

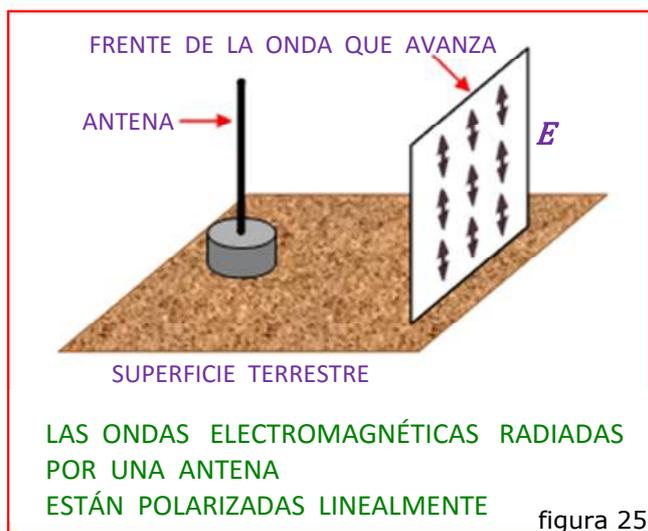
II. Óptica Física

II.1 Polarización

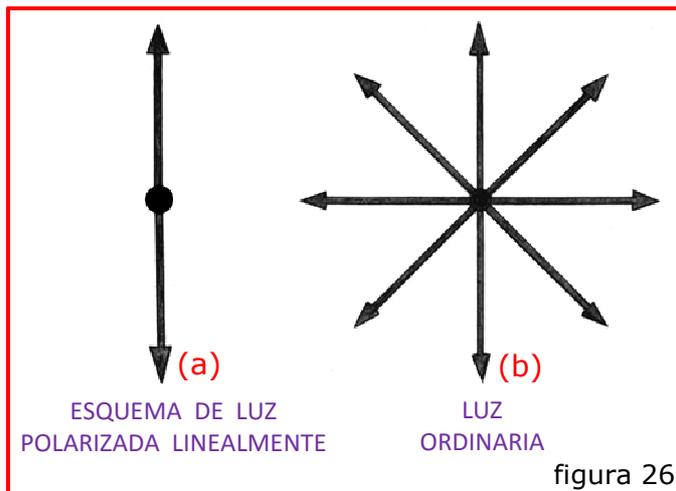
◆ Introducción:

La polarización es un fenómeno óptico por el cual los *rayos luminosos* son *modificados* mediante *refracción* o *reflexión*, de modo que no puedan *refractarse* o *reflejarse* nuevamente *en ciertas direcciones*. Este fenómeno no depende simplemente del carácter ondulatorio de la luz (*como en el caso de la interferencia y la difracción*) sino de que *las ondas son transversales*. Por ejemplo, la polarización no puede producirse con ondas sonoras porque las mismas son longitudinales.

Recordemos por un momento la naturaleza de las ondas electromagnéticas emitidas por una *antena de radio*, según vimos en el capítulo anterior. Supongamos que la antena es *vertical* y consideremos una porción de un *frente de onda* en un *plano vertical* a cierta distancia, como se representa en la *figura 25*. El *campo eléctrico E*, en todos los puntos de este frente de onda, tiene una *dirección vertical*, según se indica. Si en el frente de onda de la figura el campo eléctrico es máximo hacia arriba, en los frentes de onda situados media longitud de onda adelante (o atrás) la intensidad será máxima hacia abajo. En todos



los puntos de cualquier plano fijo en el espacio, el vector eléctrico oscila verticalmente hacia arriba y hacia abajo. Por tal motivo se dice que *la onda* está *polarizada linealmente*, *polarizada en un plano* o simplemente *polarizada*. Para evitar confusiones, el *campo magnético H* no está representado en la *figura 25*, pero sabemos que es siempre



perpendicular al *campo eléctrico* E . Las ondas provenientes de un *manantial luminoso* se originan probablemente en las *moléculas* del foco, y si éstas irradian del mismo modo que un *dipolo de tamaño finito*, las ondas procedentes de cualquier molécula estarán *polarizadas linealmente*. Pero

dado que un manantial luminoso real contiene un número enorme de moléculas orientadas al azar, la luz emitida es una mezcla de ondas polarizadas linealmente en todas las direcciones transversales posibles.

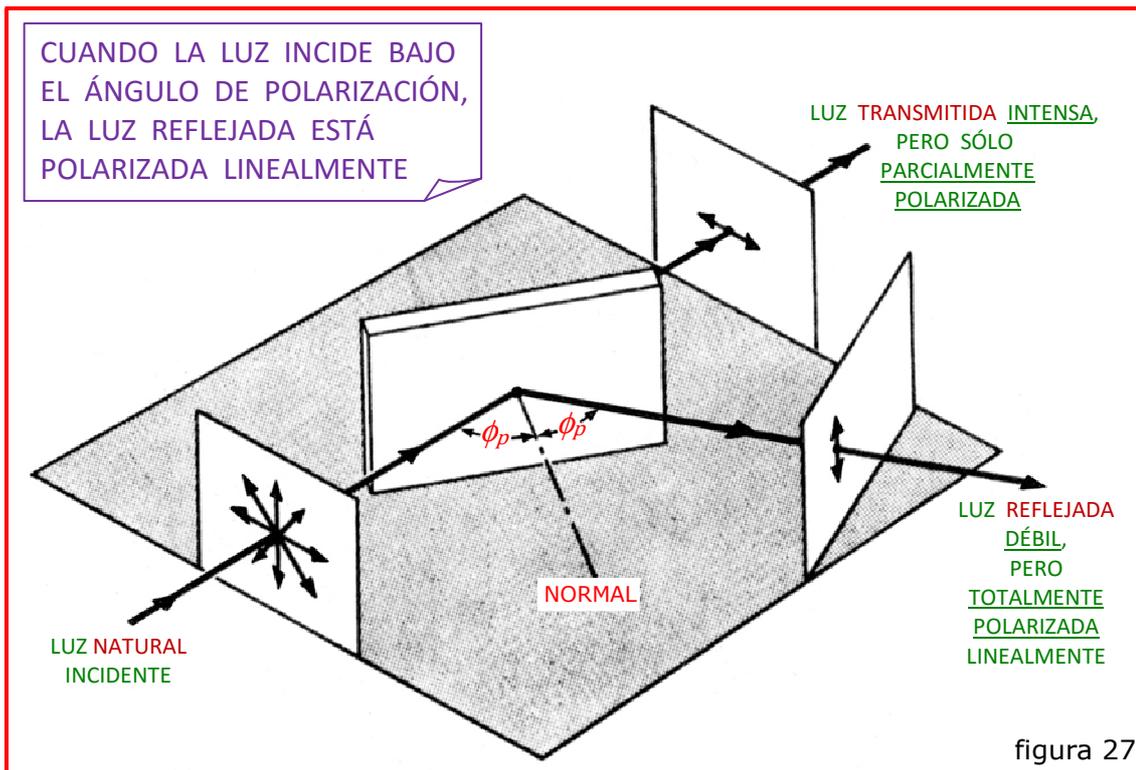
Supongamos que el plano de la *figura 26(a)* representa un frente de onda de un haz luminoso que avanza hacia el lector, y el punto, una sección transversal de un rayo de este haz. Una onda luminosa polarizada linealmente está simbolizada en el esquema por una *doble flecha*, que indica que el campo eléctrico oscila únicamente en dirección vertical.

Un haz de luz natural está simbolizado en la *figura 26(b)*, donde las flechas representan una mezcla de ondas polarizadas linealmente en todas las direcciones transversales posibles.

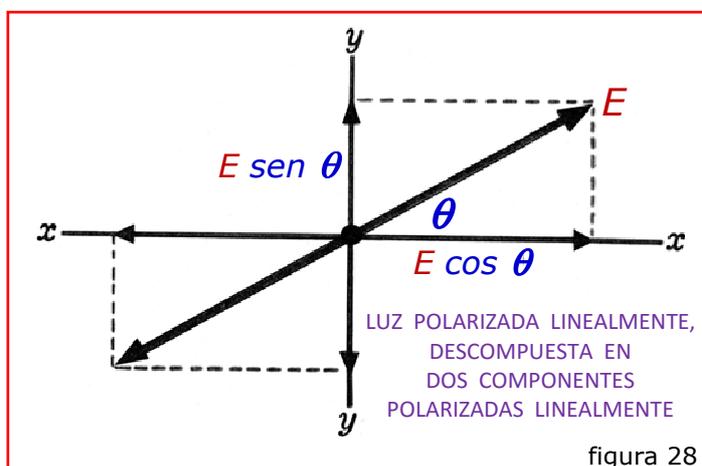
◆ Polarización por Reflexión:

Existen varios métodos que permiten separar, total o parcialmente, de un haz de luz natural, las *vibraciones que tienen una dirección particular*. Uno de ellos es a través del fenómeno de la *reflexión*.

Cuando la *luz natural* incide sobre una *superficie reflectante*, se observa que existe reflexión preferente para aquellas ondas en las cuales el vector eléctrico E vibra perpendicularmente al plano de incidencia (plano que contiene el rayo incidente y la normal a la superficie). Para un ángulo de incidencia particular, llamado ángulo de polarización, la *única luz que se refleja* es aquella para la



cual el vector eléctrico E es perpendicular al plano de incidencia, como en la figura 27. Para una mayor interpretación de esta figura, consideremos la figura 28: la doble flecha de trazo grueso representa la amplitud del campo eléctrico E en una onda polarizada linealmente, que avanza hacia el lector y cuya dirección de vibración forma un ángulo θ con el eje x . Esta onda puede descomponerse según los ejes x e y en dos ondas componentes polarizadas linealmente y con amplitudes $E \cos \theta$ y $E \sin \theta$. De igual modo, cada componente polarizada linealmente del haz incidente de luz natural de la figura 27, puede descomponerse en dos componentes, una perpendicular y otra paralela al plano de incidencia.

