

Lección 6: Propagación de la luz en cristales (1)

(1 eje óptico y observación ortoscópica)

Resumen

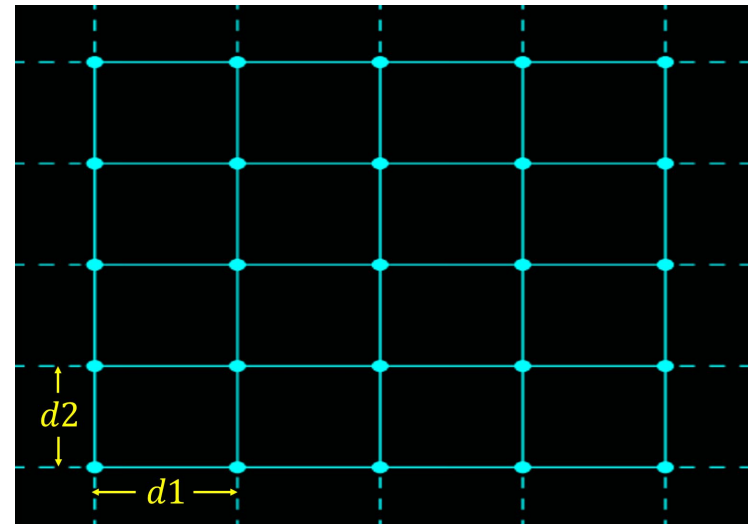
Un cristal muestra birrefringencia cuando su estructura es anisotrópica. En este caso, un haz luminoso incidente se divide en dos haces polarizados linealmente cuyos planos de oscilación son perpendiculares entre sí. Uno de los haces sigue la ley de la refracción y se llama haz ordinario. El otro haz tiene una velocidad de propagación que depende de la dirección y se denomina haz extraordinario. Si el cristal es ópticamente uniaxial, el comportamiento puede describirse con 2 índices de refracción.

Tabla de contenidos

- Folio 2: Materiales anisótropos
- Folio 3-4: Birrefringencia (1-2)
- Folio 5-6: Ondas elementales según Huygens (1-2)
- Folio 7: Índice de refracción de cristales uniaxiales
- Folio 8-11: Propagación de los rayos ordinarios y extraordinarios (1-4)
- Folio 12: Retardación
- Folio 13: Observación ortoscópica
- Folio 14-17: Condiciones de oscuridad (1-4)
- Folio 18: Identificación de minerales
- Folio 19: Escala de colores de Michel-Lévy

