

# INDICATRICES Y ELIPSOIDES ÓPTICOS – REVISIÓN DE LA TERMINOLOGÍA.

Un rayo de luz representa el camino por el cual se propaga en línea recta un flujo de luz visible que procede de una fuente luminosa. La energía a lo largo de este rayo resulta en una onda cuya vibración es perpendicular a la dirección de propagación, si el medio es *isótropo* (Fig. 1A). En un medio *anisótropo*, en cambio, dirección de vibración y propagación no son perpendiculares (Fig. 1B).

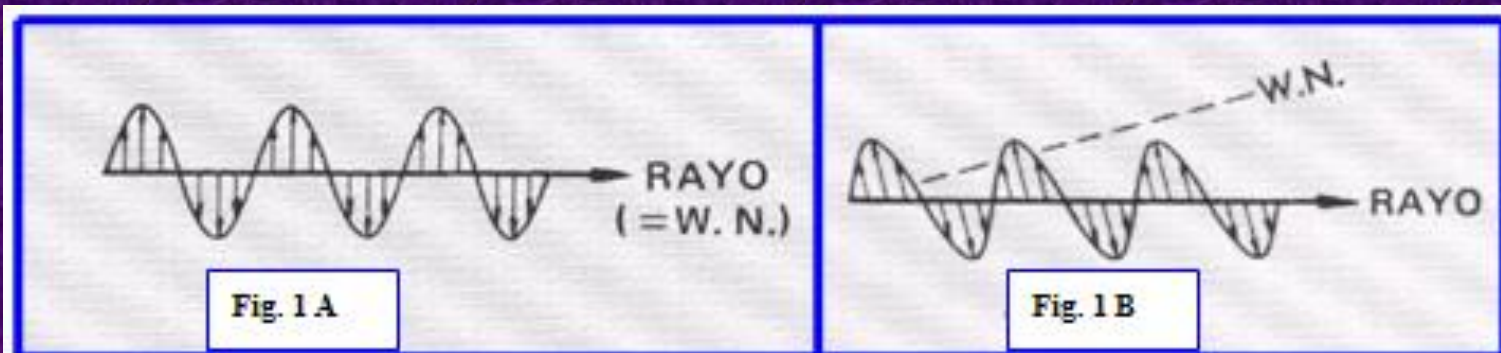
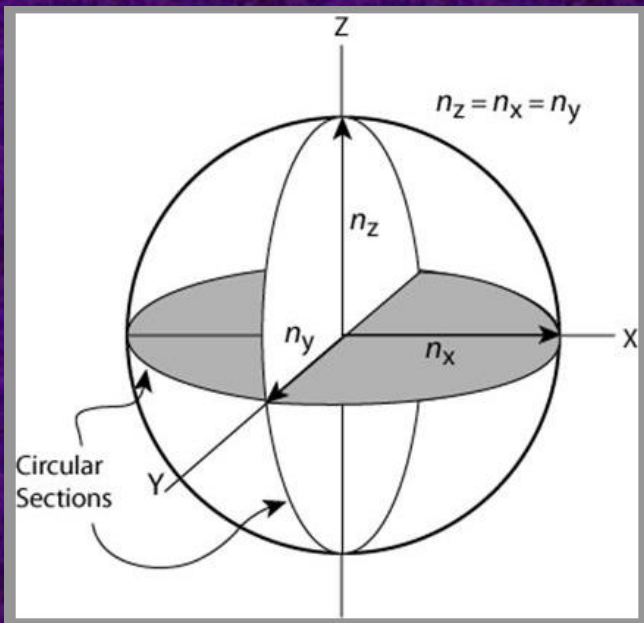


Fig. 1. Relaciones geométricas entre la trayectoria del rayo (flecha más oscura), normal de onda (línea de trazos) y direcciones de vibración (flechas pequeñas). (A) Para los medios isótropos; (B) para luz en medios anisótropos. Todas las líneas están en el plano del papel. La normal de onda (W.N.) es perpendicular a las direcciones de vibración. Bloss, 1985.