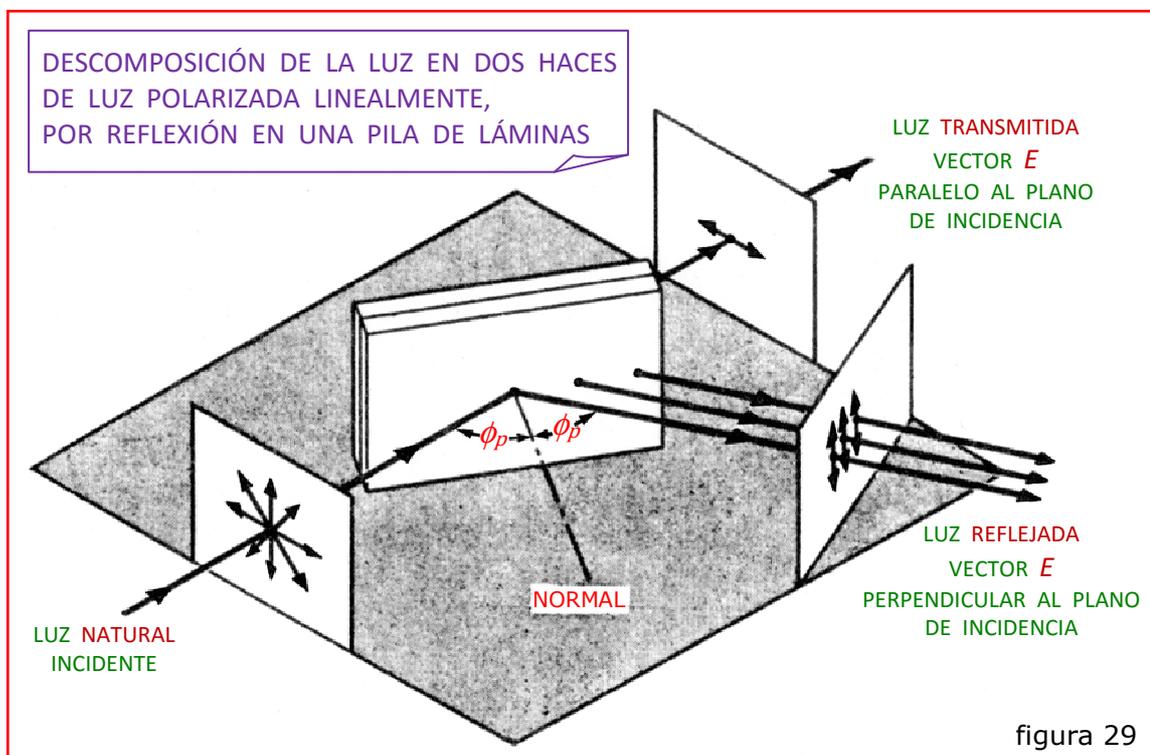


Podemos ahora estudiar la reflexión de la luz en la superficie, considerando lo que le ocurre a cada componente de una onda polarizada linealmente y contenida en el haz incidente.

- Cuando la incidencia se efectúa según el ángulo de polarización ϕ_p , ninguna de las componentes

paralelas al plano de incidencia es reflejada, sino que son *transmitidas* por completo en el *haz refractado*.

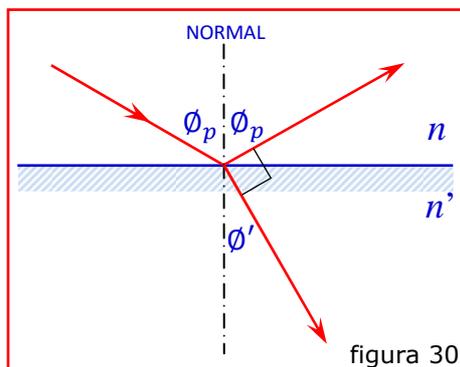
- De las *componentes perpendiculares al plano de incidencia*, el 15 % (aproximadamente) es *reflejado* si la superficie reflectante es *vidrio* (la fracción reflejada depende del *índice de refracción* de la sustancia).
- Consecuencia de los dos puntos anteriores: *a)* la *luz reflejada* es *débil* y está *completamente polarizada en un plano*; *b)* la *luz refractada* es una *mezcla* de las *componentes paralelas* (todas refractadas) y del 85 % restante de las *componentes perpendiculares*, siendo *intensa* pero sólo *parcialmente polarizada*.



Para *aumentar* la intensidad de la *luz reflejada*, se utiliza frecuentemente una pila de *láminas finas de vidrio*, según se indica en la *figura 29*. Debido a los muchos rayos reflejados en las distintas superficies, se tiene que no sólo hay un *aumento de la intensidad de la luz reflejada*, sino también un *aumento de polarización en la luz transmitida*, la cual ahora contiene una componente perpendicular sensiblemente menor. *Se aclara que por sencillez, en la figura 29 sólo se han representado dos láminas*. Con este dispositivo se llega a una separación

casi completa de la luz en dos haces que resultan polarizados linealmente. El haz refractado se compone casi por entero de ondas con el vector E paralelo al plano de incidencia, mientras que el haz reflejado sólo contiene ondas con el vector E perpendicular a dicho plano. Un dispositivo como éste, que únicamente transmite ondas con el vector E en una sola dirección, se denomina polarizador.

En 1812 el científico británico David Brewster descubrió que, cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización, el rayo reflejado y el rayo refractado son mutuamente perpendiculares (ver figura 30); es decir:



$$\phi_p + \phi' = 90^\circ \quad (1)$$

Si n es el índice de refracción de la sustancia en la cual se propaga la luz antes de la reflexión y n' el de la sustancia reflectante, de acuerdo con la ley de refracción se tiene:

$$n \sin \phi_p = n' \sin \phi'$$

de donde resulta que: $n \sin \phi_p = n' \sin (90 - \phi_p) = n' \cos \phi_p$

luego:

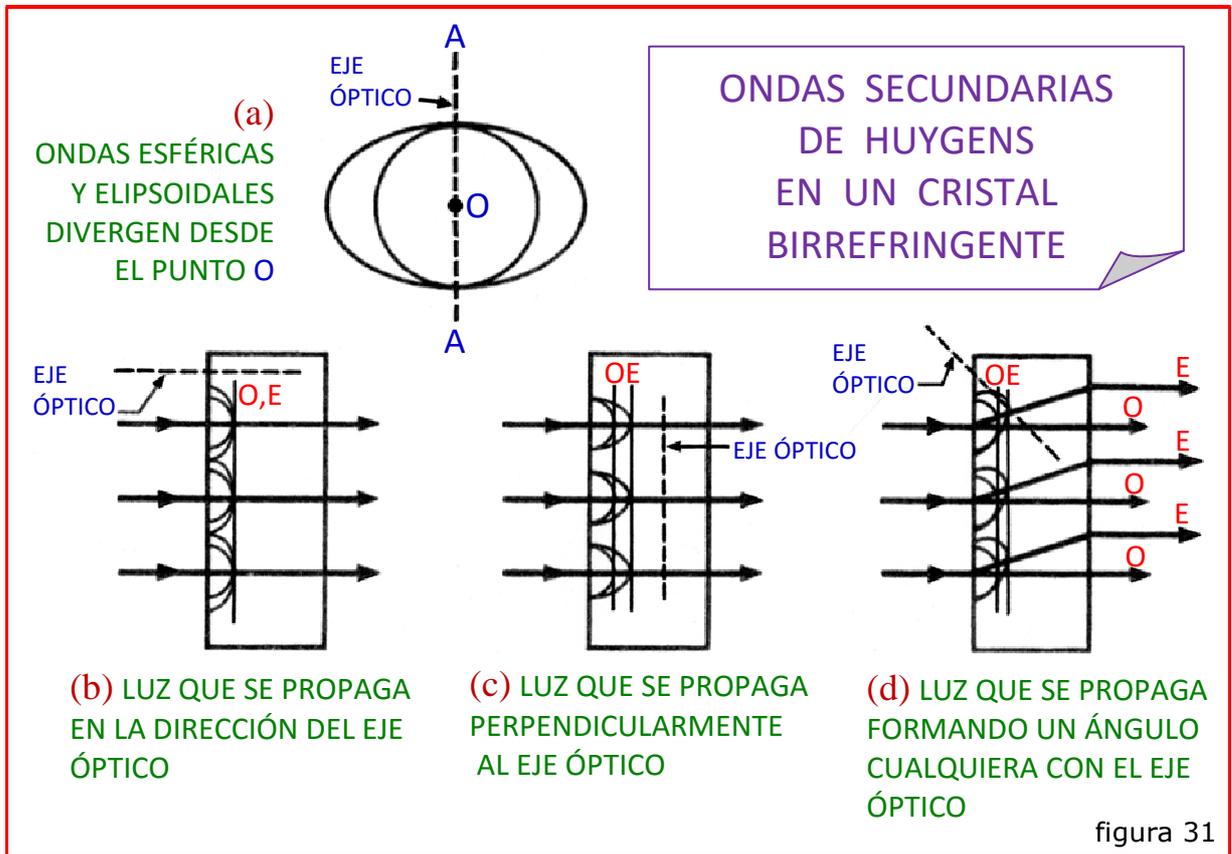
$$\boxed{\text{tang } \phi_p = \frac{n'}{n}} \Rightarrow \text{LEY de BREWSTER del } \underline{\text{ángulo de polarización}} \quad (2)$$

Aunque esta relación de Brewster fue descubierta en forma experimental, también se deduce de un modelo ondulatorio a partir de las ecuaciones de Maxwell.

◆ Doble Refracción:

Hasta ahora habíamos visto que la propagación de un tren de ondas en un medio homogéneo isótropo (sustancia con iguales propiedades en todas direcciones), tal como el vidrio, podía determinarse gráficamente considerando que las ondas secundarias son superficies esféricas (Principio de Huygens). Sin embargo, existen muchas sustancias transparentes cristalinas que son homogéneas pero anisótropas, puesto que la velocidad de una onda luminosa que se propaga en ellas no es la misma en todas direcciones. Los cristales que tienen esta propiedad, se dice que son birrefringentes.

En estos cristales, cada frente de onda da lugar a *dos series de ondas secundarias*, una de forma *esférica* y otra *elipsoidal*. Las mismas son *tangentes entre sí* en una dirección llamada *eje óptico* del cristal.



La *figura 31(a)* representa las trazas de las *ondas secundarias* procedentes de un *manantial puntual* situado dentro de un *cristal birrefringente*. La *dirección* de la *línea AOA* es el *eje óptico del cristal*. El eje óptico es una dirección del cristal y no solamente una recta, por lo que *cualquier otra recta paralela a AOA también es un eje óptico*.

Las partes *(b)*, *(c)* y *(d)* de la *figura 31* representan los *frentes de onda* en tres secciones de un mismo cristal, practicadas en *diferentes direcciones*, cuando la luz incide normalmente sobre la superficie de cada sección. Se observa que se propagan en el cristal *dos series de ondas*, una formada por las *tangentes a las esferas* y otra por las *tangentes a los elipsoides*.