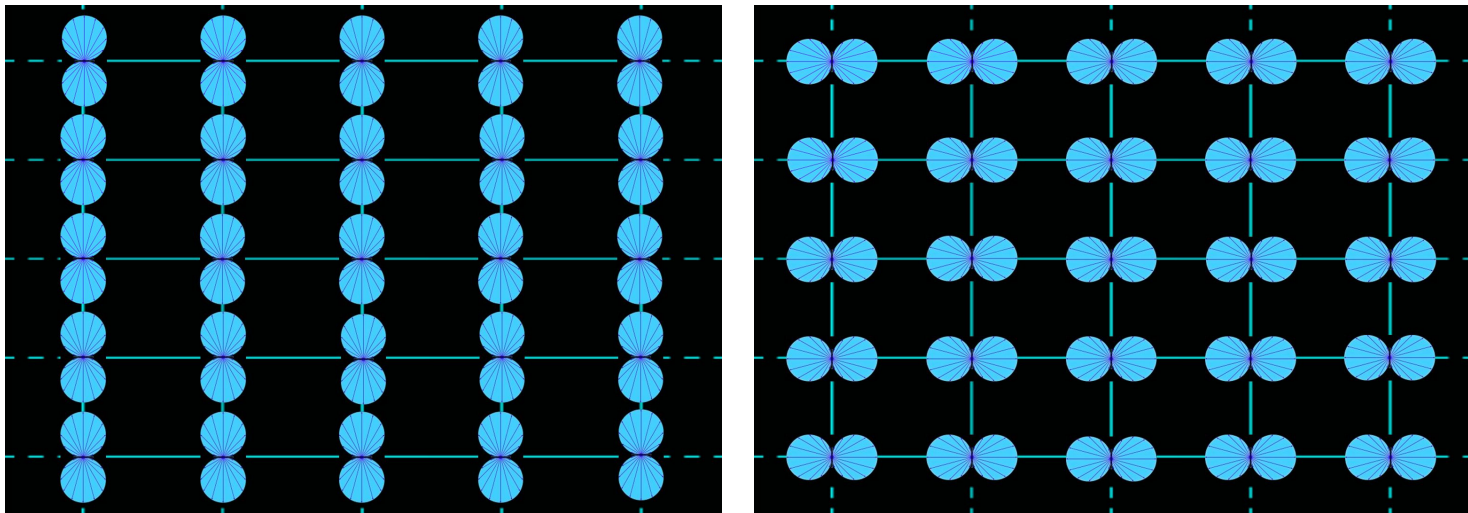
Materiales anisótropos

Como ya se ha utilizado, el dipolo hertziano representa un modelo sencillo de una fuente de ondas electromagnéticas. Si un modelo ha demostrado su validez en un área, no hay nada que impida utilizar el mismo modelo para consideraciones más amplias. En los materiales isótropos, la luz se propaga con la misma velocidad en todas las direcciones espaciales, es decir, el frente de la onda tiene la forma de una esfera. Ejemplos de medios isótropos son los líquidos (agua), los vidrios y también los llamados cristales cúbicos. En estos últimos, los átomos de un cristal están separados por las mismas distancias en las tres direcciones espaciales. Si los átomos están más cerca en una dirección espacial que en la otra, los materiales son anisótropos porque las fuerzas de enlace entre los átomos son espacialmente diferentes. Para mayor simplicidad, sólo se considera un plano XY con separaciones de redes $d1$ y $d2$.



Birrefringencia (1)

Como la luz atraviesa un cristal anisótropo, cada átomo se convierte en un dipolo hertziano y emite ondas elementales. La superposición de todas las ondas elementales crea el frente de onda que se propaga más allá en el cristal. Debido a la posición de los átomos, existen 2 direcciones de propagación con propiedades específicas. Si la dirección de propagación es la dirección Y (coordenada), los dipolos oscilan en la dirección X , como en la imagen de la izquierda. Si la dirección de propagación es la dirección X , los dipolos oscilan en la dirección Y , como en la imagen de la derecha.



Birrefringencia (2)

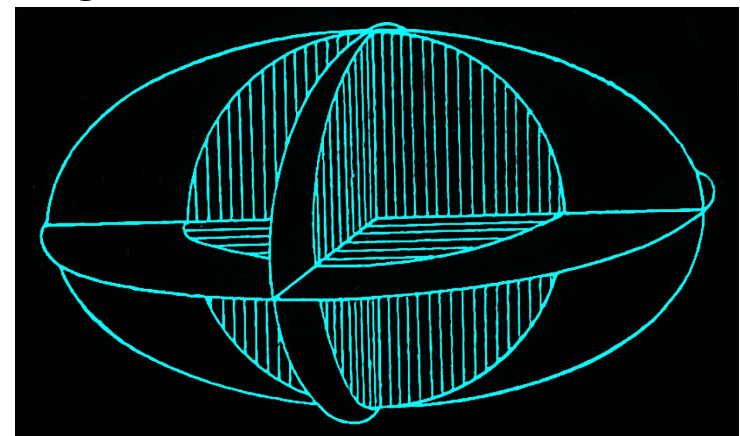
En la imagen de la izquierda, los átomos vecinos están más cerca (d_2), en la imagen de la derecha, están más lejos unos de otros (d_1). Es decir, en la imagen izquierda la irradiación que reciben los átomos es mayor que en la imagen derecha. La consecuencia es una diferencia de tiempo en la propagación de la luz en dirección X que en dirección Y . Los cristales con esta propiedad, que presentan 2 velocidades de propagación diferentes dependiendo de la dirección, es decir, que tienen 2 índices de refracción diferentes, se denominan birrefringentes. Además, los rayos de luz que se propagan en estas direcciones deben estar polarizados perpendicularmente entre sí, ya que los dipolos están orientados perpendicularmente entre sí. En términos más generales, cuando un haz de luz polarizado linealmente penetra en cristales (materiales) anisótropos, se descompone en 2 haces de luz polarizados perpendicularmente que atraviesan el cristal a velocidades diferentes.

Ondas elementales según Huygens (1)

Si, por ejemplo, un haz de luz incide sobre un cristal de calcita, aparecen dos haces de luz. Mientras que un haz sigue la ley de refracción, llamado rayo ordinario, esto no se aplica al segundo haz, que se denomina, por tanto, rayo extraordinario. Este fenómeno puede explicarse como consecuencia de que, en la calcita, la velocidad de la luz depende de la dirección de propagación y de la dirección de polarización del haz.

