

APUNTES DE MINERALOGIA OPTICA
OPTICAL MINERALOGY
WILLIAM D. NESSE
2 EDICION - 1991
OXFORD UNIVERSITY PRESS

1. LA LUZ

Naturaleza de la Luz

Forma de energía que se transmite de un lugar a otro y que puede ser detectada por el ojo. Puede ser tratada por teorías de partículas y de ondas. En el primer caso, la luz es compuesta por partículas subatómicas (fotones: micropartículas con masa nula). En átomos excitados, una cantidad de energía es liberada en forma de fotón cuando aquellos electrones externos, forzados a un nivel energético mayor, vuelven a su nivel energético normal. Según la teoría de ondas, la luz es una forma de energía radiante que viaja como onda de un lugar a otro. Las ondas o radiación electromagnética tienen propiedades eléctricas y magnéticas. La luz es una pequeña parte del espectro de radiación continuo que va desde rayos cósmicos (λ del orden de $10^{-4,-8}$ nm) a ondas de radio y eléctricas largas (λ del orden de $10^{14,18}$ nm). (1nm = 10^{-7} cm). La luz comprende el espectro de longitudes de ondas que va desde 400 nm (violeta) a 700 nm (rojo). La mecánica cuántica ha reconciliado ambas teorías. Desde ahora en adelante la luz es tratada como una radiación electromagnética ya que la teoría de ondas describe muy bien los *fenómenos de polarización, reflexión, refracción e interferencia*.

Radiación Electromagnética

Consiste en vectores eléctricos y magnéticos que vibran en ángulo recto a la dirección de propagación de la luz. Para la óptica mineral sólo es considerada la vibración del vector eléctrico (VE), siendo por ello equivalentes las direcciones de vibración de la luz y del VE (transversal y perpendicular a la dirección de propagación). Lo que afecta el comportamiento de la luz es la interacción de VE con el carácter eléctrico de los átomos y enlaces químicos en los minerales. La radiación electromagnética es análoga a las ondas de agua y onda sísmica S. La energía es propagada a través del material, pero las partículas de agua o tierra se mueven de un lado a otro mientras la onda pasa.

Una onda de luz está descrita por velocidad, longitud de onda y frecuencia ($f=V/\lambda$; hertz/ciclos por segundo; $f = \text{cte}$ sin importar el material por el que atraviese). Si la velocidad cambia entonces la longitud de onda también varía.

Ondas en masa y otros términos. *Frente de onda*, es la superficie formada por puntos similares en ondas adyacentes; *Normal de onda*, es la dirección de movimiento de la onda; *Rayo de luz*, es la dirección de propagación de energía lumínica. En *material isótropo*, donde la velocidad de la luz es la misma en todas las direcciones, el rayo de luz corresponde a la normal de onda. En *material anisótropo*, donde la velocidad de la luz es diferente en distintas direcciones, la dirección de normal de onda y del rayo de luz no son paralelas.

Fase

Si dos ondas vibran en un mismo plano y viajan con la misma trayectoria, ellas se interferirán. La distancia que una onda lleva detrás la otra se llama *retardo* (Δ). Cuando el retardo es un número entero de longitud de onda, ambas ondas están en fase y se interfieren constructivamente. La onda resultante es la suma de las dos. Si el retardo no es un número entero de longitudes de onda, las dos ondas estarían fuera de fase y la interferencia de ambas será destructiva. Cuando existe un retardo intermedio, la luz esta parcialmente en fase (o fuera de fase). Notar que en en figura ambos rayos vibran en el mismo plano, por lo que si estan es fase se interfieren constructivamente.

Si ambas ondas vibran con cierto ángulo entre ellas, la suma de vectores determinará una dirección de vibración resultante.

Percepción del color

El ojo humano puede discriminar diferentes longitudes de onda de la luz. La luz es percibida, desde 700 nm a 400 nm, como rojo, naranja, amarillo, verde, azul, violeta, respectivamente. La convención es identificar los diferentes colores con sus longitudes de onda, por ello no se referirá a la frecuencia de la luz, la que no varia al pasar a través de un material (lo que es conveniente matemáticamente).

Luz monocromática, es aquella que tiene sólo una longitud de onda. *Luz policromática*, consiste en más de una longitud de onda, alcanza los receptores de color del ojo, la combinación de colores es percibida como un sólo color (aunque la longitud de onda de ese color no este presente en la luz). Cuando todo el espectro visible esta presente, el ojo lo percibe como blanco. Así, combinaciones de otras longitudes producirán la sensación de colores.

Interacción de Luz y Materia

Velocidad. La velocidad depende de la naturaleza del material a través del cual la luz viaja y de la longitud de onda de la luz. La velocidad máxima de la luz (en vacío) es de $3 \cdot 10^{10}$ (cm/seg). Al penetrar otro medio, la velocidad disminuye, entre otras cosas, por la interacción entre VE de la luz y el ambiente electrónico que existe alrededor de cada átomo (núcleo cargado positivamente y rodeado por un número de electrones cargados negativamente). Ya que los electrones tiene poca masa, responden a las fuerzas impuestas por el VE de la luz. Cuando la luz alcanza un átomo, la nube de electrones asociada, es forzada a vibrar u oscilar a la misma frecuencia de la luz. Es así como la nube de electrones re-emite la luz, aunque fuera de fase con respecto a la luz incidente. La luz re-emitida alcanza otro átomo y se repite el proceso.

Reflexión. Cuando la luz alcanza la superficie entre dos medios o materiales, alguna parte atraviesa el nuevo material y otra parte es reflejada. Los ángulos de incidencia y reflexión son idénticos.

Indice de Refracción. Medida de cuán efectivo es el material en cambiar o doblar la luz incidente desde el vacío: $n = V_v/V$ (veloc.luz en vacio/veloc luz en material). Indice de refracción en el vacío = 1. Para todos los otro materiales $n > 1$. La mayoría de los minerales tienen índices que varían entre 1.4 y 2.0. En la práctica $n_{aire} = n_{vacio}$. Un mayor índice de refracción indica baja velocidad, y vice versa.

Ley de Snell: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Se aplica en materiales isótropo y anisótropos. Sin embargo, en materiales anisótropos, los ángulos θ_1 y θ_2 deben ser calculados de las normales de onda, y no del rayo (ambos no son coincidentes en materiales anisótropos).

Medios Isótropos y Anisótropos

Un material ópticamente isótropo muestra la misma velocidad de la luz en todas las direcciones (vidrios y minerales del sistema isométrico). En este material los enlaces químicos son los mismos en todas las direcciones, al menos en promedio, por lo que las nubes electrónicas pueden oscilar lo mismo en todas direcciones. Un material ópticamente anisótropo es tal que la velocidad de la luz es diferente en distintas direcciones (minerales de sistemas tetragonal, hexagonal, ortorómbico, monoclinico y triclínico). Muestran menor simetría y diferentes fuerzas de enlaces químicos en diferentes direcciones.

Dispersión

El índice de refracción de un material no es el mismo para todas las longitudes de onda de la luz. Esto es demostrable al pasar luz blanca por un prisma. La luz del extremo violeta del espectro es más fuertemente refractada que aquella en el extremo rojo. Esta relación, en la que los índices de refracción decrecen al aumentar la longitud de onda de la luz, se llama dispersión normal de índices de refracción. Cierta longitudes de onda (generalmente fuera del espectro visible) presentan dispersión anormal de índices de refracción. La dispersión es consecuencia de la interacción de la luz con las frecuencias resonantes naturales de las nubes electrónicas alrededor de cada átomo.

Absorción de la Luz y Color

EL color de un mineral o cualquier otro objeto es el color de la luz que no es absorbida en transmisión o reflexión. Un objeto blanco refleja esencialmente todo el espectro. Un objeto negro negro absorbe todas las longitudes de onda de la luz. El color de un objeto no es una propiedad inherente pero depende del color de la luz incidente. A escala atómica, si la frecuencia de la luz es cercana a la resonancia natural de las nubes electrónicas, la materia absorberá luz. La energía lumínica absorbida generalmente es convertida en calor.

Luz Polarizada

La luz ordinaria vibra en todas direcciones que sean perpendiculares a la dirección de propagación, y se dice que no esta polarizada. La dirección de vibración de la luz polarizada es determinada o controlada y por ello no es homogéneamente redistribuida alrededor de la dirección de propagación. Existen polarización plana, circular y elíptica. En la polarización plana el VE vibra en un plano único, y es el tipo polarización que se considera de aquí en adelante. La polarización de la luz puede ser por absorción selectiva (provee la base de películas o láminas polarizantes; eg. turmalina, pleocroismo), refracción doble (prismas de Nicol, de calcita), reflexión y dispersión.