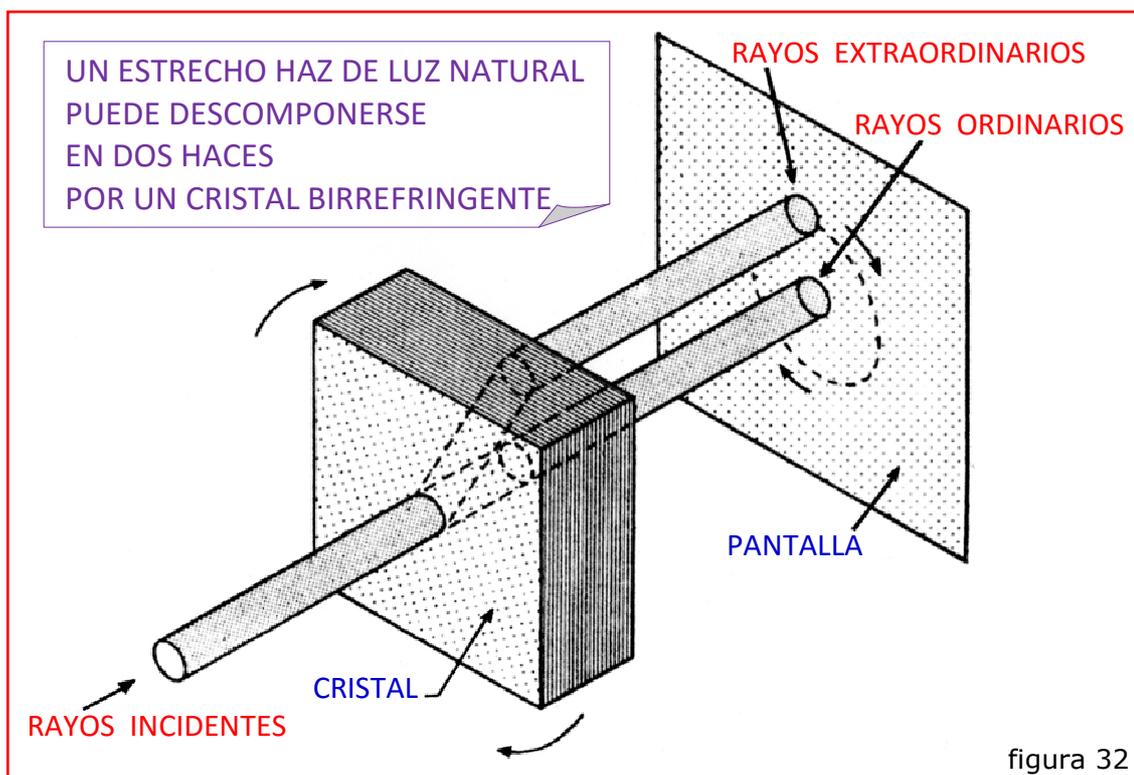
En la *figura 31(b)*, las *envolventes* de ambos conjuntos de ondas secundarias *coinciden* y se propaga *un solo frente de onda* a través de la sección, con una

velocidad igual a la de las *ondas secundarias esféricas*.

En la *figura 31(c)*, se observa que el *frente de onda* correspondiente a las *ondas secundarias elipsoidales* se propaga con una *velocidad superior* a la correspondiente a las *ondas secundarias esféricas*.

En la *figura 31(d)*, puede verse que un rayo que incide normalmente se divide en dos rayos que atraviesan el cristal. El que corresponde a las *ondas esféricas* no se desvía y se denomina *rayo ordinario*. El que corresponde a las *ondas elipsoidales* es desviado y se denomina *rayo extraordinario*. *La envolvente de las ondas elipsoidales, aunque es un plano perpendicular a la dirección de los rayos incidentes, no es tangente a los elipsoides en la dirección de dichos rayos. Por consiguiente, este frente de onda se propaga hacia la derecha y hacia arriba cuando se mueve a través del cristal. En este caso los rayos no son normales al frente de onda.*

En la *figura 32*, un haz estrecho de rayos paralelos incide sobre un cristal birrefringente y sobre una pantalla situada a la derecha aparecen dos manchas luminosas. Si se hace girar el cristal alrededor del eje del haz incidente, la mancha producida por los rayos ordinarios permanece fija, mientras que la otra gira alrededor de ella describiendo una circunferencia.



Para ángulos de incidencia distintos de 90° , la ley de Snell ($\text{sen } \phi / \text{sen } \phi' = \text{cte.}$) se cumple para el rayo ordinario, pero no para el extraordinario, puesto que evidentemente su velocidad es distinta para cada dirección. En consecuencia, el índice de refracción para el rayo extraordinario es función de la dirección. Este índice, normalmente se expresa para una dirección perpendicular al eje óptico, en la cual la velocidad es máxima o mínima. En la tabla siguiente, se indican algunos valores de los índices n_o y n_e , correspondientes a los rayos ordinario y extraordinario.

ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE CRISTALES BIRREFRINGENTES

(para luz de sodio $\lambda = 589 \text{ nm}$)

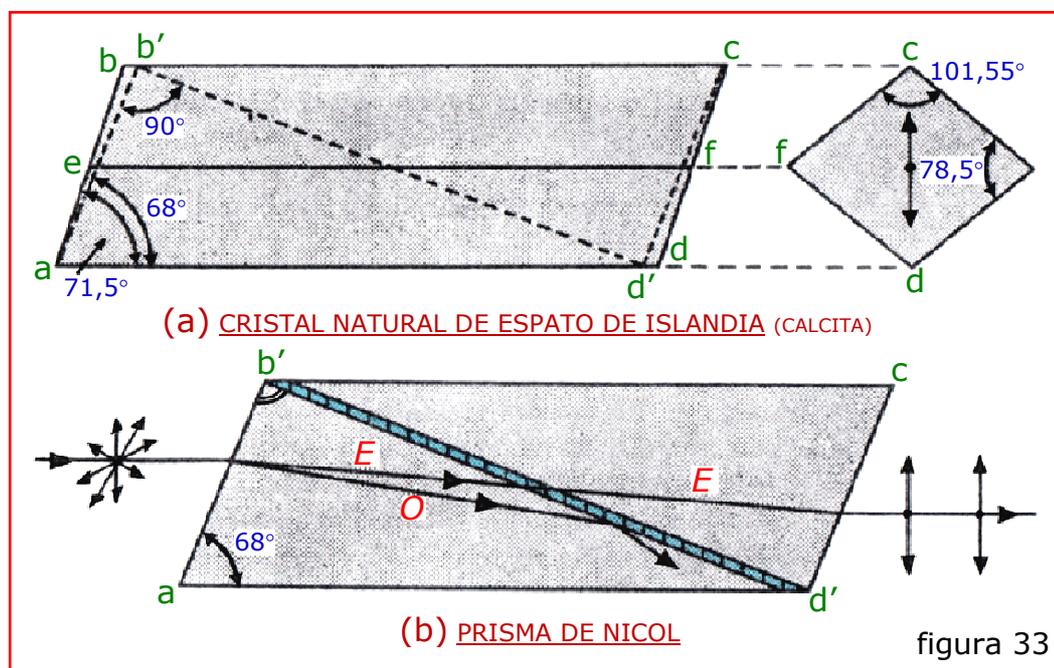
CRISTAL	FÓRMULA	n_o	n_e	$n_e - n_o$
HIELO	H ₂ O	1,309	1,313	+0,004
CUARZO	SiO ₂	1,544	1,553	+0,009
WURCITA	ZnS	2,356	2,378	+0,022
TURMALINA	variable	1,640	1,620	-0,020
CALCITA	CaCO ₃	1,658	1,486	-0,172
DOLOMITA	CaO-MgO-2CO ₂	1,681	1,500	-0,181
SIDERITA	FeO-CO ₂	1,875	1,635	-0,240

La *figura 31* se ha dibujado para un cristal en el cual la velocidad de las ondas elipsoidales es mayor que la de las ondas esféricas (excepto en la dirección del eje óptico, donde siempre son iguales). En algunos cristales (ver tabla anterior) la velocidad de las ondas elipsoidales es menor que la de las ondas esféricas. Este tipo de cristal y el descrito anteriormente se denominan uniáxicos. En algunos cristales hay dos direcciones diferentes en las cuales las velocidades son iguales. Estos cristales se denominan biáxicos. Dado que los cristales birrefringentes utilizados en los instrumentos ópticos (principalmente CUARZO y CALCITA) son uniáxicos, sólo consideraremos este tipo.

◆ Polarización por Doble Refracción:

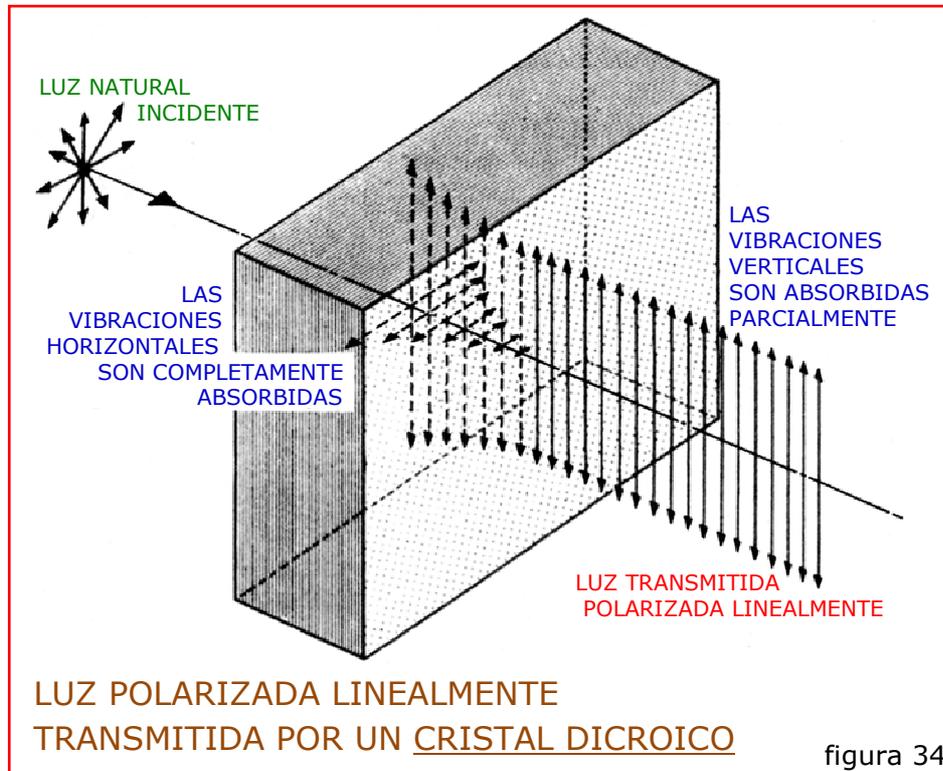
En un crystal birrefringente, las ondas ordinaria y extraordinaria están polarizadas linealmente en direcciones perpendiculares entre sí. En consecuencia, si tenemos algún medio de separar una onda de la otra, puede utilizarse un cristal birrefringente para obtener luz polarizada linealmente a partir de luz natural. Para ello existen varios procedimientos.