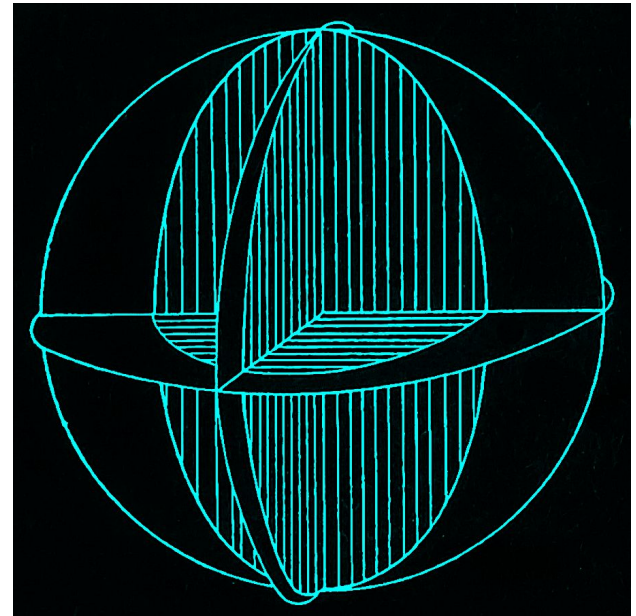


Mientras que el envolvente del rayo ordinario sigue siendo una onda esférica (como en un material isótropo), el envolvente del rayo extraordinario es un elipsoide rotacional. Las superficies de las ondas asociadas están formadas por 2 envolturas, una esfera y un elipsoide rotacional que envuelve la esfera.



Ondas elementales según Huygens (2)

Las superficies de la esfera y del elipsoide rotacional se tocan en 2 puntos opuestos, es decir, el rayo ordinario (índice de refracción n_o) y el extraordinario (índice de refracción n_{eo}) tienen el mismo índice de refracción. Si un haz de luz atraviesa un cristal en esta dirección especial, sólo hay 1 índice de refracción y no hay separación en 2 haces. La dirección con esta propiedad se denomina eje óptico y los cristales de este tipo se llaman cristales uniaxiales. En los cristales uniaxiales, pueden existir 2 casos. Si, como en el caso de la calcita, el rayo extraordinario es más rápido, es decir, $n_{eo} < n_o$, el elipsoide rotacional envuelve la esfera que es un cristal uniaxial negativo. En contraste, en el caso de los cristales uniaxiales positivos, el rayo ordinario es el más rápido, es decir $n_o < n_{eo}$, la esfera envuelve el elipsoide rotacional.



Índice de refracción de cristales uniaxiales

Ejemplos de algunos cristales uniaxiales con sus índices de refracción.

Cristales uniaxiales	Tipo	n_o ($\lambda = 590 \text{ nm}$)	n_{eo} ($\lambda = 590 \text{ nm}$)	$\Delta n = n_{eo} - n_o$
Calcita	negativo	1.658	1.486	-0.172
Turmalina	negativo	1.669	1.638	-0.031
Berilo	negativo	1.602	1.557	-0.045
Zafiro	negativo	1.768	1.760	-0.008
Cuarzo	positivo	1.544	1.553	+0.009
Circón	positivo	1.960	2.015	+0.055
Rutilo	positivo	2.616	2.903	+0.287
Cristal de hielo	positivo	1.309	1.313	+0.014

Propagación de los rayos ordinarios y extraordinarios (1)