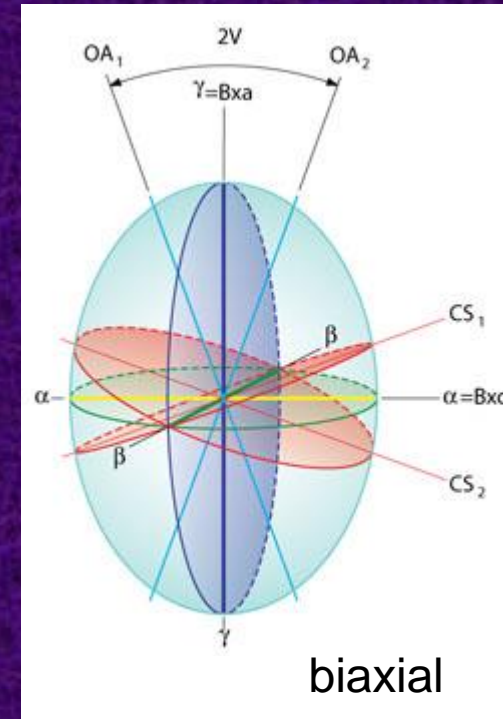
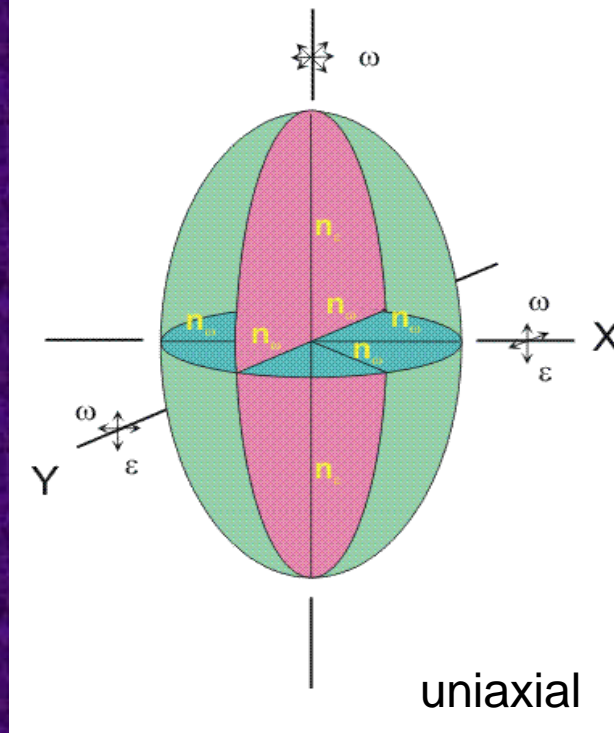
# CONCEPTO GENERAL DE INDICATRIZ

La indicatriz óptica sirve para explicar cómo varía el índice de refracción de un material transparente de acuerdo con la dirección de vibración de la onda luminosa en el material