Uno de estos procedimientos es utilizando un prisma de NICOL o alguna de sus modificaciones. El mismo es un cristal de calcita cuya forma natural está representada por líneas llenas en la figura 33(a). Para construir un prisma de NICOL, primero se tallan las caras extremas con un ángulo más obtuso, como se representa con las líneas de puntos. Después se corta el cristal a lo largo de la diagonal menor b'd' y se pega de nuevo con bálsamo del Canadá. El índice de éste tiene un valor tal que el rayo ordinario se refleja totalmente, mientras que el rayo extraordinario se transmite como indica la figura 33(b).



Ciertos cristales birrefringentes son dicróicos, es decir, una de las componentes polarizadas es absorbida con mayor intensidad que la otra. Por consiguiente, si el cristal se corta a un espesor adecuado, una de las

componentes se extingue prácticamente por absorción, mientras que *la otra se transmite en proporción importante*, como indica la *figura 34*. La *turmalina* es uno de estos cristales dicroicos.

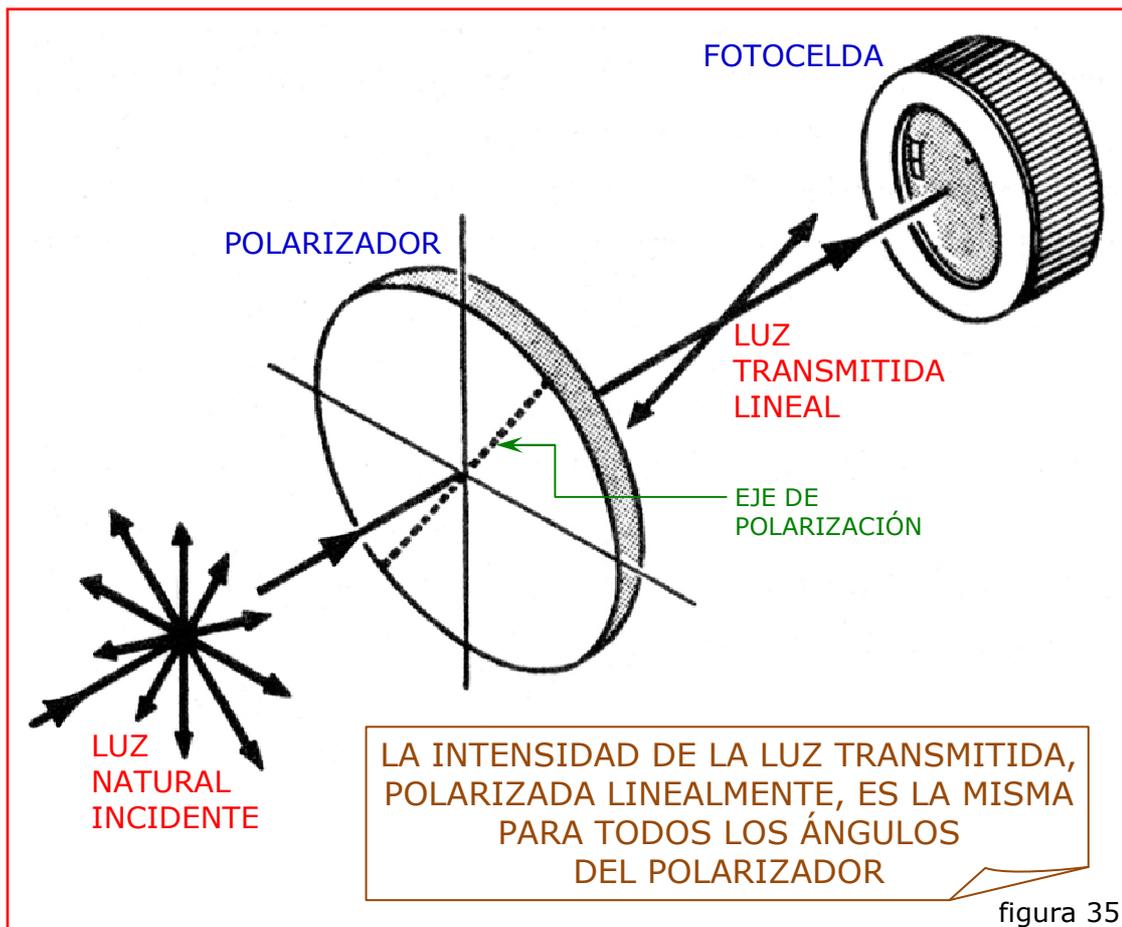


Las aberturas angular y lineal de los prismas de Nicol están limitadas por las constantes ópticas de la calcita y por la escasez de grandes piezas de calidad óptica. En 1934 se desarrolló un nuevo tipo de polarizador denominado **POLAROIDE**, que puede fabricarse en delgadas capas de gran superficie. El mismo está compuesto de finos cristales dicroicos de herapatita (sulfato de iodoquinina) en forma de agujas, orientados paralelamente y encerrados en una sustancia plástica transparente. Esta lámina permite el paso de las ondas cuyos vectores eléctricos vibren paralelamente a la orientación de los cristales y absorbe todas aquellas que vibren perpendicularmente a la misma. Posteriormente, el perfeccionamiento de este polarizador permitió aumentar notablemente su calidad y eficiencia. Un filtro Polaroides actual transmite más del 80 % de la intensidad de las ondas polarizadas paralelamente al eje de polarización (ver el tema siguiente), pero sólo menos del 1 % de las ondas polarizadas perpendicularmente a este eje.

◆ Porcentaje de Polarización - Ley de Malus:

Cuando la luz incide sobre un polarizador como el de la *figura 35*, sólo es

transmitida luz lineal. El polarizador puede ser una pila de láminas de vidrio, un prisma de Nicol o un disco de Polaroid, como se representa en la figura. La línea de puntos que cruza el polarizador es el eje de polarización e indica la dirección del vector eléctrico en la luz transmitida. Esta luz incide sobre una celda fotoelectrónica conectada a un microamperímetro (μA), cuya corriente es proporcional a la intensidad de la luz sobre la celda.



Si la luz incidente no está polarizada, al girar el polarizador alrededor del eje del rayo incidente, la lectura del μA permanecerá constante. Como el polarizador transmite las componentes de las ondas incidentes en las cuales el vector E es paralelo al eje del polarizador, por simetría, las componentes serán iguales para cualquier ángulo del eje de polarización.

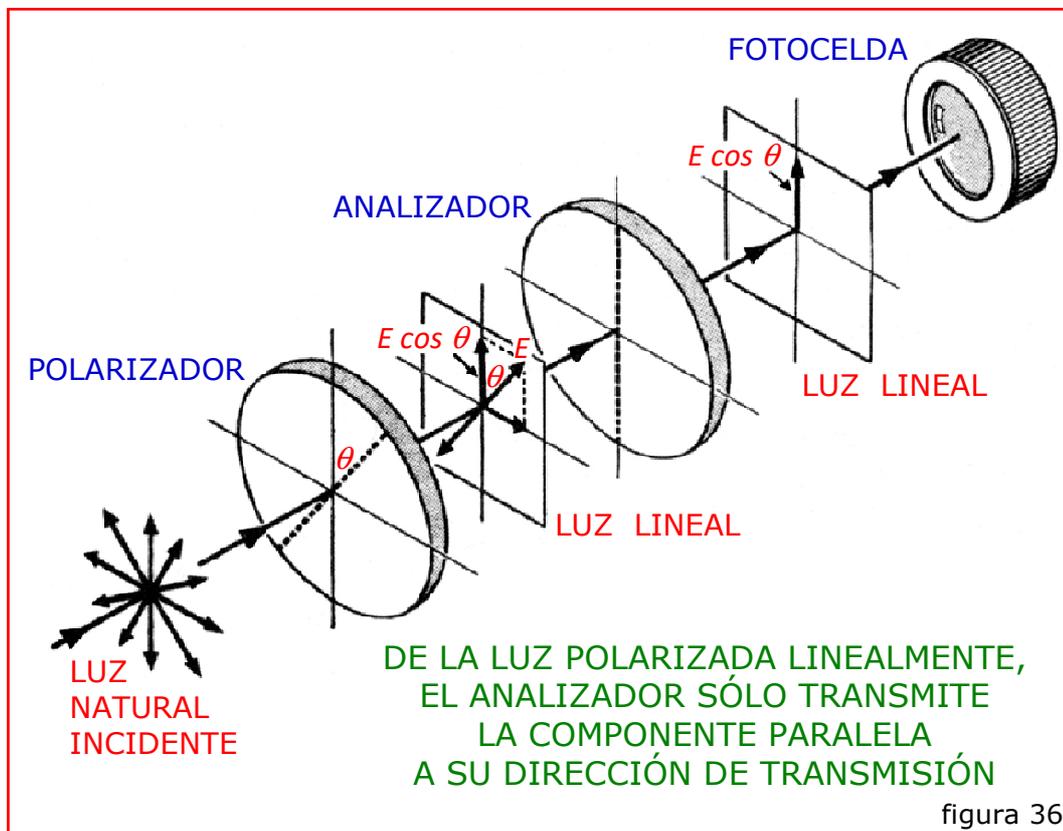
Si al girar el polarizador se registra alguna variación en el μA , la luz incidente no es natural y se dice que está parcialmente polarizada.

Si las indicaciones máximas y mínimas del μA son $I_{\text{máx}}$ e $I_{\text{mín}}$, que son

proporcionales a los valores máximos y mínimos de la intensidad de la luz incidente, podemos definir su porcentaje de polarización:

$$\% \text{ polarización} = \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}} \times 100 \quad (3)$$

Supongamos ahora que se interpone un *segundo disco de Polaroid* entre el *polarizador* y la *fotocelda*, como se indica en la *figura 36*, que llamaremos *analizador* y cuyo eje de polarización es vertical, mientras que el del polarizador forma un ángulo θ con dicha vertical.



