen dos rayos: “o” y “e”.

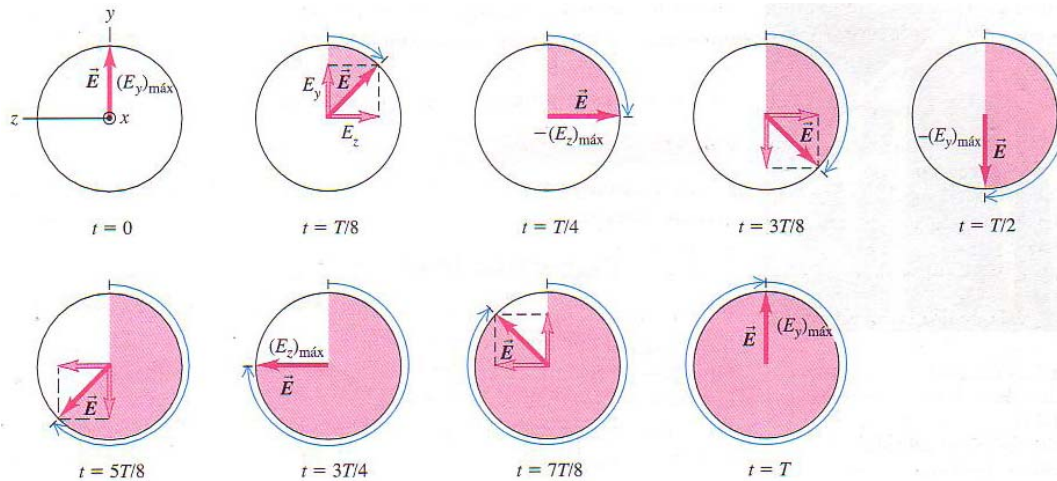
Polarización circular y elíptica

La luz también puede tener polarización circular o elíptica.

En el caso de dos ondas mecánicas en cuerda polarizadas en los ejes “y” y “z”, las dos ondas linealmente polarizadas están en fase y tienen la misma amplitud. Cuando se superponen, cada punto de la cuerda tiene desplazamientos “y” y “z” simultáneos de igual magnitud. La onda resultante se encuentra en un plano que forma un ángulo de 45° respecto a los ejes “y” y “z”, es decir, un ángulo de 45° con los planos “xy” y “xz”. La amplitud de la onda resultante es más grande, en un factor de $(2)^{1/2}$, que la de cualquiera de las ondas componentes, y la onda resultante está linealmente polarizada.

Supóngase que las dos ondas de igual amplitud difieren en su fase en un cuarto de ciclo. El movimiento resultante corresponde a la superposición de dos movimientos armónicos simples en ángulo recto, con una diferencia de fase de un cuarto de ciclo. El desplazamiento “y” en un punto es máximo en los momentos en que el desplazamiento en “z” es cero, y viceversa. El movimiento en la cuerda ya no tiene lugar en un solo plano, cada punto de la cuerda describe un círculo en un plano paralelo al plano “yz”, y el movimiento de la cuerda parece una hélice en rotación. Esta superposición de las ondas linealmente polarizadas se llama “polarización circular”.

Situación análoga corresponde a una onda electromagnética. Se superponen dos ondas de igual amplitud, polarizadas en las direcciones “y” y “z”, y con una diferencia de fase de un cuarto de ciclo. El resultado es una onda con una amplitud de magnitud constante pero que gira en torno a la dirección de propagación.



Si la diferencia de fase entre las dos ondas componentes es distinta de un cuarto de ciclo, o si las ondas componentes tienen diferente amplitud, cada punto del movimiento resultante no describe un círculo sino una elipse. En este caso la onda resultante está “elípticamente polarizada”.