4. OPTICA DE MATERIALES ISOTROPOS

En materiales isotrópicos, que incluyen gases, líquidos, vidrios y minerales del sistema isométrico, la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones. En estos materiales los enlaces químicos son los mismos en todas las direcciones (al menos en promedio), por lo que la luz que los atraviesa enfrenta o ve el mismo campo electrónico sin importar la dirección. Sin embargo, si los sólidos son deformados algunos enlaces serán estirados y otros comprimidos otorgando características de materiales anisótropos. Los llamados cristales líquidos utilizados en pantallas e instrumental electrónico son anisótropos ya que contienen moléculas asimétricas fuertemente alineadas que producen una estructura anisotrópica.

Indicatriz Isotropía

La indicatriz es una figura geométrica que muestra el índice de refracción y dirección de vibración de la luz que atraviesa un material en cualquier dirección. Una indicatriz se construye con índices de refracción graficados en líneas que van desde el origen y que son paralelas a la dirección de vibración de la luz. En materiales isotrópicos el índice de refracción de la luz es el mismo en todas las direcciones, por lo que la indicatriz 3D es una esfera.

Minerales Isótropos y Anisótropos

Minerales isótropos: son oscuros a nicols cruzados ya que ellos no afectan la dirección de polarización de la luz que proviene del polarizador inferior. La luz que atraviesa el mineral en la platina es absorbida en el polarizador superior. Ocasionalmente en los bordes o microfisuras de minerales se aprecian destellos de luz producidos en parte por reflexión.

Minerales anisótropos: Afectan la luz polarizada que los atraviesa, por lo que la luz puede pasar a través del polarizador superior. Pueden aparecer oscuros o extintos al rotar la platina.

5. OPTICA DE MINERALES ANISOTROPOS: INTRODUCCION

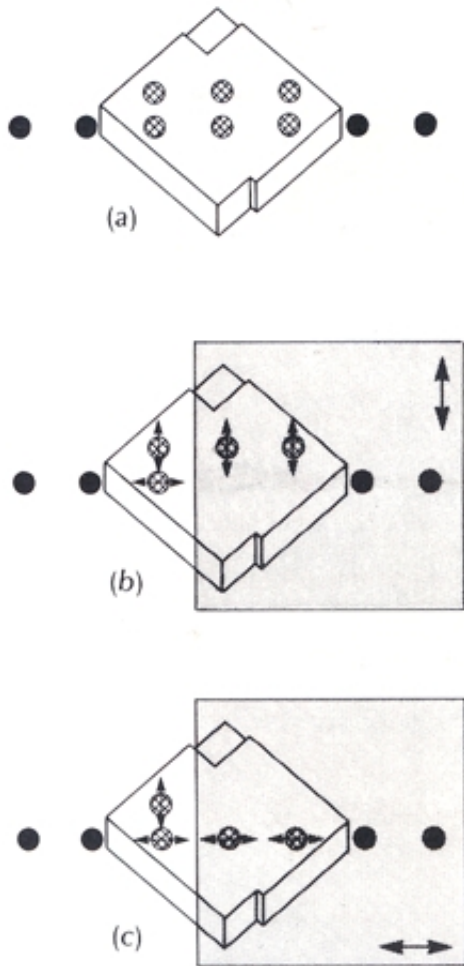


Fig. 5.1. Experiencia de doble refracción en calcita.

En minerales anisótropos la velocidad de la luz varía dependiendo de la dirección en la que atraviesa el mineral y muestran refracción doble. La luz que entra en un mineral anisótropo es concentrada en dos rayos con velocidades distintas. Ambos rayos vibran con ángulo recto entre ellos. Cada mineral anisótropo tiene una o dos direcciones, llamadas ejes ópticos, por las que la luz se comporta como si el mineral fuera isotrópico (extinto a nícoles cruzados). Minerales de los sistemas hexagonal y tetragonal tienen un sólo eje óptico y son ópticamente uniaxiales. Minerales de sistemas ortorrómbico, monoclinico y triclínico presentan dos ejes ópticos y son ópticamente biaxiales.

De la experiencia de doble refracción a través del cristal de calcita (Fig 5.1). Ambos rayos deben encontrarse polarizados (planos) y vibran en ángulo recto entre ellos, con índices de refracción distintos. El rayo con el menor índice es llamado rayo rápido y el rayo con mayor índice, rayo lento. La teoría electromagnética explica el por qué de la variación de velocidad de la luz con respecto a la penetración de la luz a través del mineral anisótropo. La fuerza de enlaces químicos y densidad de átomos son diferentes en distintas direcciones. La luz encuentra un campo o ambiente electrónico distinto dependiendo de la dirección y las nubes electrónicas sobre cada átomo vibran con frecuencias diferentes en distintas direcciones.

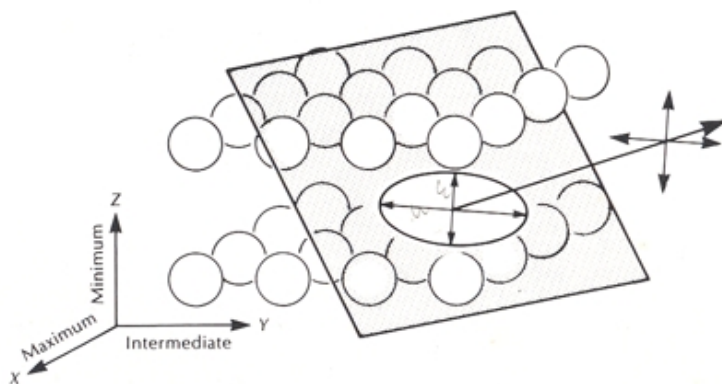
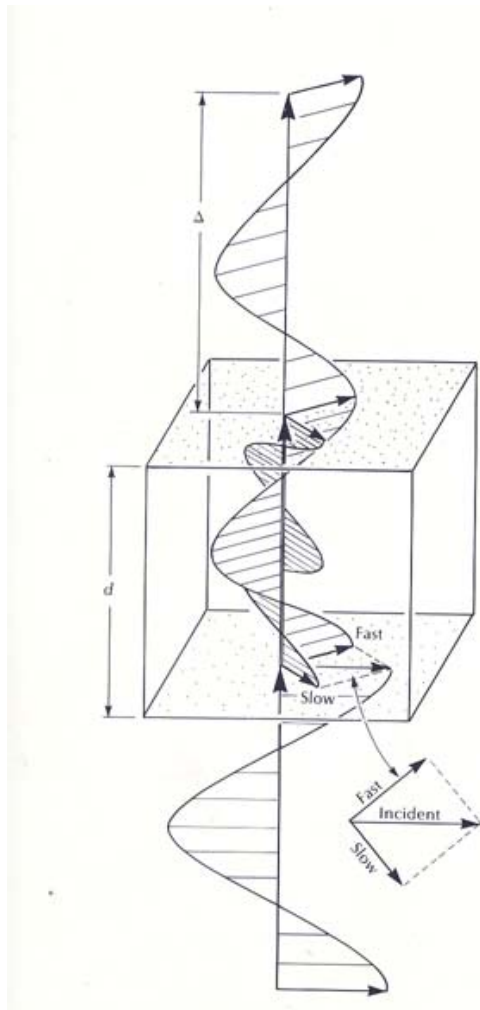


Fig. 5.2. Separación de la luz en dos rayos. Empaquetamiento de átomos a lo largo del eje X y espaciado a lo largo de Z.

Debido a que la velocidad de la luz depende de la interacción entre la vibración del VE y las frecuencias resonantes de las nubes electrónicas se puede anticipar que la velocidad podrá variar con la dirección. La teoría electromagnética también puede explicar el porqué la luz que atraviesa un mineral anisótropo se concentra en dos rayos vibrando en ángulo recto. Hay que considerar un frente de onda que se propaga por el mineral, con un vector de vibración contenido en el frente onda o tangente a él.

El frente de onda representa una sección plana a través del mineral. En esta sección varían la densidad promedio de nubes electrónicas, y por ello la fuerza del campo eléctrico varía con la dirección. Con artefactos matemáticos apropiados se demuestra que la fuerza del campo eléctrico representa una elipse en el frente de onda. Los ejes de la elipse representan los campos de fuerzas máximo y mínimo, se encuentran en ángulo recto y corresponden a la dirección de vibración de los dos rayos. Debido a que ambos rayos interaccionan con diferentes nubes de electrones y campos de fuerza asociados con diferentes frecuencias resonantes, sus velocidades e índices de refracción deben ser diferentes. Sin embargo, existirán uno o dos planos (en minerales uniaxiales y biaxiales, respectivamente) que presentarán densidades uniformes de nubes de electrones (en el frente de onda el campo de fuerzas es un círculo). Las líneas perpendiculares a estos planos son los *ejes ópticos* que representan direcciones en el mineral a lo largo de las cuales la luz es propagada sin ser dividida o concentrada en dos rayos.