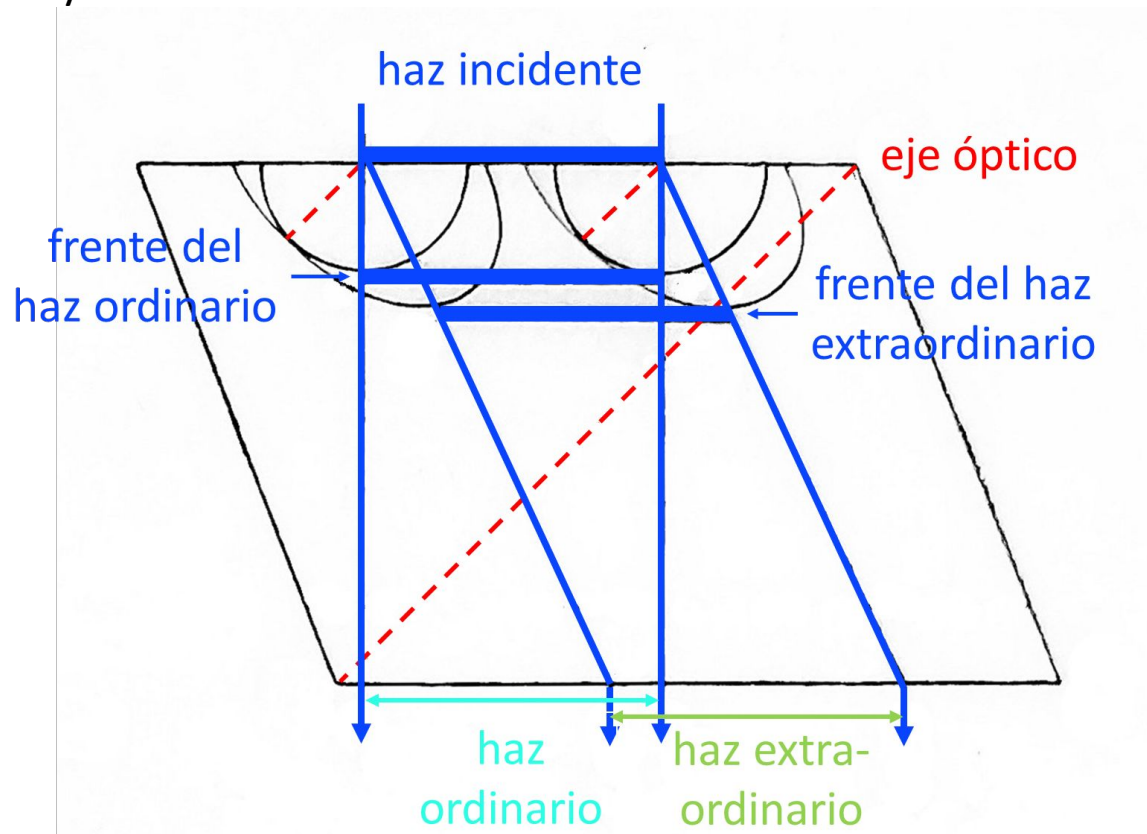
A continuación, se examina la refracción de la luz en cristales uniaxiales para 3 casos seleccionados. Para ello se utiliza la construcción de ondas elementales según Huygens. Esto da como resultado el frente de onda y la dirección de propagación para ambos índices de refracción.

En el primer caso, un haz de luz incide perpendicularmente sobre la superficie romboédrica de un cristal de calcita. El eje óptico está inclinado con respecto al haz de luz incidente. De cada punto del haz de luz incidente salen ondas elementales en el cristal. La superficie de rayos de dos capas, formada por una superficie esférica y un elipsoide rotacional, tiene que estar orientada según el eje óptico del cristal. Los haces elementales ordinarios se propagan esféricamente y la envolvente es el nuevo frente de onda que atraviesa el cristal sin refracción. La dirección de propagación es perpendicular al frente de onda.

Los haces elementales extraordinarios se propagan por la superficie de todos los elipsoides rotacionales. Sus superposiciones conducen de nuevo a una onda plana. Sin embargo, el frente de esta onda plana ya no se propaga sólo en la dirección de su normal, sino que también se propaga oblicuamente a ella.

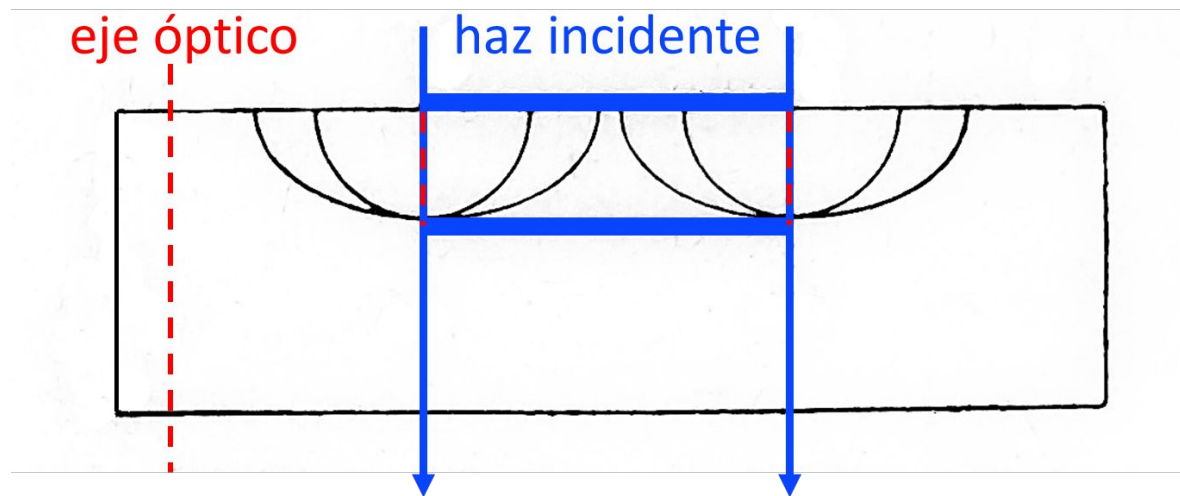
Propagación de los rayos ordinarios y extraordinarios (2)

La dirección y la velocidad de las normales de la onda y la dirección del haz extraordinario ya no coinciden.