isótropa



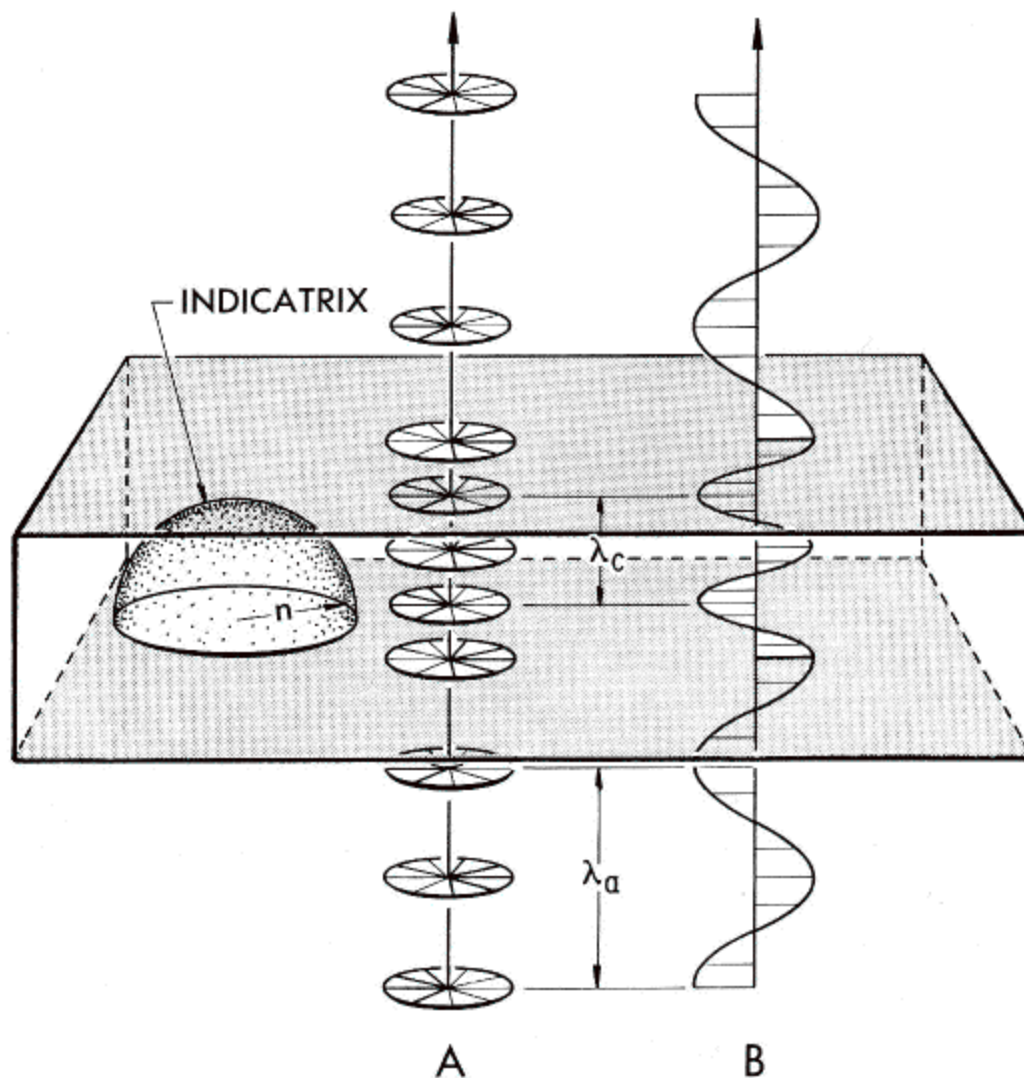
Z = optic axis = c-axis



## LA INDICATRIZ ISÓTROPA

- El índice de refracción no varía con la dirección de vibración de la luz.
- Todos los vectores que relacionan “ $\eta$ ” con la dirección de vibración son de igual longitud
- → la indicatriz isótropa es una esfera perfecta
- Los vidrios transparentes, los líquidos y los cristales cúbicos se caracterizan por tales indicatrices.

# Efecto del paso de la luz por una placa de mineral isótropo



**Fig. 6-5.** The effect of an isotropic plate upon (A) a normally incident unpolarized ray and (B) a polarized ray. The lower

Qué pasa con la dirección de vibración?