La *luz lineal* transmitida por el *polarizador* puede dividirse en *dos componentes*, una paralela y otra perpendicular a la dirección de transmisión del analizador. Evidentemente, sólo la *componente paralela* de amplitud $E \cos \theta$ será transmitida por el *analizador*.

La luz transmitida será *máxima* para $\theta = 0^\circ$ y *nula* para $\theta = 90^\circ$, es decir, cuando polarizador y analizador estén cruzados. Para los *ángulos intermedios*, como la cantidad de energía luminosa es proporcional al cuadrado de la

amplitud del campo eléctrico, tenemos:

$$I = I_{m\acute{a}x} \cos^2 \theta \Rightarrow \text{LEY DE MALUS} \quad (4)$$

siendo $I_{m\acute{a}x}$ la máxima intensidad de luz [W/m^2] transmitida e I la intensidad de luz transmitida para el ángulo θ .

Evidentemente, θ significa en general el ángulo formado por las direcciones de transmisión (o ejes de polarización) del polarizador y del analizador. Si se gira uno u otro, la amplitud del haz transmitido varía de igual modo que el ángulo formado por ellos.

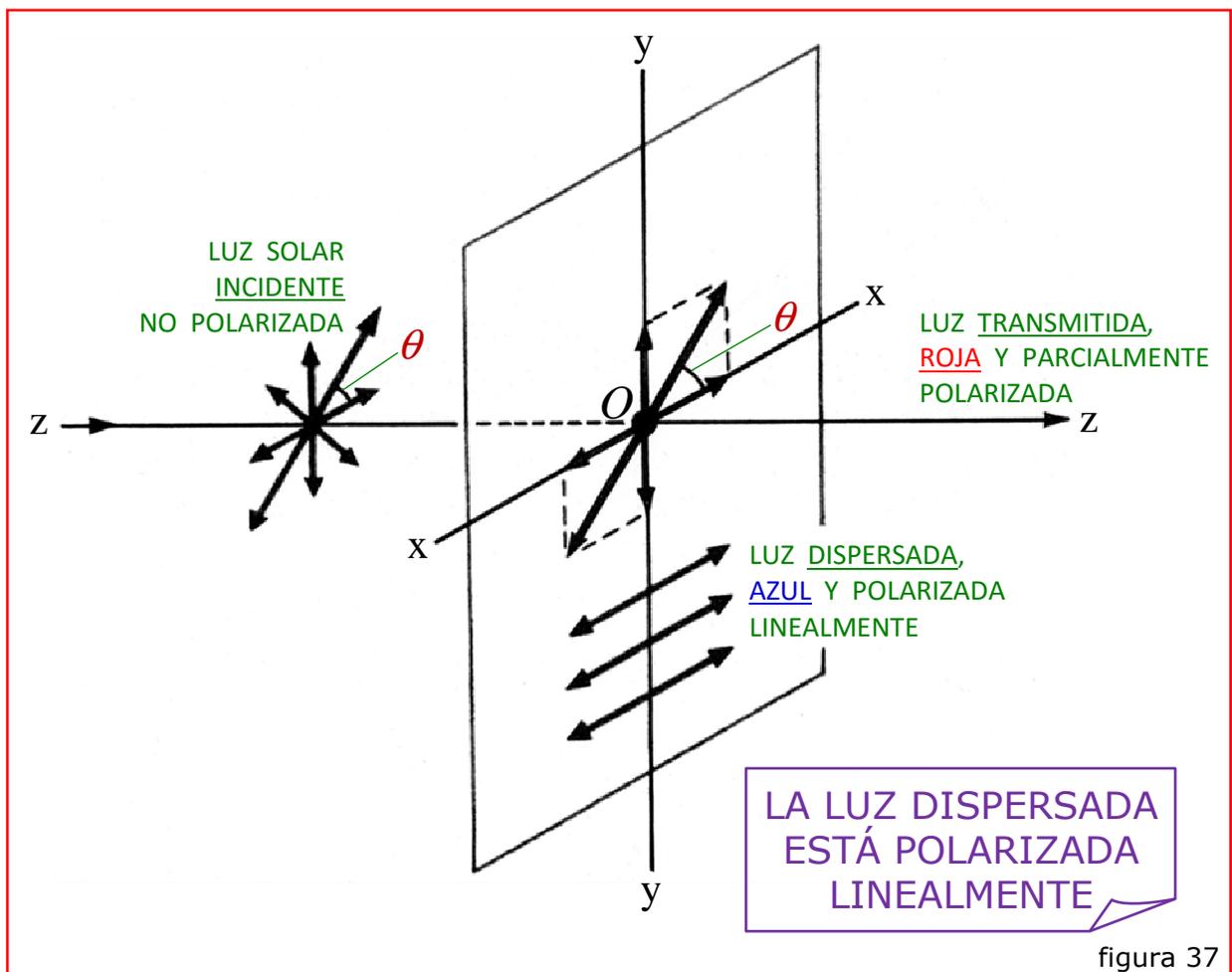
El Polaroides es muy usado en los anteojos de sol, los cuales producen el mismo efecto que unos anteojos oscuros que absorban el 50 % de la luz incidente. Esto se debe a que aún en un haz no polarizado, la mitad de la luz puede considerarse polarizada horizontalmente y la otra mitad polarizada verticalmente. Siendo que la dirección de transmisión del Polaroides en los anteojos de sol es vertical, no se transmite nada de la luz polarizada horizontalmente.

Cuando la luz del sol se refleja sobre una superficie horizontal, el plano de incidencia es vertical. Por consiguiente, en la luz reflejada hay preponderancia de luz polarizada horizontalmente, siendo la proporción tanto mayor cuanto más se aproxima el ángulo de incidencia al ángulo de polarización. Por lo tanto, tampoco es transmitida por los anteojos, los cuales hacen aquí el papel del analizador.

Cuando la luz natural incide en un polarizador ideal, la intensidad de la luz transmitida es exactamente la mitad de la intensidad de la luz incidente, cualquiera sea la orientación del eje de polarización (la luz natural es una mezcla aleatoria de todos los estados de polarización y los promedios de las componentes horizontales y verticales son iguales). Si dos filtros Polaroides se superponen con sus ejes de polarización a 90° , no pasa luz alguna. Si los ejes están a 45° , pasa la mitad de la luz que pasaría si estuvieran a 0° .

◆ Dispersión de la Luz:

El cielo es azul, las puestas del sol son rojas y, si miramos el cielo directamente hacia arriba a través de una lámina polarizante, podremos comprobar que la luz del mismo está polarizada linealmente en alto grado. La causa de estos tres efectos proviene de un mismo fenómeno.



En la *figura 37*, la luz del sol viene de la izquierda a lo largo del eje z y llega a un observador que mira hacia arriba a lo largo del eje y. Una de las *moléculas* de la atmósfera está situada en el punto O. El campo eléctrico del haz de luz solar ponen en vibración las *cargas eléctricas* de esta *molécula*. Como la luz solar es una onda transversal, la dirección del campo eléctrico en cualquier componente de la luz solar se encuentra en el plano xy, por lo que el movimiento de estas *cargas* tiene lugar en este plano.

Una componente cualquiera de la luz incidente, que vibre formando un ángulo θ con el eje x, hace vibrar las *cargas eléctricas* de la *molécula* en la misma dirección (indicado por la línea gruesa que pasa por el punto O). Esta vibración puede descomponerse en dos a lo largo de los ejes x e y. Como resultado, cada componente de la luz incidente produce un efecto equivalente a dos antenas moleculares, que oscilan sobre los ejes x e y con la frecuencia de dicha luz.

Sabemos que una antena no radia en la dirección de su propia longitud; en consecuencia, la antena situada a lo largo del eje y no envía luz al observador que se encuentra directamente debajo de ella, pero obviamente que si en otras direcciones. La única luz que llega al observador procede de la componente de la vibración a lo largo del eje x; por lo tanto, como sucede en el caso de las ondas provenientes de una antena cualquiera, esta luz está polarizada linealmente con el campo eléctrico paralelo a la antena (los vectores ubicados sobre el eje y debajo del punto O, representan la dirección de la vibración luminosa que llega al observador).

Esta absorción y nueva radiación de energía por las moléculas se denomina dispersión o difusión. La energía de la luz dispersada es sustraída del haz original, que resulta así debilitado en el proceso.

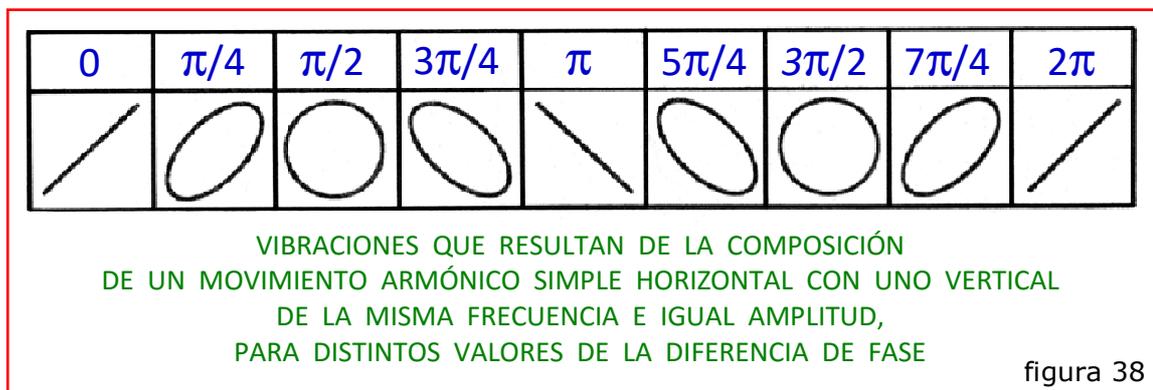
La vibración de las cargas en una molécula es una vibración forzada. Sabemos que la amplitud de las vibraciones forzadas es tanto mayor cuanto más próxima sea la frecuencia impulsante a la frecuencia natural del sistema. La frecuencia natural de las cargas eléctricas en una molécula es la misma que la correspondiente al ultravioleta. Las frecuencias luminosas son menores que esta frecuencia natural, pero cuanto más elevada es tanto más próxima está la frecuencia impulsante a la frecuencia natural y mayores son la amplitud de la vibración y la intensidad de la luz difundida. En otras palabras, la luz azul es más dispersada que la roja, resultando que el matiz de la luz difundida es azul. Al atardecer, cuando la luz solar tiene que recorrer una gran distancia a través de la atmósfera para alcanzar un punto situado sobre el observador, se ha eliminado por difusión una gran proporción de la luz azul. La luz blanca menos la luz azul tiene un matiz amarillo rojizo. Cuando esta luz incide sobre una nube, la luz reflejada hacia el observador tiene dicho matiz (frecuente en las puestas de sol). Si la tierra no tuviese atmósfera, el cielo se vería tan negro durante el día como por la noche.