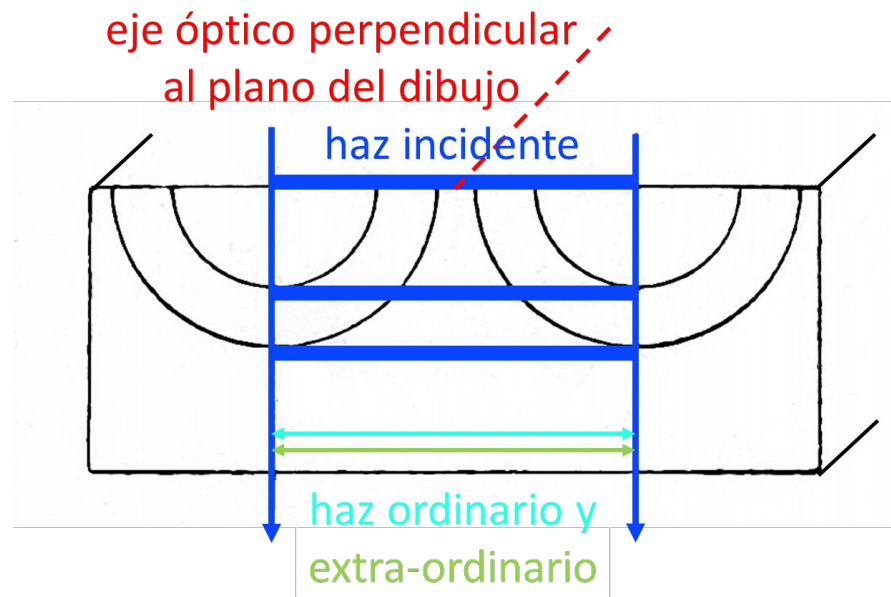
Propagación de los rayos ordinarios y extraordinarios (3)

En el segundo caso, el cristal birrefringente se corta (pulido) y se orienta de modo que un haz de luz se propague a lo largo del eje óptico. En esta dirección, el frente de onda esférico del rayo ordinario y el frente de onda del elipsoide rotacional del rayo extraordinario tienen la misma envolvente. No hay diferencia entre el frente de onda ordinario y el extraordinario, es decir, no hay birrefringencia. El cristal se comporta como un material isotrópico.



Propagación de los rayos ordinarios y extraordinarios (4)

Para la tercera situación, el cristal se corta de tal manera que el eje óptico se encuentra en la superficie (aquí: el eje óptico está perpendicular al plano del dibujo) y un haz de luz incide perpendicularmente sobre la superficie. Los frentes de onda son superficies esféricas tanto para los haces ordinarios como para los extraordinarios, pero con radios diferentes correspondientes a las velocidades de propagación, es decir, a los índices de refracción.



Retardación

Los frentes de onda del haz ordinario y del haz extraordinario se propagan sin desviación en la misma dirección y emergen del cristal – superficies plano-paralelas – en la misma dirección. En el caso de la calcita, el rayo extraordinario es más rápido que el rayo ordinario y, por tanto, obtiene una mayor diferencia de trayectoria cuanto más gruesa es la placa del cristal. La diferencia de longitudes del camino óptico, también conocida como retardación, se obtiene a partir del espesor del material y de la diferencia de los índices de refracción de los haces ordinario y extraordinario (n_o, n_{eo}).