Fenómeno de Interferencia



A nicols cruzados los minerales se ven iluminados y con colores vivos. Los colores vistos a nicols cruzados son llamados *colores de interferencia* y se producen como consecuencia de la refracción doble a través del mineral anisótropo. Ambos rayos vibran en ángulo recto y tienen velocidades distintas (están fuera de fase). La amplitud de cada rayo puede ser determinada por adición vectorial, como se muestra a continuación.

La magnitud de *retardo* entre ambos rayos va a depender del espesor del material y de la diferencia de velocidades (e índices de refracción) entre el rayo lento (RL; s:slow) y el rayo rápido (RR; f:fast). Tal que $\Delta = d(n_s - n_f)$. El término $(n_s - n_f)$ es llamado **birrefringencia** y su valor numérico va a depender de la trayectoria de la luz a través del mineral. Por ejemplo, si la luz va a lo largo de los ejes ópticos muestra birrefringencia igual a cero. Otras trayectorias muestran valores máximos y la mayoría valores intermedios. La birrefringencia máxima es característica de cada mineral, aunque también variaría con la longitud de onda de la luz. Sin embargo los valores numéricos de birrefringencia son para luz con longitud de onda de 589 nm.

Fig. 5.3. Desarrollo del retardo en mineral de espesor d . La luz que entra se divide en dos rayos, RL y RR.

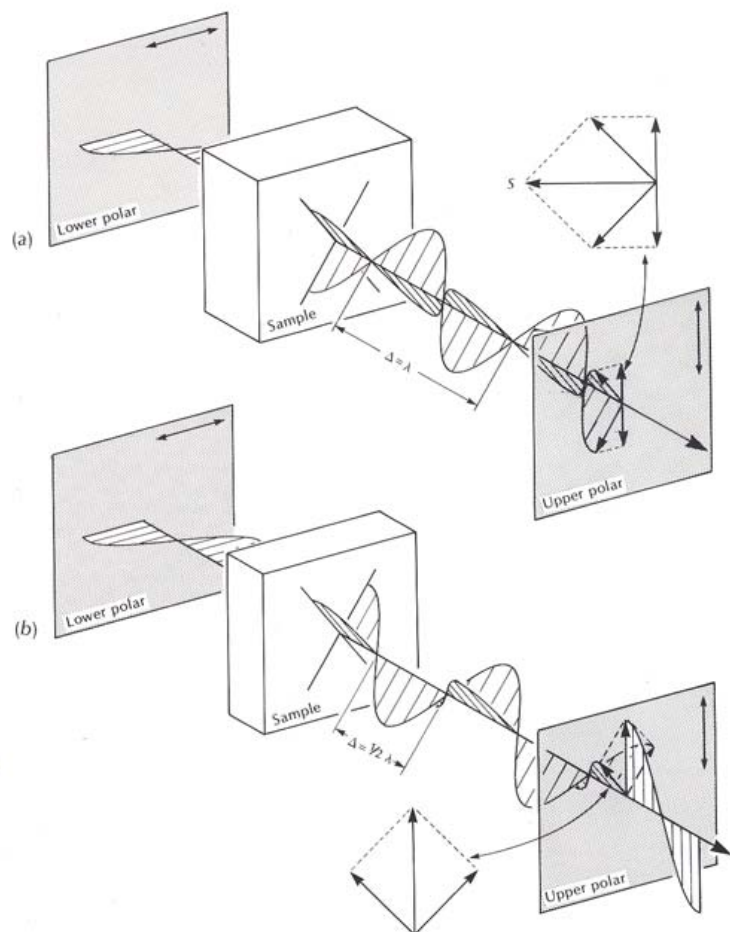


Fig. 5.4. Interferencia en el polarizador superior. (a) El retardo es una longitud de onda, en (b) el retardo de media longitud de onda.

La interferencia de los dos rayos (con luz monocromática). Cuando ambos rayos salen de la parte superior del mineral el RR va ir adelante del RL por una cantidad igual al retardo. El fenómeno de interferencia se produce cuando cuando ambos rayos se resuelven en la dirección del polarizador superior, siendo determinante el hecho de que ambos se encuentren en fase ó fuera de fase. *En fase y con un retardo de número entero de longitud de onda* ($\Delta = i\lambda$). Ambos rayos están en fase pero vibrando en ángulo recto los componentes resultantes se encuentran en direcciones opuestas por lo que ellos se interfieren destructivamente y se cancelan uno al otro. La luz no atraviesa el polarizador superior y el mineral se ve oscuro. *Fuera de fase con un retardo de un número no entero de longitud de onda* ($\Delta = (i+1/2)\lambda$). Ambos rayos se resuelven en la dirección de vibración del polarizador superior, ambos componentes están en la misma dirección por lo que se interfieren constructivamente y la luz atraviesa el polarizador superior con una intensidad máxima. Para todos los otros valores de retardo la luz que llega al polarizador superior tiene polarización elíptica o circular por lo que algunos componentes de la luz pueden pasar. Experiencia con una cuña de cuarzo (Fig. 5.5). Si el polarizador superior es rotado (paralelo al inferior) las relaciones descritas anteriormente son inversas, es decir, cuando ambas ondas están en fase interfieren constructivamente y si están fuera de fase interfieren destructivamente.

La interferencia de los dos rayos (con luz policromática). En la luz blanca todas las posibles longitudes de onda están presentes y cada una es dividida en dos rayos, lento y rápido. Dado un espesor del mineral, para todas las longitudes de onda se producirá un retardo de aproximadamente el mismo valor. Ya que son diferentes longitudes de onda, algunas atraviesan la parte superior del mineral en fase por lo que se

cancelan unas a otras, mientras otras están fuera de fase y se transmiten. *La combinación de longitudes de onda producen los colores de interferencia*. Ellos no son una propiedad inherente del mineral pero dependen del retardo entre RR y RL y por ello del espesor y birrefringencia del mineral ($\Delta = d(n_s - n_f)$). Experiencia con una cuña de cuarzo (Fig. 5.6). Cuando es cercana a cero ($\Delta = 0 \lambda$) entonces todas las longitudes de onda se cancelan en el polarizador superior y el color es negro o gris oscuro. A medida que el espesor aumenta el color varía entre negro y gris, blanco, amarillo, rojo y luego repitiendo la secuencia de azul (450-500 nm), verde (500-580 nm), amarillo (580-595 nm) y rojo (650-750 nm), con cada repetición los colores son cada vez más claros. Si el retardo es de 250 nm, sobre el 80% de todos los RR y RL están fuera de fase por lo que atraviesan el polarizador superior. La luz aparece blanca con tonalidades de amarillo ya que pequeñas cantidades de rojo y violeta (miembros extremos) se cancelan en el polarizador superior. Si el retardo es de 500 nm, entonces cantidades sustanciales de azul y verde del espectro son canceladas y la luz que pasa a través del polarizador superior es percibida como roja. Si el retardo es de 2500 nm una aparte sustancial de cada sección del espectro puede pasar y la luz es percibida como blanco lechoso. En la carta de colores se encuentran graficados la cantidad de retardo diferencias de RR y RL que se encuentra asociada con cada color de interferencia.