◆ Polarización Circular y Elíptica:

Sabemos que cuando en un crystal birrefringente se separan los rayos ordinario y extraordinario, cada rayo por separado está polarizado linealmente, pero con

las *direcciones de vibración perpendiculares entre sí*. También sabemos que cuando la luz incidente atraviesa el cristal en una *dirección perpendicular al eje óptico*, los rayos ordinario y extraordinario no se separan, sino que *ambos siguen la misma trayectoria pero con diferentes velocidades*. Al salir del cristal, los rayos ordinario y extraordinario están *desfasados entre sí* y dan lugar a luz polarizada elíptica, circular o linealmente, según veremos a continuación.

Como ambos rayos tienen sus direcciones de vibración perpendiculares entre sí, nos interesa considerar el siguiente problema: ¿qué clase de vibración resulta de la composición de dos vibraciones armónicas simples perpendiculares entre sí y que presentan una diferencia de fase? La solución puede obtenerse de distintas maneras, las cuales nosotros no consideraremos. En la *figura 38* se han representado los resultados obtenidos al componer estos movimientos vibratorios con *igual frecuencia y amplitud*, pero para distintas diferencias de fase.

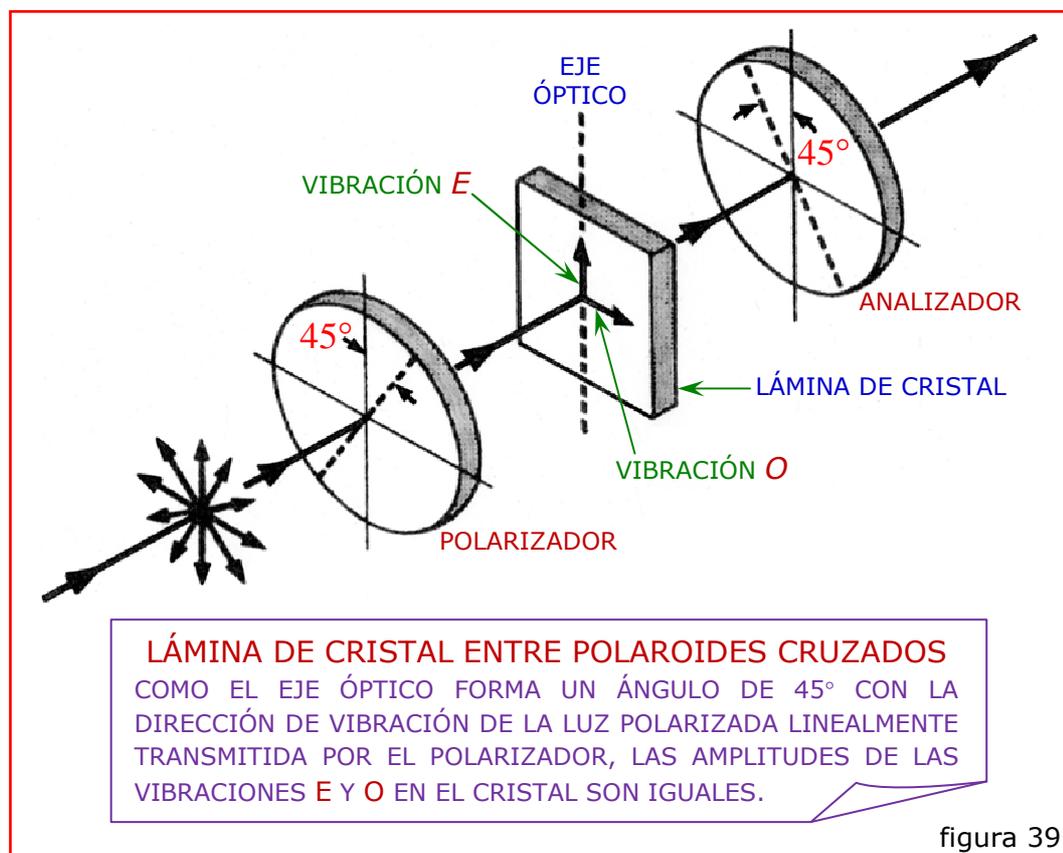


Es evidente que la composición de estos dos movimientos vibratorios *no produce nunca interferencia con anulación*, cualquiera sea la diferencia de fase.

- DIFERENCIA DE FASE $0, 2\pi$ o múltiplo par de π
vibración lineal con diferencia de fase de 45° respecto a las componentes
- DIFERENCIA DE FASE $\pi, 3\pi$ o múltiplo impar de π
vibración lineal perpendicular a la anterior
- DIFERENCIA DE FASE $\pi/2, 3\pi/2$ o múltiplo impar de $\pi/2$
vibración circular

➤ DIFERENCIA DE FASE restantes
vibración elíptica

Teniendo presente estos hechos, consideremos ahora el aparato óptico de la *figura 39*. Después que la luz no polarizada atraviesa el polarizador, se encuentra polarizada linealmente con la dirección de vibración indicada (*línea de puntos en el polarizador*). Esta luz entra en una *lámina de cristal* cuyo *eje óptico* es *perpendicular* a su *dirección de propagación*. Además, este eje óptico forma un ángulo de 45° con la dirección de vibración de la luz lineal incidente.

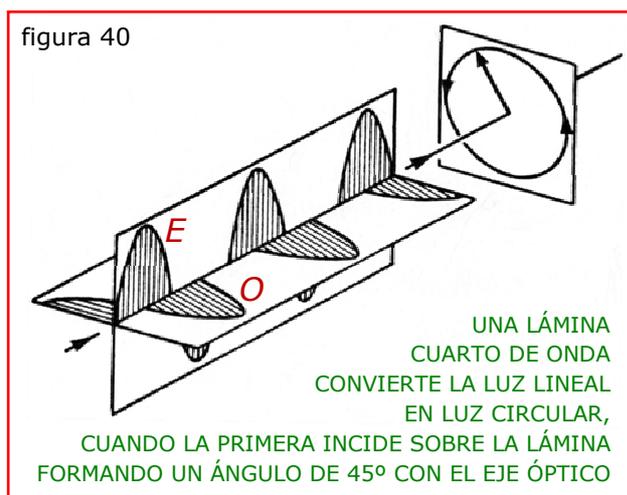


Puesto que, en este caso, la vibración *Extraordinaria* es *paralela al eje óptico* y la vibración *Ordinaria* es *perpendicular a él*, se deduce que las amplitudes de los haces *E* y *O* son *idénticas* (recordar que *E* y *O* son siempre perpendiculares entre sí). Los haces *E* y *O* se propagan a través del cristal siguiendo la *misma trayectoria* pero con *velocidades distintas*. Cuando salen del cristal, *se componen* para formar alguna de las *vibraciones* representadas en la *figura 38*, según la *diferencia de fase*.

La diferencia de fase entre las vibraciones E y O a la salida del cristal, depende de lo siguiente:

- la frecuencia de la vibración luminosa
- los índices de refracción del cristal para E y O
- el espesor del cristal

Si un cristal dado tiene un espesor tal que origina una diferencia de fase $\pi/2$ para una frecuencia dada, entonces, según la figura 38, se produce una vibración circular y la luz emergente de este cristal se dice que está polarizada circularmente. El valor de la intensidad del campo eléctrico resultante es el mismo en todos los puntos, pero gira alrededor de la dirección de propagación, dando una vuelta mientras la onda avanza una longitud de onda (ver figura 40). A este cristal se lo denomina lámina cuarto de onda.



Si la lámina de cristal de la figura 39 es cuarto de onda, la intensidad de la luz transmitida por el analizador quedará invariable al girar éste (el mismo resultado que cuando se utiliza luz no polarizada). Una lámina cuarto de onda para luz verde (por ejemplo) no es lámina cuarto de onda para otro color (la frecuencia es distinta).

Si el espesor del cristal introduce una diferencia de fase π para una frecuencia dada, entonces, según la figura 38, se produce una vibración lineal perpendicular a la dirección de la vibración incidente. La luz que sale de este cristal está polarizada linealmente y, al girar el analizador, puede encontrarse una posición para la cual esta luz sea detenida completamente (en la posición de la figura 39 sería totalmente pasante). Al cristal se lo denomina lámina semionda para esa frecuencia dada (para otra frecuencia, no será una lámina semionda).

Si la diferencia de fase producida por una lámina de cristal es tal que produce una vibración elíptica, se dice que la luz emergente está polarizada elípticamente. Al girar el analizador, la amplitud del haz transmitido fluctúa

entre un máximo $E_{máx}$ y un mínimo $E_{mín}$, para *posiciones* de la dirección de transmisión *paralela* y *perpendicular* al eje mayor de la elipse, respectivamente.

ACLARACIÓN: Cuando el vector eléctrico de la luz incidente polarizada linealmente, forma un ángulo distinto de 45° con el eje óptico de la lámina de cristal, la luz transmitida estará siempre polarizada elípticamente.

◆ Producción de Colores por Luz Polarizada:

Consideremos una lámina de cristal que sea semionda para la luz roja. Si la luz roja está polarizada linealmente con un ángulo de 45° respecto al eje óptico y atraviesa la lámina, sale de ella polarizada linealmente con la dirección de vibración perpendicular a la de la luz incidente. Un analizador cruzado con el polarizador transmitirá esta luz roja.

Supongamos ahora que la radiación incidente es luz blanca. Solamente la componente roja de esta luz blanca estará polarizada linealmente al salir de la lámina semionda, ya que todas las otras longitudes de onda saldrán polarizadas elípticamente o circularmente. Cuando el analizador se pone en la posición que transmite luz roja lineal totalmente polarizada, suprimirá una pequeña cantidad de todas las otras longitudes de onda. Consecuentemente, en la luz transmitida por el analizador predominará el rojo y tendrá por ello un matiz rojizo. Cuando se gira el analizador 90° , de modo que suprima completamente la luz roja, se transmitirán en cierto grado las otras longitudes de onda y el matiz resultante será el complementario del rojo, que es un verde pálido (ver nota aclaratoria en pág. 71).