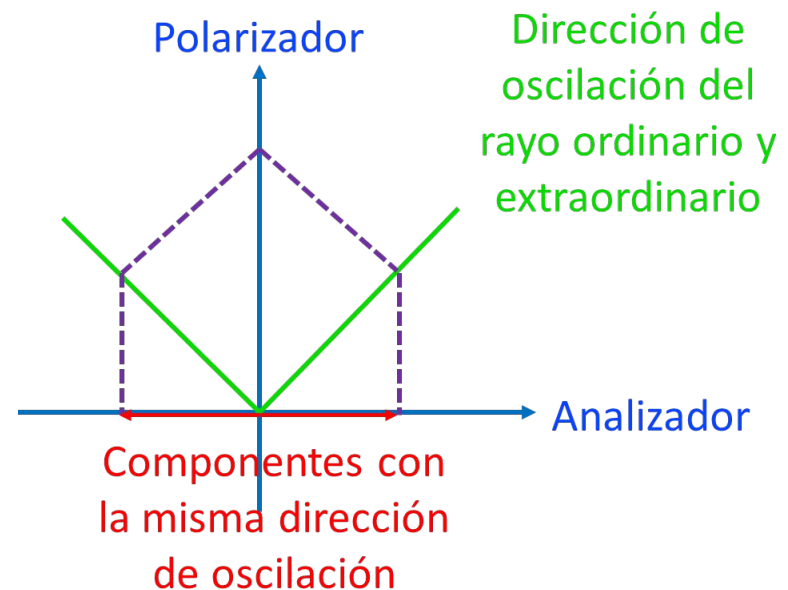
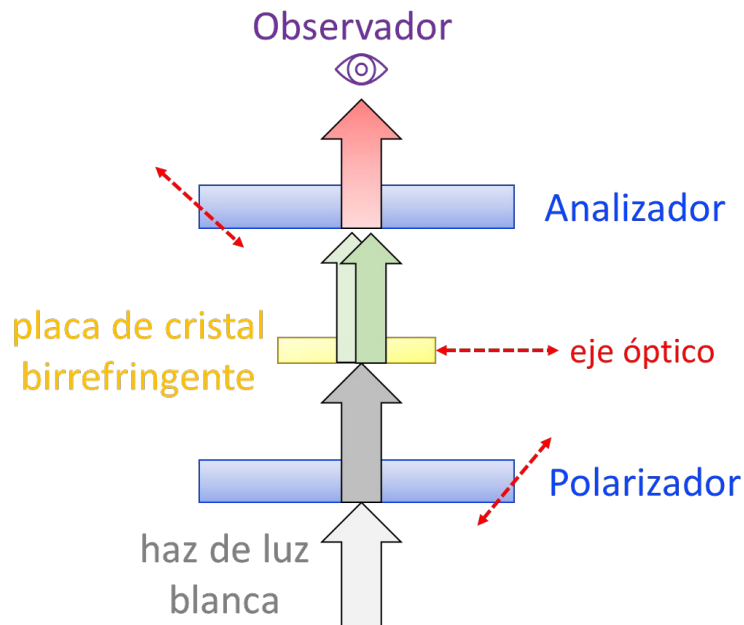
$$\text{Retardación} = d \cdot (n_{\text{grande}} - n_{\text{pequeño}})$$

d : Espesor de una placa de un cristal birrefringente

La retardación se mide en longitudes de onda de la luz incidente. Dependiendo de la diferencia del camino óptico, se habla de $\lambda/8$, $\lambda/4$, $\lambda/2$ láminas de cristales cuando, después de salir, una onda se retrasa con respecto a la otra un octavo, un cuarto o la mitad de una longitud de onda.

Observación ortoscópica

Los haces ordinario y extraordinario están polarizados perpendicularmente entre sí. Ambas direcciones de oscilación pueden interferir si se orientan en la misma dirección. Para ello, una placa de un cristal birrefringente, cortada paralelamente al eje óptico, es decir, irradiada perpendicularmente al eje óptico, por un haz de luz aproximadamente paralela y colocada entre 2 filtros de polarización.



Condiciones de oscuridad (1)

Esta configuración de los elementos ópticos se denomina haz ortoscópico. Además, se denomina la posición diagonal cuando, en el caso de los polarizadores cruzados (90°), las direcciones de oscilación de los haces ordinario y extraordinario de la placa de cristal se orientan en la dirección de la bisectriz del ángulo. Cuando la placa de cristal se gira 360° , las direcciones de oscilación coinciden cuatro veces con los polarizadores. En estos ángulos, por tanto, no se produce descomposición de componentes, de modo que con polarizadores cruzados no pasa luz por $4 \times 90^\circ$ y hay oscuridad. En la posición diagonal, la descomposición tiene lugar en 2 componentes opuestos por lo que los haces parciales se amplifican por interferencia para los que la diferencia de camino es:

$$\frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2}, 7\frac{\lambda}{2}, 9\frac{\lambda}{2} \dots (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad ; \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

y se cancelan para la diferencia de camino cero o múltiplos enteros de la longitud de onda λ .

$$0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda, 5\lambda \dots m \cdot \lambda \quad ; \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Condiciones de oscuridad (2)