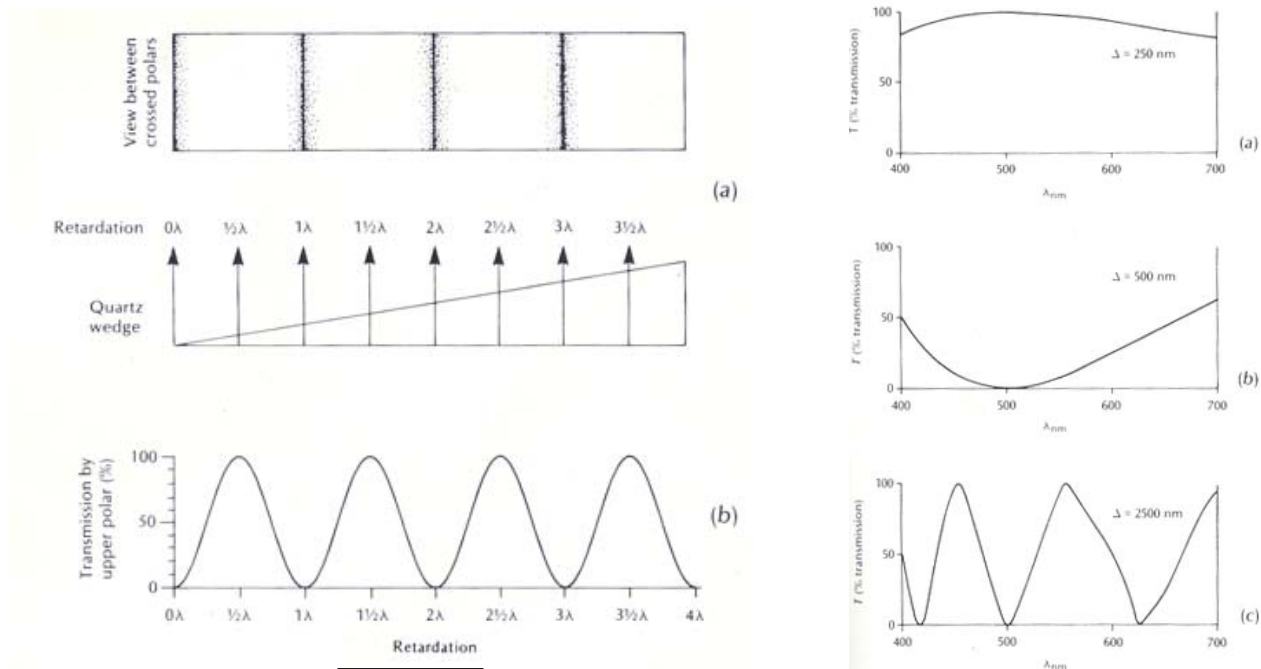


Fig.5.6

Fig. 5.5. Patrón de interferencia producido por una cuña de cuarzo (luz monocromática).

Fig. 5.6. Formación de colores de interferencia con luz policromática. (a) blanco de primer orden. (b) rojo de primer orden (rojo y violeta a los extremos). (c) blanco de mayor orden.

Orden de color de interferencia. Los de primer orden son producidos por un retardo menor que 550nm, los de segundo orden son aquellos producidos con retardo entre 550 y 1100 nm, y así sucesivamente. Los de primer y segundo orden son de colore más vívidos y así progresivamente se van haciendo más pálidos.

Colores de interferencia anómalos. Algunos minerales muestran colores que no aparecen en la tabla de colores. Se producen cuando la birrefringencia y retardo de las distintas longitudes de onda son significativamente diferentes.

Determinación de birrefringencia con la carta de colores. En una *sección o lámina delgada* el espesor la sección es conocido por lo que la birrefringencia de un mineral desconocido puede ser determinada.

Extinción. Sin importar si el eje óptico es vertical, los minerales anisótropos se ven oscuros o extintos a nicoles cruzados una vez cada 90° de rotación de la platina del microscopio. La extinción ocurre cuando una dirección de vibración del mineral se orienta paralela al polarizador inferior. Ninguna componente de la luz incidente puede resultar paralela al polarizador superior por lo que toda la luz que pasa a través del mineral es absorbida por el polarizador superior. Si la posición del grano mineral es de 45° con respecto al ángulo de extinción, la máxima componente de RL y RR es resuelta en la dirección de vibración del polarizador superior. Pasa un máximo de luz y el mineral aparece brillante. La relación de fase entre RR y RL, y por ello el color de interferencia, no son afectados por la rotación de la platina. EL color de interferencia sólo varía en término de brillo y opacidad. En minerales elongados y en aquellos donde puede ser fácilmente observado el clivaje, el ángulo entre el largo o clivaje de un mineral y su dirección de vibración es una propiedad diagnóstica llamada ángulo de extinción. *Categorías de extinción.* Extinción paralela (paralela al polarizador), inclinada (inclinada u oblicua al polarizador), simétrica (en minerales con dos clivajes o caras) sin ángulo de extinción. Que en un sólo grano mineral se extinga en distintas partes mientras se rota la platina puede deberse a zonaciones químicas o desarrollo de microestructuras por deformación. A nicoles cruzados los minerales se extinguen cuando la dirección de vibración de los rayos que atraviesan el mineral coincide con la dirección de vibración de los polarizadores inferior y superior.

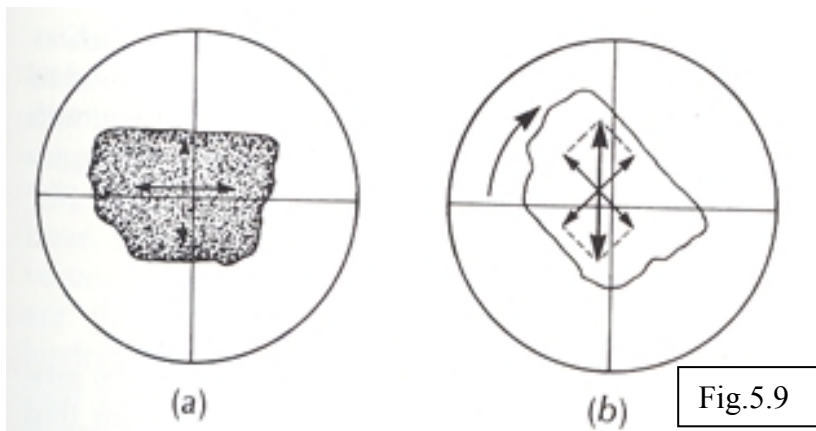


Fig. 5.9. Extinción. (a) Cuando la dirección de vibración del mineral es paralelo a los polarizadores inferior y superior (extinto a nicoles cruzados). (b) Si el mineral es rotado las direcciones de vibración del mineral no serán paralelas a las de los polarizadores (brillante a nicoles cruzados).

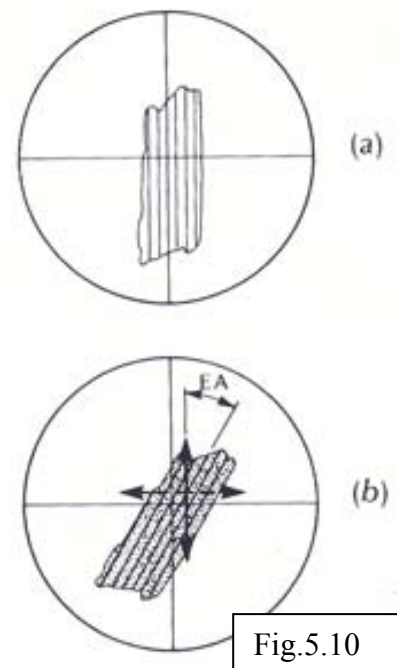
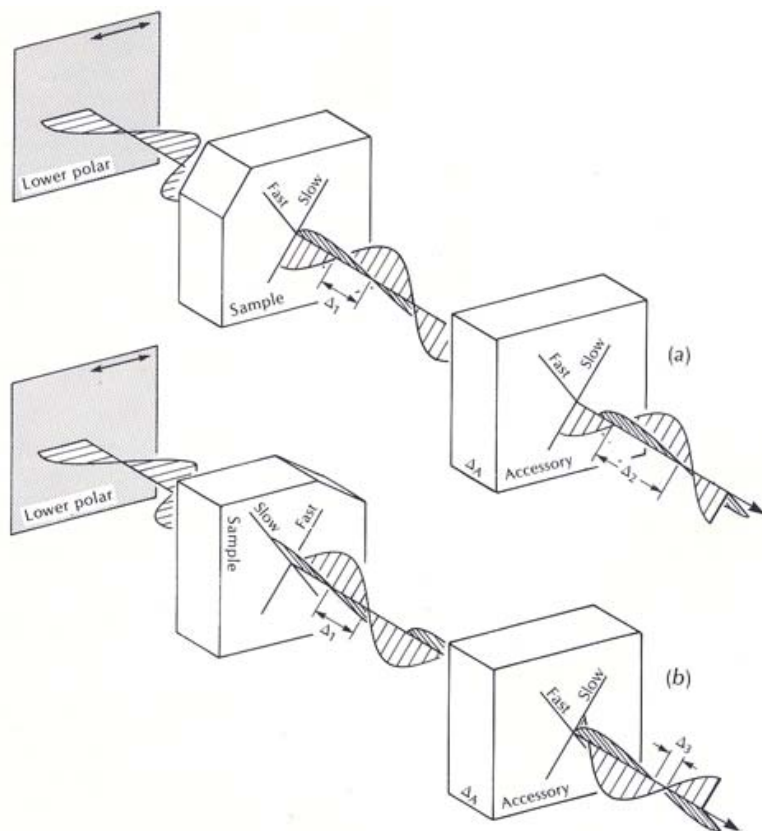


Fig. 5.10. Medida del ángulo de extinción.



Uso de placas accesorias. Frecuentemente es necesario determinar cual de los dos rayos que atraviesa el cristal es el rápido o el lento, para lo que se utilizan placas accesorias. Las placas consisten en piezas de cuarzo, muscovita o yeso montadas en un portador de tal forma que su dirección de vibración es conocida. Considerar la Figura (5.12). La luz es concentrada en dividida en dos rayos, RR y RL. Al salir del mineral el RL va atrás del RR a una distancia igual a un retardo Δ_1 . Si la placa accesoria (con retardo de Δ_A) se coloca de tal forma que las direcciones de vibración de rayos lentos es paralela, entonces el rayo que era el RL en el mineral será también RL en la placa. El resultado es un retardo mayor de $\Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_A$, de ambos rayos cuando lleguen al polarizador superior. Por ello un color de interferencia de mayor orden será producido.