Supongamos ahora que tenemos una lámina cristalina de espesor no uniforme, donde una pequeña parte de la lámina puede tener el espesor adecuado para actuar como lámina semionda para la luz roja, otra parte puede servir como lámina semionda para la luz amarilla, etc. Cuando se utiliza una lente para proyectar una imagen del cristal sobre una pantalla, siendo el resto del aparato el mismo de la figura 39, la imagen presentará manchas de diferentes colores correspondientes a las zonas de distintos espesores. Estos colores cambiarán a

sus complementarios cuando se gire el analizador 90°.

El papel celofán común es birrefringente. Pueden obtenerse efectos de color sorprendentes intercalando, entre el polarizador y el analizador, varios espesores de celofán o una bola arrugada del mismo.

◆ Análisis Óptico de Esfuerzos:

Cuando se montan un polarizador y un analizador en la posición cruzada, no se transmite nada de luz a través del conjunto. Pero si se intercala un cristal birrefringente, la luz saliente del cristal estará en general polarizada elípticamente y parte de ella será transmitida por el analizador. O sea que, el campo visual, oscuro en ausencia del cristal, se hace luminoso al intercalar éste.

Algunas sustancias como el vidrio, el celuloide y la baquelita, aunque no son normalmente birrefringentes, adquieren esta propiedad cuando se someten a esfuerzos mecánicos. Estudiando una muestra entre polaroides cruzados, puede obtenerse mucha información respecto a estos esfuerzos.

El vidrio templado defectuosamente, por ejemplo, puede estar sometido a esfuerzos importantes en su interior, capaces más tarde de producir roturas. Por otra parte, los vidrios ópticos deben estar libres de tensiones internas antes de someterlos a tratamientos costosos de tallado y pulido. Por ello, tales vidrios siempre se examinan previamente entre polaroides cruzados.

ANÁLISIS FOTOELÁSTICO DE ESFUERZOS

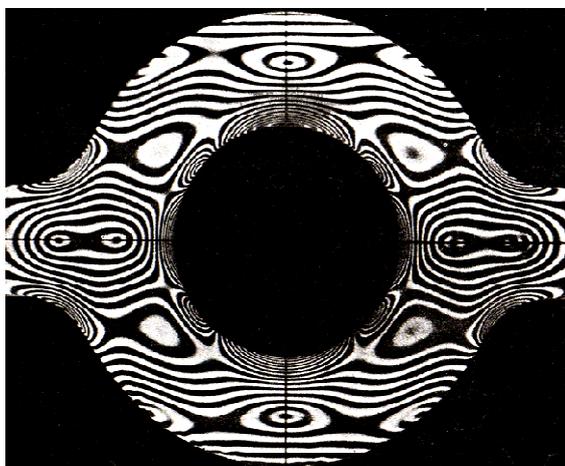


figura 41

La doble refracción producida por los esfuerzos es el fundamento de la ciencia llamada FOTOELASTICIDAD. Los esfuerzos en piezas técnicas opacas como vigas, planchas de calderas, dientes de engranajes, etc., pueden analizarse construyendo un modelo transparente, frecuentemente de baquelita, y examinándolo luego entre polaroides cruzados.

Las distribuciones de esfuerzos muy complicadas, tales como las que se

producen alrededor de un hueco o un diente de engranaje, cuyo análisis matemático sería prácticamente imposible, puede estudiarse así por métodos ópticos.

La [figura 41](#) es una fotografía de un [modelo fotoelástico](#) sometido a esfuerzos.

◆ Otras Aplicaciones de la Luz Polarizada:

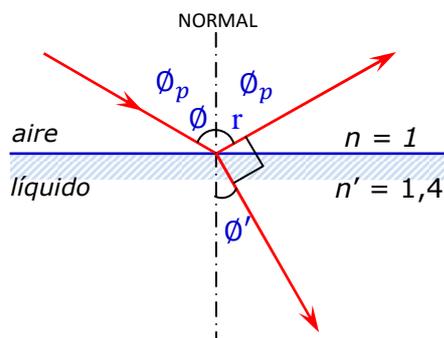
- Los [líquidos](#) no son normalmente birrefringentes, pero algunos adquieren esta propiedad cuando se establece en ellos un campo eléctrico. Esto permite que [una luz](#) a través de [un líquido](#) intercalado entre [polaroides cruzados](#), pueda ser [controlada](#) eléctricamente. Como ejemplo, consideremos el caso de una cubeta de paredes transparentes que contiene el líquido entre un par de láminas paralelas; si intercalamos la cubeta entre polaroides cruzados, éstos transmitirán luz toda vez que se establezca un campo eléctrico entre las láminas.
- La luz polarizada se utiliza extensamente en el campo de la [mineralogía](#). Se corta en forma de fina lámina una muestra transparente de roca o cristal y se examina mediante un [microscopio especial](#) que contiene un [polarizador](#) y un [analizador](#). Las figuras obtenidas permiten determinar las características y propiedades del cristal investigado.
- Cuando se envía un haz de [luz polarizada linealmente](#) a través de ciertos [cristales](#) y de ciertos [líquidos](#), se encuentra que la dirección de vibración de la luz polarizada linealmente que emerge, es diferente de la dirección inicial. Este fenómeno se denomina [rotación del plano de polarización](#) y las sustancias que presentan tal efecto se dice que poseen [ACTIVIDAD ÓPTICA](#). Aquellas que giran el plano de polarización hacia la derecha, mirando a lo largo del haz que avanza, se denominan [dextrógiras](#) y las que giran dicho plano hacia la izquierda, [levógiras](#).
La [actividad óptica](#) puede ser causada por: a) [una asimetría de las moléculas de la sustancia](#); b) [una propiedad de la estructura cristalina](#).
Por ejemplo, las disoluciones de azúcar de caña son dextrógiras, indicando que la actividad óptica es una propiedad de la molécula de azúcar. La rotación del plano de polarización por una disolución de azúcar, se utiliza comercialmente como método para determinar la proporción de azúcar en una muestra dada.

El cuarzo cristalino es también ópticamente activo, siendo algunos cristales naturales dextrógiros y otros levógiros. En este caso la actividad óptica es consecuencia de la estructura cristalina, puesto que desaparece si el cuarzo se funde y se le deja solidificar en un estado vítreo no cristalino denominado cuarzo fundido.

NOTA: Se llaman colores complementarios a todos los pares de colores que, superpuestos, producen la sensación del color blanco. Son complementarios: el rojo y el verde azulado, el anaranjado y el azul, el amarillo verdoso y el violeta, etc. Cada color o zona del espectro, es complementario del que resulta de superponer todos los restantes.



Ejercicio N° 1: Un haz luminoso incide sobre un líquido de índice de refracción 1,4. Los rayos reflejados están totalmente polarizados. ¿Cuál es el ángulo de refracción del haz?



$$\phi = r = \phi_p$$

$$\operatorname{tg} \phi_p = \frac{n'}{n} = \frac{1,4}{1} = 1,4$$

$$\phi_p = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,4 = 54,46^\circ$$

Aplicando la ley de la refracción:

$$n \operatorname{sen} \phi = n' \operatorname{sen} \phi'$$

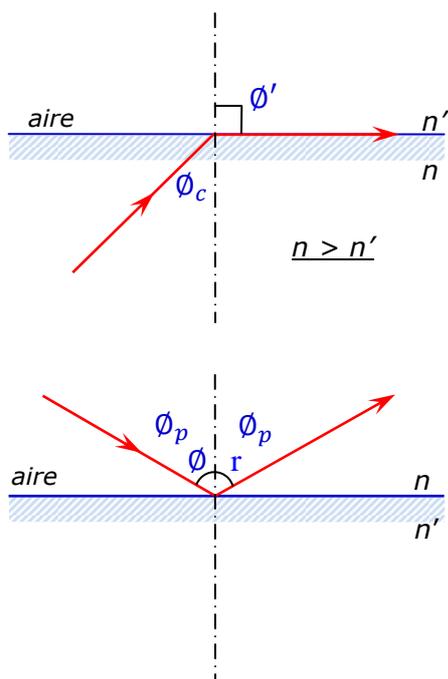
$$\operatorname{sen} \phi' = \frac{\operatorname{sen} 54,46^\circ \times 1}{1,4} = 0,58122$$

$$\phi' = 35,54^\circ$$

Se cumple que $\phi_p + \phi' = 90^\circ$

NOTA: recordar que n es el índice de la sustancia en la cual se propaga la luz y n' es el índice de la sustancia reflectante o refractante. Si no se menciona la sustancia del otro medio, se supone que es el aire. Para ambos índices, siempre es $n = c/v$.

Ejercicio N° 2: El ángulo límite de una sustancia es 45° . ¿Cuál es su ángulo de polarización?



$$\phi_c = \phi$$

De la óptica geométrica, sabemos que:

$$\text{sen } \phi_c = \frac{n'}{n} \quad \Rightarrow \quad \text{sen } 45^\circ = \frac{1}{n}$$

$$n = 1,4142 \quad (n' \text{ en el esquema inferior})$$

$$\text{tg } \phi_p = \frac{n'}{n} = \frac{1,4142}{1}$$

$$\phi_p = 54,73^\circ$$

En el esquema superior, el aire es la sustancia refractante (n'). En el esquema inferior, el aire es la sustancia en la cual se propaga la luz (n).

NOTA: Recordemos que el ángulo límite ϕ_c es el ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción es de 90° . Los rayos con ángulos superiores a ϕ_c no pasan al otro medio sino que son reflejados totalmente (debe ser $n > n'$).

Ejercicio N° 3: ¿Cuál es el ángulo de polarización del vidrio silicio "Flint" para la luz de longitud de onda 450 nm? Sabemos que el ángulo límite de dicha sustancia para la misma longitud de onda es de $37,43^\circ$.

El razonamiento y los esquemas correspondientes son iguales al problema anterior.

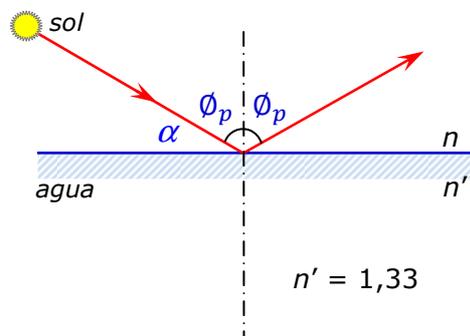
$$\text{sen } \phi_c = \frac{n'}{n} \quad \Rightarrow \quad \text{sen } 37,43^\circ = \frac{1}{n}$$

$$n = 1,645$$

$$\text{tg } \phi_p = \frac{n'}{n} = \frac{1,645}{1}$$

$$\phi_p = 58,7^\circ$$

Ejercicio Nº 4: a) ¿Qué altura sobre el horizonte debe tener el sol para que la luz procedente de él y reflejada sobre una superficie de agua en calma, esté completamente polarizada? b) ¿Cuál es el plano del vector E en la luz reflejada?