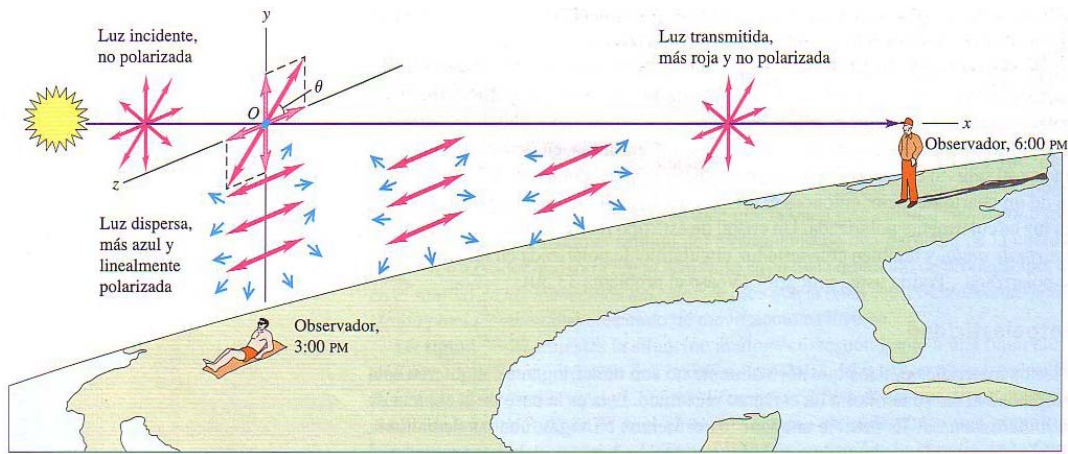
En el caso de un material anisótropo, cuando dos ondas de igual amplitud y direcciones de polarización perpendiculares entran al material, viajan con velocidades diferentes. Si están en fase al entrar, en general, ya no están en fase al salir. Si el material tiene el espesor justo para introducir una diferencia de fase de un cuarto de ciclo, convierte la luz linealmente polarizada en luz circularmente polarizada. Un material de este tipo se llama “placa de cuarto de onda” y también convierte luz circularmente polarizada en luz linealmente polarizada.

Dispersión luminosa

Cuando se mira el cielo durante el día, la luz que se ve es luz solar que ha sido adsorbida y luego vuelta a irradiar en diversas direcciones. Este proceso se llama “dispersión luminosa”.

En el caso de la figura, un observador en el oeste ve la luz solar que ha sufrido una dispersión del 90° . Esta luz dispersa está linealmente polarizada y contiene principalmente luz azul del espectro. La luz solar blanca pierde

esta luz azul al atravesar la atmósfera y en la luz transmitida que ve el observador en el este predomina la luz roja del espectro.

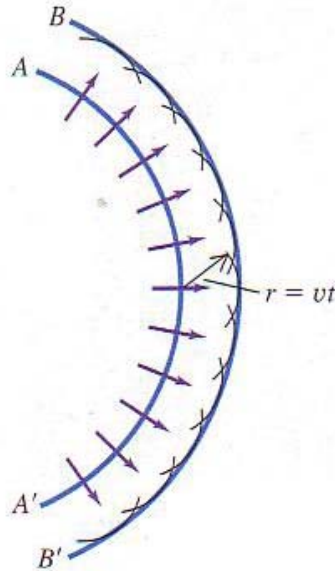


Las nubes son blancas porque dispersan eficientemente la luz solar de todas las longitudes de onda.



Principio de Huygens

Cada punto de un frente de ondas se comporta como una fuente emisora de ondas secundarias que se extienden en todas direcciones con rapidez igual a la de la propagación de la onda, siendo la envolvente de todas ellas luego de un instante, la posición de la onda principal.



Espejismo

Los espejismos son un ejemplo del Principio de Huygens. Cuando el sol calienta intensamente la superficie de un pavimento o de la arena, se forma una capa de aire caliente próximo a la superficie, la rapidez de la luz es un poco mayor en el aire caliente cerca del suelo, las onditas de Huygens tienen radios ligeramente más grandes, los frentes de ondas se inclinan un poco, y los rayos que se dirigían hacia la superficie con un ángulo de incidencia grande se doblan como se ve en la figura. La luz que viaja más lejos del suelo se desvía menos y viaja casi en línea recta. El observador ve el objeto en su posición natural, y ve una imagen invertida debajo de él, como si lo viera en una superficie horizontal reflectiva.