Fig. 5.12. Compensación con placas accesorias. (a) $\Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_A$. (b) $\Delta_3 = \Delta_1 - \Delta_A$.

Al rotar el mineral de tal forma que la dirección del RR en él es paralela a la dirección de vibración lenta de la placa, el rayo que era RL en el mineral se hace más rápido en la placa. El resultado es que la placa accesoria cancela parte del retardo producido por el mineral. El retardo total es de $\Delta_3 = \Delta_1 - \Delta_A$ y el color de interferencia producido en el polarizador superior de un color de menor orden. Generalmente en los microscopios el largo de la placa accesoria se orienta NW-SE. La dirección de vibración del RR es paralela al largo de la placa (NW-SE) y la dirección del RL paralela al ancho (NE-SW). Para determinar cual de las direcciones de vibración en un grano mineral pertenece ya sea al RL o al RR, se debe hacer lo siguiente: 1) Rotar la platina hasta que el mineral se encuentre extinto; en esta posición una de las direcciones de vibración es paralela al NS y la otra al paralela al EW (de los polarizadores); 2) Rotar la platina en 45° en sentido horario; la dirección de vibración que era paralela al NS esta ahora orientada NE-SW. Buscar el color de interferencia en la tabla de colores y registre el retardo que corresponde a ese color (Δ_1). 3) Insertar la placa de yeso (retardo de ca. 550 nm); la dirección de vibración del RL de la placa en NE-SW; determinar si el color de interferencia de ahora es mayor o menor. Si el color se fue hacia arriba, debería corresponder al color de la tabla producido por un retardo de $\Delta_1 + 550$ nm. Si el color se fue hacia abajo, debería ser el color asociado a un retardo de $\Delta_1 - 550$ nm. Si el último valor es negativo hay que usar el valor absoluto. 4) Interpretación. Si el color ha sumado (hacia arriba) entonces el RL en la placa accesoria (NE-SW) es paralelo al rayo lento en el grano mineral (también NE-SW). Si el color ha disminuido (hacia abajo) entonces el RL de la placa accesoria es paralelo al RR en el mineral; aumento de color: lento en lento; disminución de color: lento en rápido. La placa de mica produce un retardo de 147 nm. La cuña de cuarzo tiene forma de cuña y por ello produce un rango variable de retardo.

Signo de Elongación. Los términos *largo rápido* y *largo lento* se encuentran en descripciones de minerales en muchos textos. Largo rápido significa que el RR vibra más o menos paralelo al largo de un mineral elongado. Largo lento significa que el RL vibra más o menos paralelo al largo de un mineral elongado. Largo lento es también llamada elongación positiva y largo rápido es llamada elongación negativa. El signo de elongación no es lo mismo que el signo óptico (asunto que se verá más adelante). No todos los minerales tienen signo de elongación, por ejemplo aquellos minerales que no son elongados. Otro caso en que el signo de elongación no puede ser utilizada podría ser aquel en que la dirección de vibración es a 45° a lo largo del cristal.

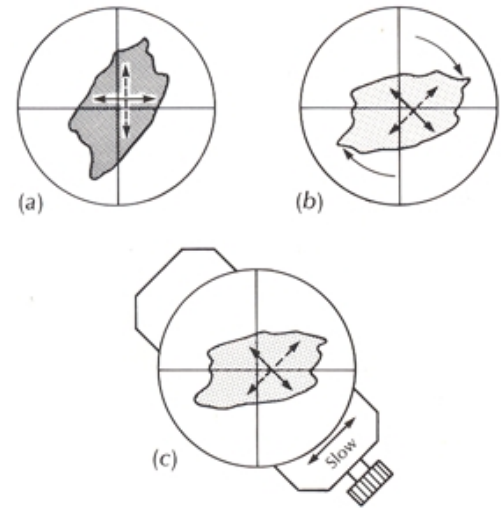
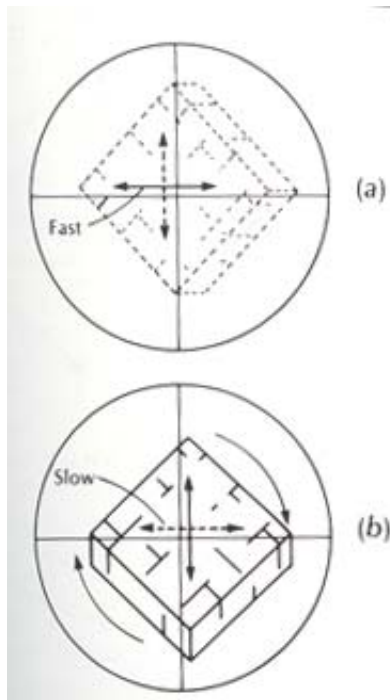


Fig. 5.13. Determinando la dirección de vibración lenta y rápida. (a) mineral extinto a nicoles cruzados, direcciones de vibración en mineral son paralelas los polarizadores. (b) Mineral rotado en 45° . (c) introducir placa accesoria. Si el color de interferencia aumenta, el rayo NE-SW en el mineral es el rayo lento. Si el color de interferencia decrece el rayo NE-SW es el rayo rápido.



— **Relieve.** Aquellos minerales que presentan birrefringencia moderada a fuerte pueden mostrar un cambio en relieve (a nicoles paralelos) cuando la platina es girada. La diferencia en relieve es el producto de que ambos rayos que vienen desde el mineral tienen diferentes índices de refracción. Caso calcita en bálsamo de $n = 1.55$. Si el cristal está orientado de tal forma que sólo el RR ($n = 1.57$) puede pasar, entonces el grano muestra bajo relieve (es muy similar al bálsamo). Si el cristal se encuentra en una posición tal que sólo el RL ($n = 1.658$) puede pasar, entonces el mineral mostrará mayor relieve. Debido a que la birrefringencia depende de la dirección en la que la luz pasa a través del mineral, no todos los granos de un mineral mostrarán necesariamente el mismo cambio de relieve. Los granos que se encuentran de tal forma que muestren mayor birrefringencia muestran un cambio máximo de relieve como de color de interferencia. Hay que notar también que un cambio de relieve puede ser visto sólo cuando el índice de refracción del bálsamo es cercano al índice de uno de los rayos. Si la birrefringencia es baja, el cambio de relieve no es apreciado. Hay también asociadas a cada rayo una línea de Becke.

Fig. 5.14. Cambio de relieve al rotar un mineral anisótropo. (a) calcita inmersa en un bálsamo de $n = 1.550$. La calcita está orientada de tal forma que el rayo rápido con $n = 1.57$ puede pasar y por ello el grano muestra menor relieve. (b). Solo el rayo con $n = 1.658$ puede pasar y muestra mayor relieve.

Pleocroismo. Muchos minerales coloridos y anisótrpos muestran un cambio de color mientras la platina del microscopio es girada en luz polarizada plana (nicoses paralelos). Este cambio de color se llama pleocroismo. Se produce debido a que los dos rayos de luz son absorvidos de forma diferente cuando atraviesan el mineral colorido, y por ello presentan distintos colores. En la Fig. 5.15, el RR es amarillo y el RL es verde. Cuando la vibración del RR es paralela a la dirección del polarizador inferior, la luz que viene del polarizador pasa toda como RR, el mineral aparece de color amarillo. Si se rota en 90° , con el RL paralelo al polarizador inferior, el mineral aparece verde pues toda luz que atraviesa el mineral pasa como RL. EN posiciones intermedias ocurrirán colores intermedios.

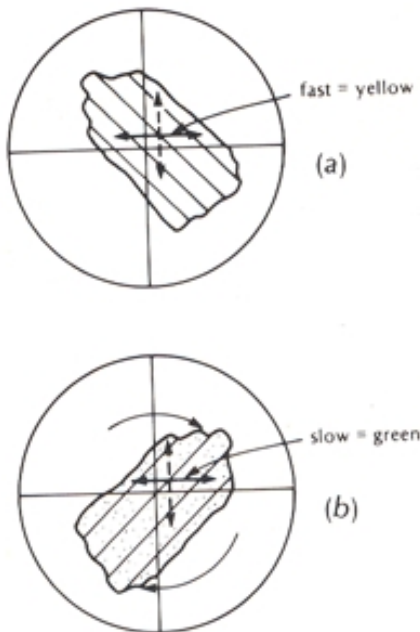


Fig. 5.15. Pleocroismo visto con luz polarizada plana. (a) el rayo rápido es amarillo, por lo que cuando es paralelo al polarizador inferior (EW) el mineral es amarillo. (b) el rayo lento es verde. Posiciones intermedias dan colores intermedios.