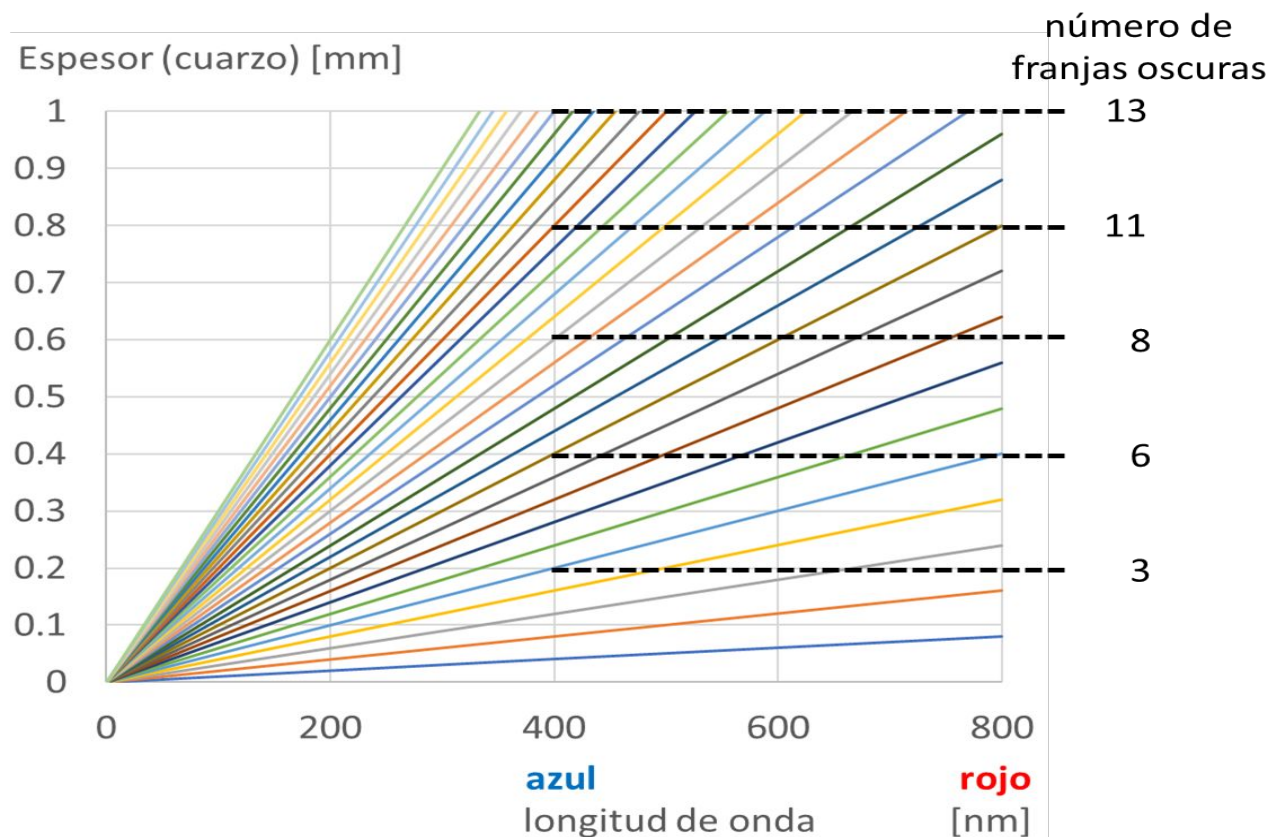
La diferencia de fase expresada en fracciones de la longitud de onda se deduce de la ecuación de la retardación.

$$\Delta = \frac{d}{\lambda} \cdot (n_{grande} - n_{pequeño})$$

A medida que aumenta el espesor de una delgada placa de un cristal birrefringente, la primera extinción de la luz blanca se alcanza en la parte azul-violeta del espectro. Así, el color de la luz transmitida está compuesta de la zona espectral rojo-verde y se obtiene el color mezclado amarillo. A mayor espesor, la condición de extinción se desplaza hacia el extremo rojo del espectro. Con espesores aún mayores, la condición de extinción se produce varias veces, es decir, aparecen franjas oscuras en el espectro que producen impresiones cromáticas repetidas, pero con saturación de color decreciente. Debido a una cierta similitud de color con el espectro puro, las áreas consecutivas de color azulado-rojizo se denominan órdenes. Las longitudes de onda que faltan debido a la interferencia destructiva se pueden representar geométricamente. Un cristal de cuarzo sirve como ejemplo numérico con $(n_{eo} - n_o) \approx 1/100$.

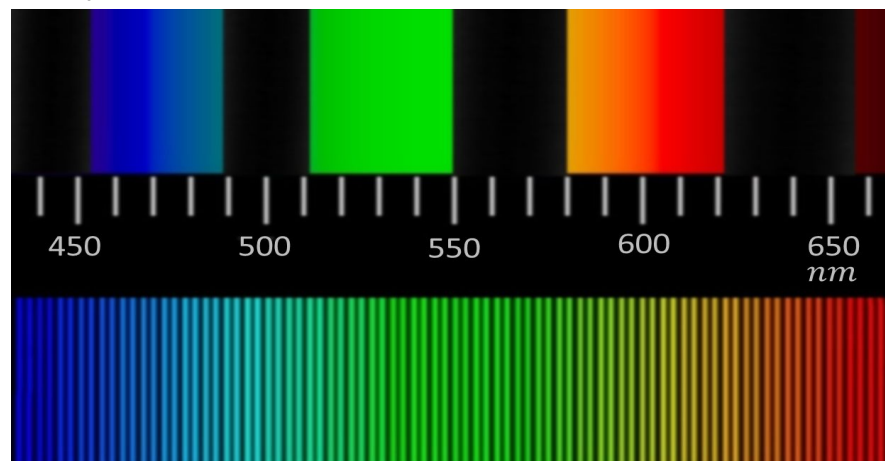
Condiciones de oscuridad (3)

$$\text{Extinción: } m = \frac{d}{\lambda} \cdot (n_{eo} - n_o) \quad \rightarrow \quad d = 100 \cdot m \cdot \lambda$$