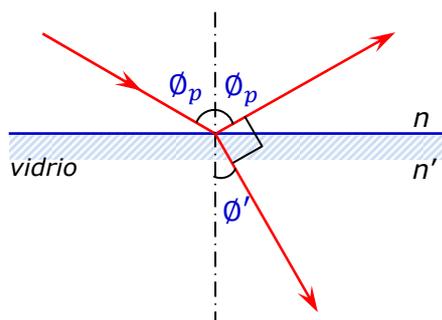
a)

$$\operatorname{tg} \phi_p = \frac{n'}{n} = \frac{1,33}{1} \Rightarrow \phi_p = 53^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ$$

b) El plano del vector E en la luz reflejada, es normal al plano de incidencia.

Ejercicio Nº 5: Un haz paralelo de luz natural incide, formando un ángulo de 58° , sobre una superficie plana de vidrio. El haz reflejado está completamente polarizado en un plano. a) ¿Cuál es el índice de refracción del vidrio? b) ¿Cuál es el ángulo de refracción del haz transmitido?



$$\phi = r = \phi_p = 58^\circ$$

$$\operatorname{tg} \phi_p = \frac{n'}{n}$$

$$\operatorname{tg} 58^\circ = \frac{n'}{1}$$

$$n' = 1,6$$

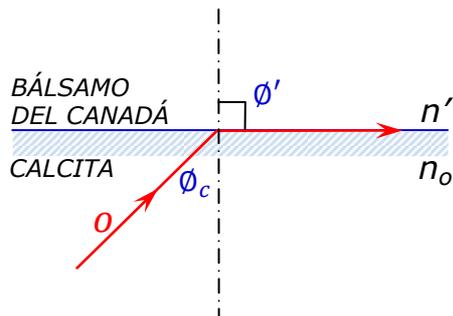
$$n \operatorname{sen} \phi = n' \operatorname{sen} \phi'$$

$$\operatorname{sen} \phi' = \frac{1 \times \operatorname{sen} 58^\circ}{1,6} = 0,53$$

$$\phi' = 32^\circ$$

Ejercicio Nº 6: El bálsamo del Canadá tiene un índice de refracción de 1,528. ¿Cuál es el ángulo mínimo de incidencia que puede formar el rayo ordinario con la capa de bálsamo del Canadá de un prisma de Nicol (CALCITA), al ser reflejado totalmente en esta capa?

S/tabla de pág. 57, el índice de refracción de la Calcita (cristal natural de Espato de Islandia) es 1,658. La reflexión total se produce si $\phi = \phi_c$ (ángulo límite) y $n > n'$.

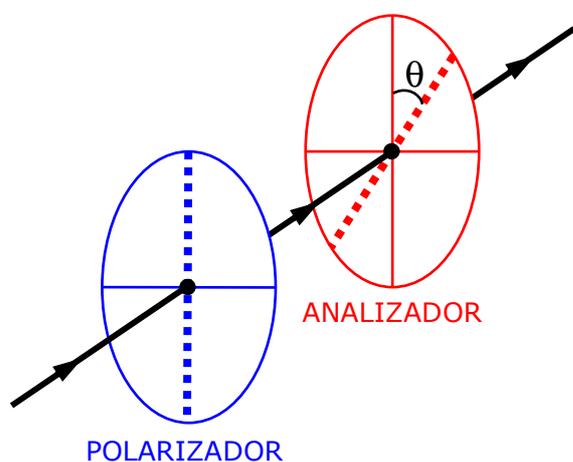


$$\text{sen } \phi_c = \frac{n'}{n_o} = \frac{1,528}{1,658} = 0,92159$$

$$\phi_c = 67,16^\circ$$

NOTA: En el prisma de Nicol (ver fig. 33/pág. 58), el ángulo de incidencia del rayo ordinario es igual a 77° (por ello resulta $\phi' > 90^\circ$).

Ejercicio N° 7: Un polarizador y un analizador están orientados de modo que se transmita la cantidad máxima de luz. ¿A qué fracción de este valor máximo se reduce la intensidad de la luz transmitida cuando se gira el analizador: a) 30° ; b) 45° ; c) 60° ?



$$I = I_{\text{máx}} \cos^2 \theta \Rightarrow \text{LEY DE MALUS}$$

$$\theta = 0^\circ \Rightarrow I = I_{\text{máx}}$$

$$\theta = 30^\circ \Rightarrow I = 0,75 I_{\text{máx}}$$

$$\theta = 45^\circ \Rightarrow I = 0,50 I_{\text{máx}}$$

$$\theta = 60^\circ \Rightarrow I = 0,25 I_{\text{máx}}$$

Ejercicio N° 8: La diferencia de fase δ entre los rayos E y O , después de atravesar una lámina cristalina, está dada por:

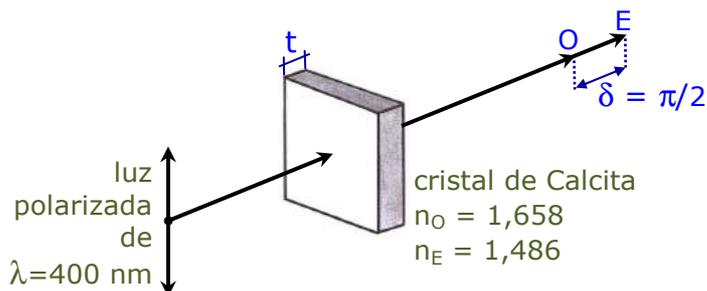
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} t (n_E - n_O) \quad \text{de donde} \Rightarrow \quad t = \frac{\delta \lambda}{2\pi (n_E - n_O)} \quad (5)$$

Siendo λ la longitud de onda en el aire y t el espesor del cristal. a) Demostrar que el espesor mínimo de una lámina cuarto de onda está dado por: $t = \lambda/4 (n_E - n_O)$. b) ¿Cuál es el espesor mínimo de una lámina cuarto de onda de Calcita para una luz de longitud de onda de 400 nm?

a)

$$t = \frac{\pi}{2} \times \frac{\lambda}{2\pi (n_E - n_O)}$$

$$t = \frac{\lambda}{4 (n_E - n_O)}$$



b) Hemos supuesto que los índices de refracción (ver tabla de pág. 57) para 400 nm se mantienen aproximadamente iguales que para 589 nm.

$$t = \frac{\lambda}{4(n_E - n_O)} = \frac{400 \text{ nm}}{4(1,486 - 1,658)} = 581 \text{ nm}$$

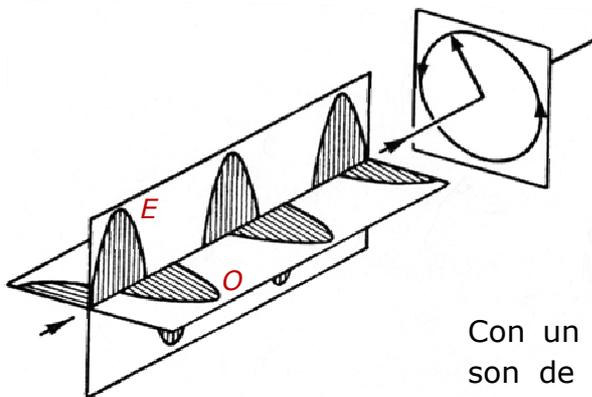
(este es el espesor mínimo, ya que también resulta cuarto de onda si el espesor es 3t, 5t, 7t, 9t, etc.)

Nota: Si $(n_E - n_O) < 0$, indica que $n_O > n_E$ y por tanto que el rayo extraordinario adelanta al rayo ordinario, o sea que $v_E > v_O$ ($n = c/v$). El signo menos se compensa con $\delta = (\varphi_E - \varphi_O)$ en la ecuaciones (5) al permutar las posiciones de los rayos E y O.

Ejercicio N° 9: ¿Qué espesor mínimo de cuarzo cristalino es necesario para obtener una lámina semionda para una luz de 589 nm de longitud de onda?

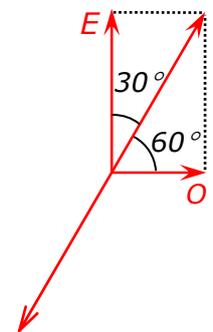
$$t = \frac{\delta \lambda}{2\pi(n_E - n_O)} = \frac{589 \text{ nm} \times \pi}{2\pi(1,553 - 1,544)} = 32.722 \text{ nm}$$

Ejercicio N° 10: ¿Cuál es el estado de polarización de la luz transmitida por una lámina de cuarto de onda, cuando el vector eléctrico de la luz incidente, polarizada en un plano, forma un ángulo de 30° con el eje óptico?



Si el ángulo fuera de 45°, los haces E y O serían de igual amplitud y de su composición resultaría una onda polarizada circularmente, como se observa en la figura de la izquierda.

Con un ángulo de 30°, los haces son de distinta amplitud y la luz emergente resulta:
polarizada elípticamente.



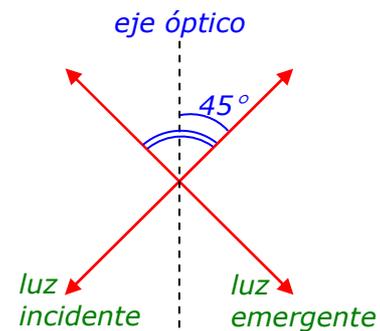
////

Ejercicio Nº 11: Se supone que los valores n_E y n_O para el cuarzo son independientes de la longitud de onda. Un cierto cristal de cuarzo es una lámina cuarto de onda para la luz de longitud de onda 800 nm (*en el vacío*). ¿Cuál es el estado de polarización de la luz transmitida, cuando incide sobre el cristal luz polarizada linealmente cuya longitud de onda es 400 nm (*en el vacío*), formando el plano de polarización un ángulo de 45° con el eje óptico?

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} t (n_E - n_O) = \frac{k}{\lambda}$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{400} &= \frac{k}{400} \\ \delta_{800} &= \frac{k}{800} \end{aligned} \right\} \frac{\delta_{400}}{\delta_{800}} = \frac{800}{400} = 2$$

$$\delta_{400} = 2 \delta_{800} = 2 \times \frac{\pi}{2} = \pi$$



La luz emergente está *polarizada linealmente* y *girada 90°* .