6. OPTICA UNIAXIAL

Caso Calcita. Refracción doble, de rayos extraordinario (ϵ) y ordinario (ω). ϵ tiene una velocidad de vibración perpendicular a ω en un plano que contiene al eje c . ω tiene una velocidad de vibración en el plano (0001) perpendicular al eje c . En el caso que la sección del cristal es tal que la luz atraviesa a lo largo del eje c , sólo se ve una imagen (en todas la otras secciones ocurrirán la refracción doble). La luz se polariza y por ello el eje c coincide con el eje óptico. Eje óptico es la dirección en el mineral en la cual la luz puede propagarse sin dividirse en dos rayos. Índices de refracción: $n_\omega = 1.658$ (cte) y $n_\epsilon = 1.486-1.658$ (variable). La birrefringencia es nula cuando la luz va por el eje c . Será máxima si la luz va o forma ángulo recto con el eje c . La cantidad de separación entre ambas imágenes va a depender de la birrefringencia. Por ejemplo, el cuarzo tiene baja birrefringencia, por lo que hay poca separación (incluso en cortes o láminas gruesas).

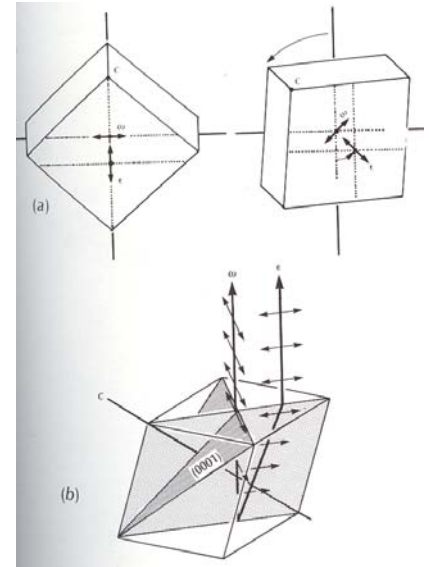
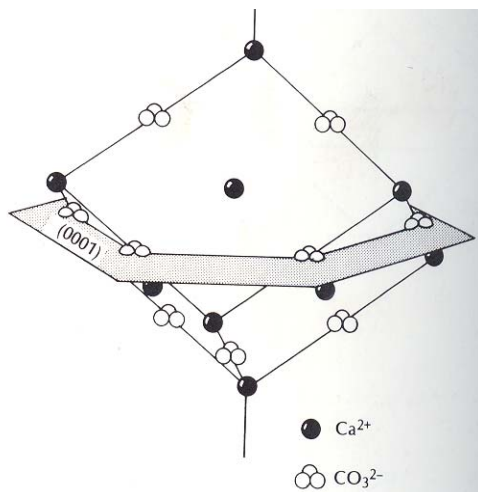


Fig. 6.1. Doble refracción en calcita.

Signo Optico.

Mineral uniaxial positivo (+): $n_\epsilon > n_\omega$ / rayo ϵ = rayo lento (ϵ es RL)

Mineral uniaxial negativo (-): $n_\epsilon < n_\omega$ / rayo ϵ = rayo rápido (ϵ es RR)



Consideraciones cristalográficas. Minerales uniaxiales son de los sistemas hexagonales o tetragonales. Tienen fuerte simetría en torno al eje c . Enlaces químicos uniformes en todas las direcciones contenidas en los planos (001) (0001), que es ortogonal al eje c . Entre estos planos ocurren diferentes fuerzas de enlace. Si la luz va por el eje c entonces adquiere las características de un mineral isotrópico (vibración paralela a los planos (001) (0001)). Si la luz va oblicua al eje c , la velocidad de vibración del rayo ordinario es paralela a los planos (001) (0001), y la velocidad de vibración del rayo extraordinario atraviesa esos planos. El rayo ω siempre vibra en el mismo campo electrónico. Si $n_\epsilon \neq n_\omega$, que sea mayor o menor va a depender de los enlaces químicos y estructura cristalina.

Fig. 6.2. Estructura cristalina de la calcita.

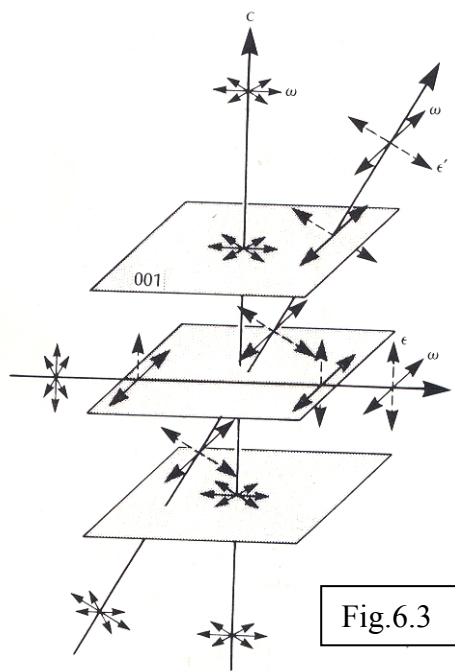


Fig.6.3

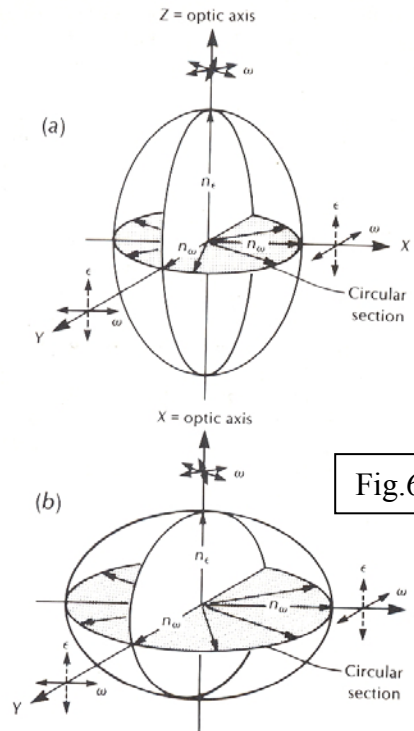


Fig.6.4.

Fig. 6.3. direcciones de vibración de la luz que atraviesa a lo largo del eje c o en forma inclinada.

Fig. 6.4. Indicatriz Uniaxial. (a) positivo. (b) negativo.

Indicatriz Uniaxial. La indicatriz es una figura geométrica que incorpora los índices de refracción, dirección de vibración de los dos rayos que atraviesan el mineral. La indicatriz se construye de tal forma que los índices de refracción aparecen graficados como radios paralelos a dirección de vibración de la luz.

Fig. 6.4. Indicatriz uniaxial, (a) positiva (esferoide prolato) y (b) negativa (esferoide oblato). Se ilustra la sección circular (en XY) y una sección principal (incluye el eje óptico). Al girar 360° una sección principal se forma un elipsoide de revolución. En dicha sección los radios corresponden a los índices de refracción n_e y n_o . Una sección perpendicular al eje óptico será circular y tendrá un radio de n_o .

Birrefringencia y Colores de Interferencia. Va a depender de la dirección en la que la luz atraviesa el cristal.

Pleocroismo. En turmalina (schorlita) el pleocroismo puede ser descrito como ω = verde oscuro y ϵ = verde claro. Otra alternativa es especificar cual rayo es de color más oscuro.

Figura de Interferencia. La figura de interferencia otorga la base para determinar si un mineral anisótropo es uniaxial o biaxial, y también para determinar el signo óptico.

Figura de Interferencia en Eje Optico. Si el eje óptico esta perpendicular a la platina la figura de interferencia es como a aparece en la Fig.6.13. La cruz esta formada por barras negras llamadas *isógiras*. El punto en el centro donde ambas isógiras se cortan se llama *melatopo*, que marca la emergencia del eje óptico. Los colores de interferencia aumentan hacia afuera desde el melatopo. Los más cercanos son de primer orden. Forman bandas de color llamadas *isóchromas*. Si el eje esta centrado la figura no debería moverse al momento de rotar la platina.

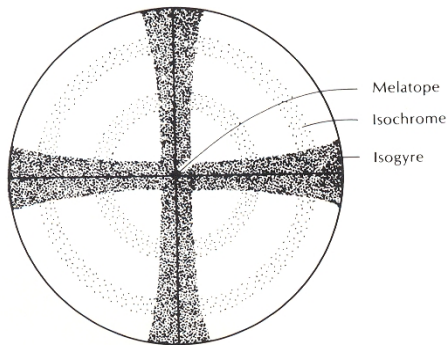


Fig. 6.13. Figura de interferencia en eje óptico uniaxial.