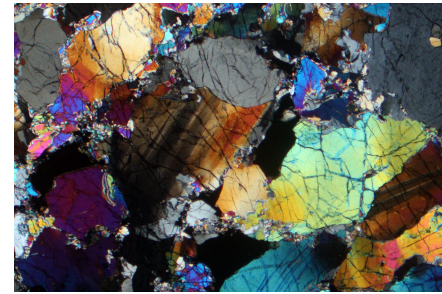
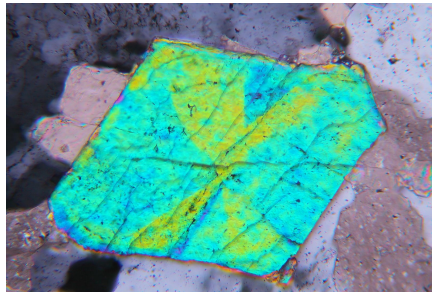
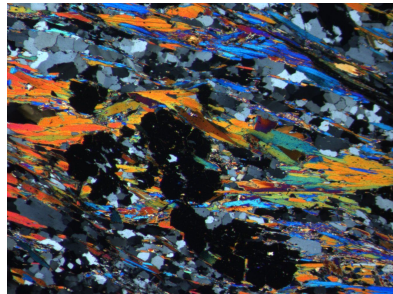
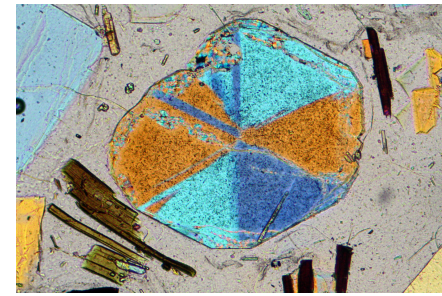
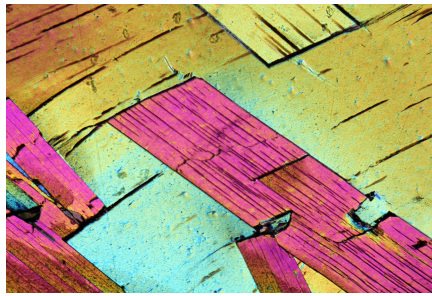
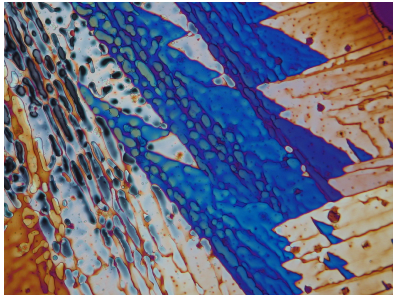
Condiciones de oscuridad (4)

Si la mezcla aditiva de color de las restantes longitudes de onda se descompone espectralmente tras atravesar una placa de cristal de cuarzo de aproximadamente 0.4 mm de espesor, las franjas oscuras se hacen visibles. Si la diferencia de las trayectorias se hace mucho mayor con una placa de cristal de calcita de aproximadamente 1 mm de espesor, son muchas más las franjas oscuras que pasan de la parte ultravioleta del espectro a la parte visible que las que desaparecen del espectro en la banda infrarroja. Con numerosas franjas oscuras, se crea la impresión cromática de luz blanca, similar al espectro supercontinuo de un láser de luz blanca (véase el curso de física moderna, lección 8).



Identificación de minerales

Varios minerales birrefringentes transparentes, normalmente en forma de una lámina delgada, pueden identificarse o analizarse basándose en su diferencia de índices de refracción con su color de interferencia de polarización. Las imágenes muestran algunos ejemplos como el olivino, la mica, la riolita, la biotita, la epidota y la calcita contemplados con un microscopio-polarizador. Los colores del segundo orden brillan más intensamente.



Escala de colores de Michel-Lévy

Para facilitar su identificación, Auguste Michel-Lévy estableció una escala de comparación de colores. Las abscisas son la retardación del camino (abajo) y la birrefringencia ($n_{\text{grande}} - n_{\text{pequeño}}$) (arriba).