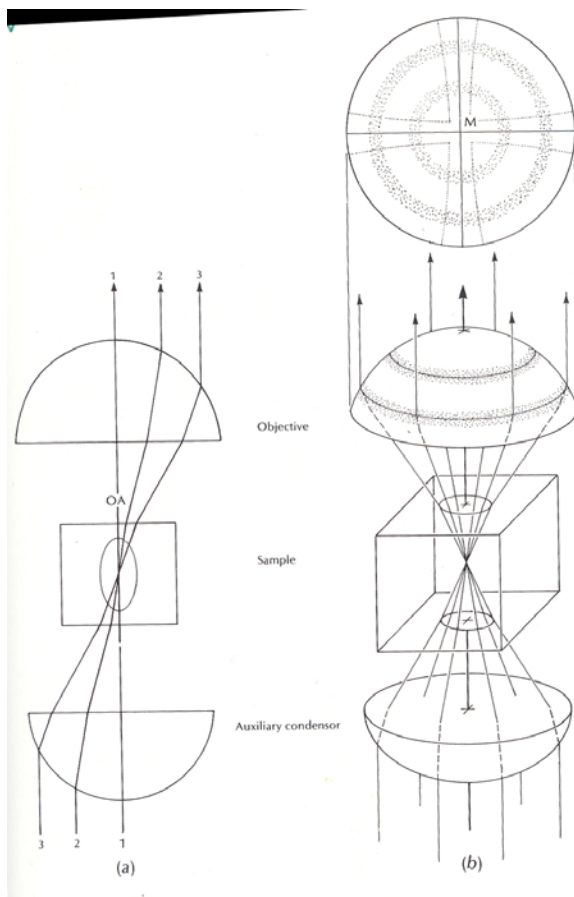


Fig. 6.14. Formación de isóchromas

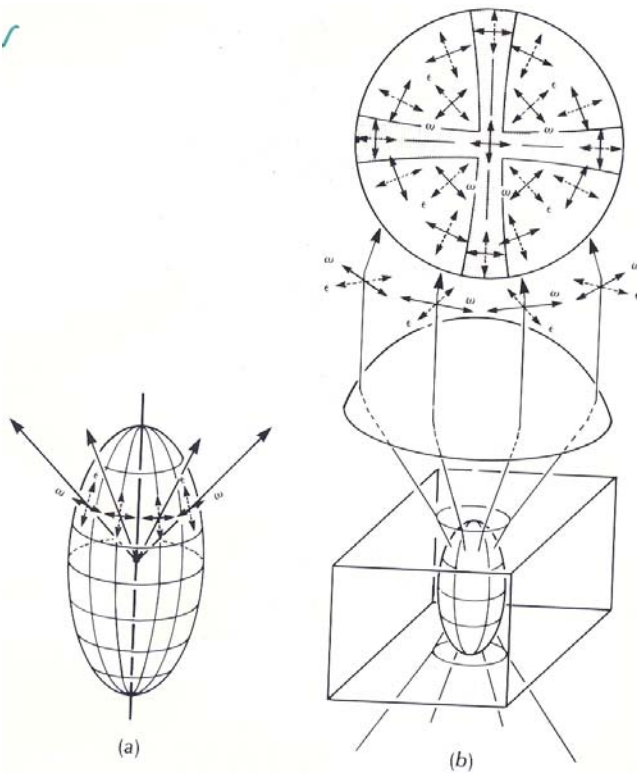


Fig. 6.15. Formación de isógiras.

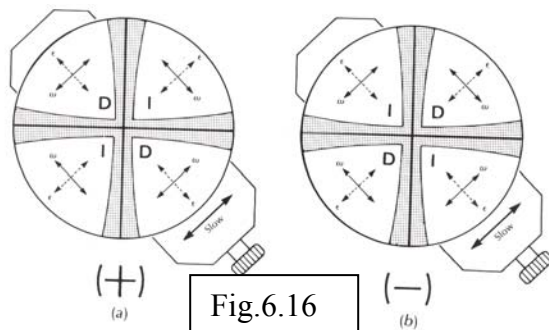


Fig.6.16

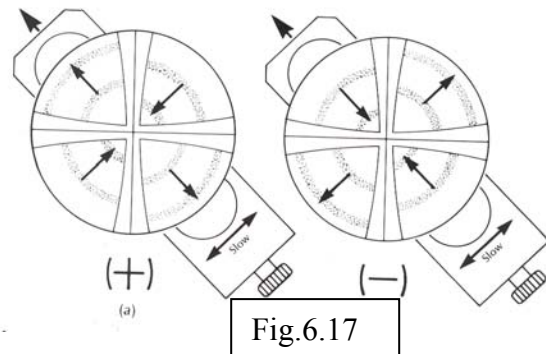


Fig.6.17

Fig. 6.16. Detreminación del signo óptico. I: indica que los colores aumentan. D :indica que los colores decrecen.

Fig. 6.17. Movimiento de la isócronas con la inserción de una cuña de cuarzo. Indicativo de signo óptico.

Figura de Interferencia fuera del Eje Optico. La figura no estará centrada en el campo visual. El melatopo gira en arco al girar la platina (Fig. 6.18).

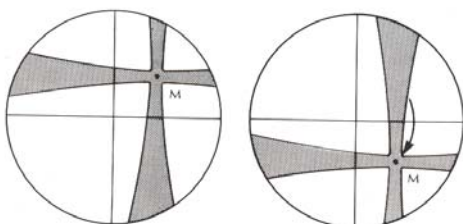


Fig. 6.18. Figura descentrada.

than thin or low birefringence minerals. If the central part of the figure is first-order white, the quadrants containing the optic axis will be first-order gray and the other quadrants will be pale first-order yellow.

The grains shown in Figures 6.10c, 6.11c, and 6.12c are oriented to produce flash figures.

The optic sign can be determined from a flash figure as follows.

1. Rotate the stage until the isogyre fills the field of view. The optic axis is now either parallel to the N-S or to the E-W crosshair.
2. Slowly rotate the stage and note the quadrants from which the isogyres leave the field of view. The optic axis will be entering the quadrants from which the isogyres exited.
3. If the isogyres left the field from the NW and SE quadrants, continue rotating the stage to make a total of 45°. This places the optic axis NW-SE. If the isogyres left the field from the NE and SW quadrants, reverse the direction of rotation so that they leave from the

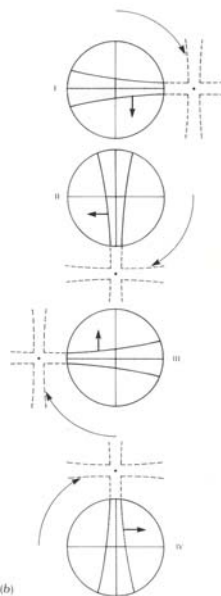
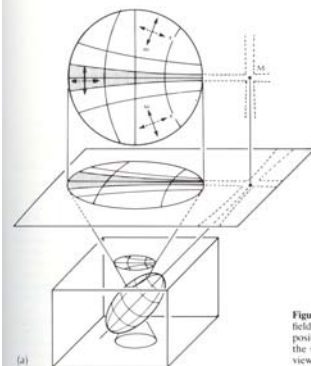


Figure 6.19 Off-center optic axis figure: metatop off the field of view. (a) The isogyre gets wider away from the position of the metatop (M). (b) Clockwise rotation of the stage causes the isogyres to sweep across the field of view in the sequence I to IV. The isogyres remain roughly parallel to the crosshairs and move in the direction indicated by the arrows.

Fig. 6.19. Figura de interferencia fuera del eje.

Figura Flash. Si la sección del mineral está orientado de tal forma que el eje óptico se horizontal o paralelo a la platina se produce una figura flash. Fig. 6.20. Las direcciones de vibración son paralelas. Los rayos extraordinarios vibran aproximadamente paralelos al eje óptico y los rayos ordinarios vibran aproximadamente a 90° del eje óptico. Si el eje óptico está NS o EW el campo visual será ocupado por isóginas borrosas. Si el eje es colocado NW y SE, por ejemplo, el campo será completamente ocupado por colores de interferencia.

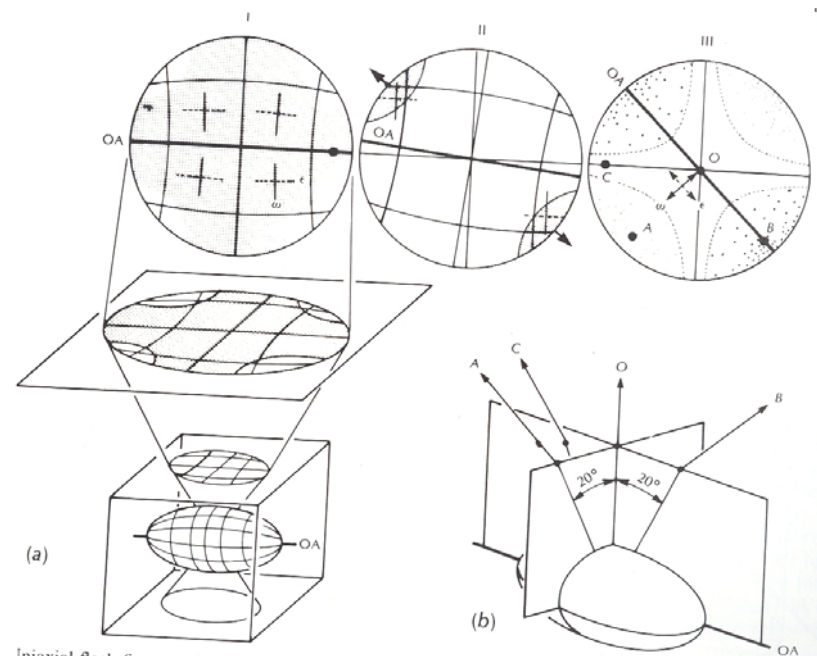


Fig. 6.20. Figura flash uniaxial.

7. OPTICA BIAXIAL

Figuras Claves

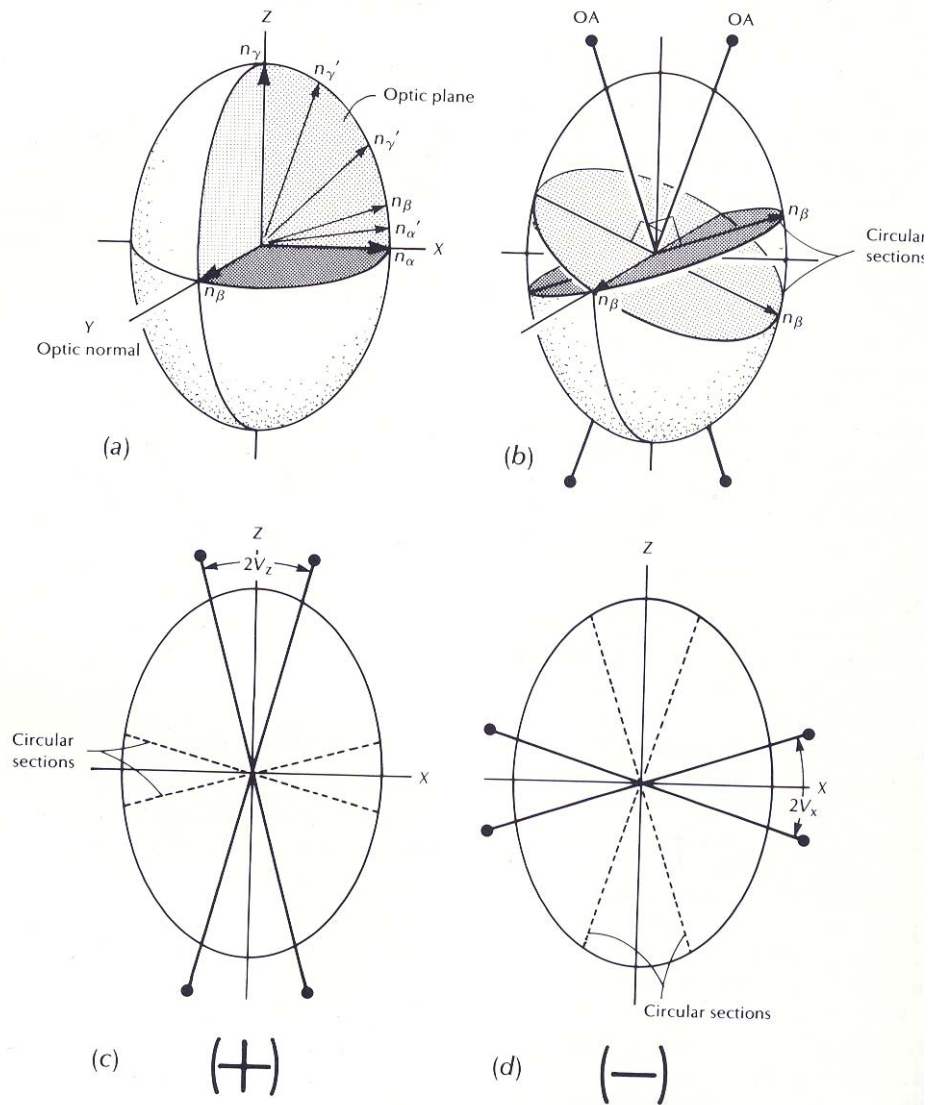


Fig. 7.1. Indicatriz biaxial.

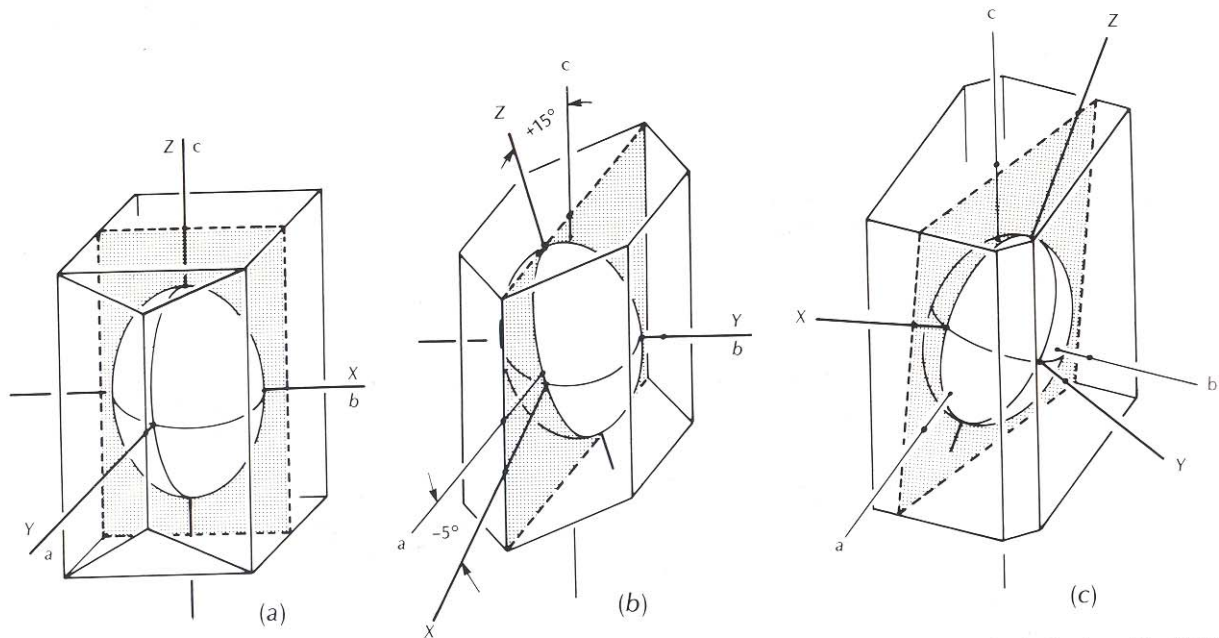


Figure 7.11 Relationship between crystal axes and indicatrix axes. The optic planes are shaded. (a) Orthorhombic. Crystal axes and indicatrix axes coincide. (b) Monoclinic. The b crystal axis coincides with one of the indicatrix axes. The other axes do not coincide except by chance. In this case $b = Y$, so the optic plane is parallel to (010). If $b = X$ or Z , then the optic plane is at right angles to (010). (c) Triclinic. None of the crystal axes coincide with indicatrix axes except by chance.

Fig. 7.11.

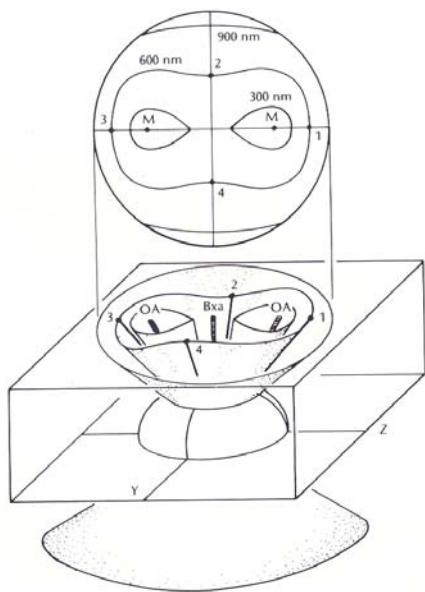


Fig. 7.13. Formación de isocromas.