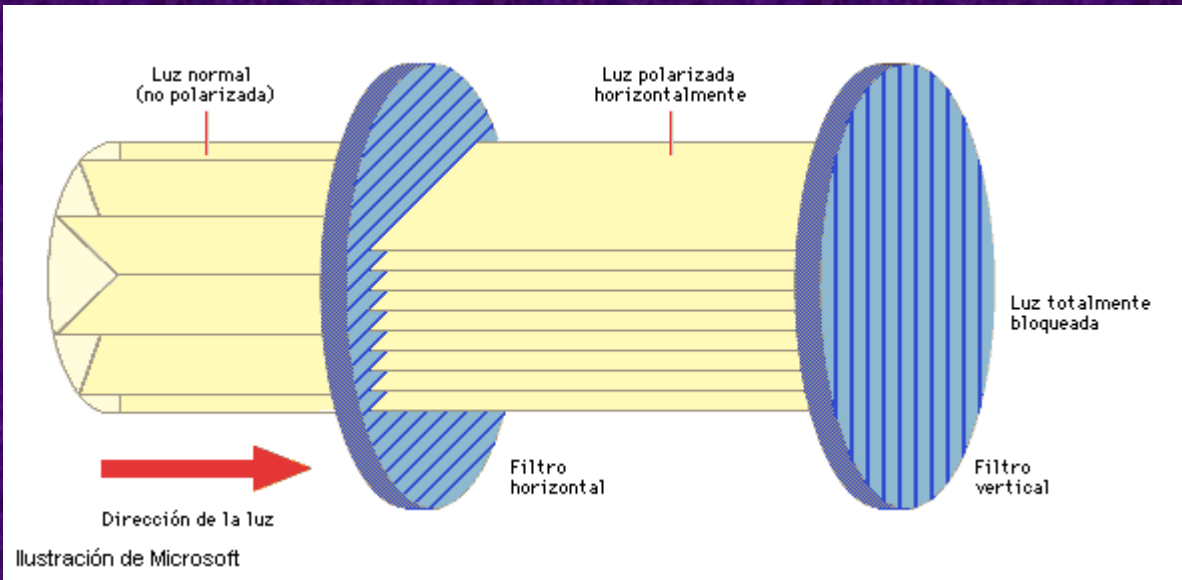
Y con la longitud de onda?

Por qué?

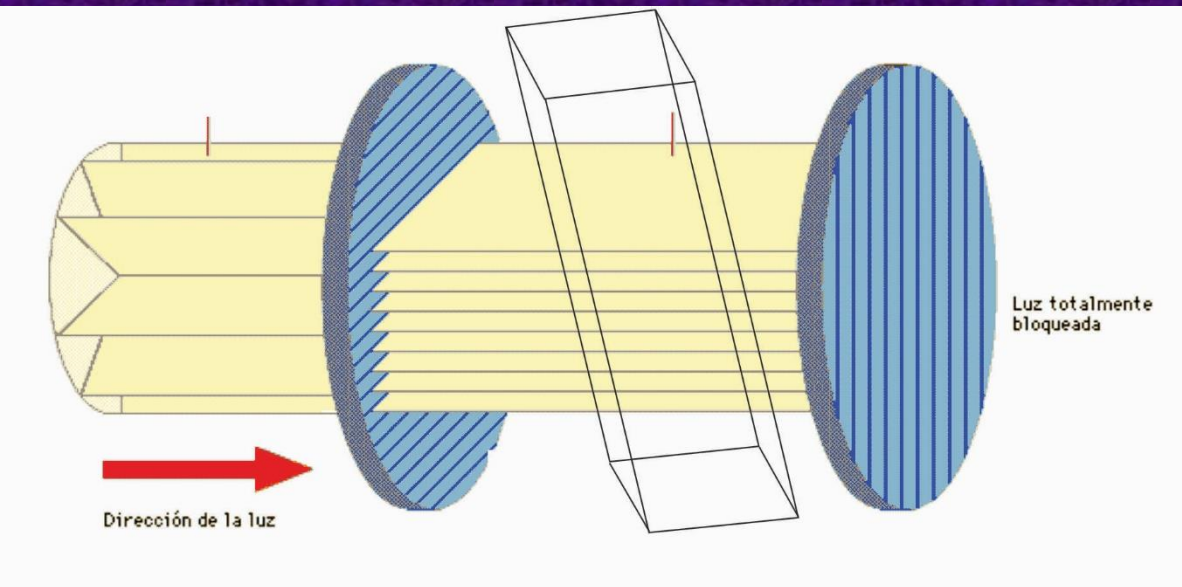
$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Pol

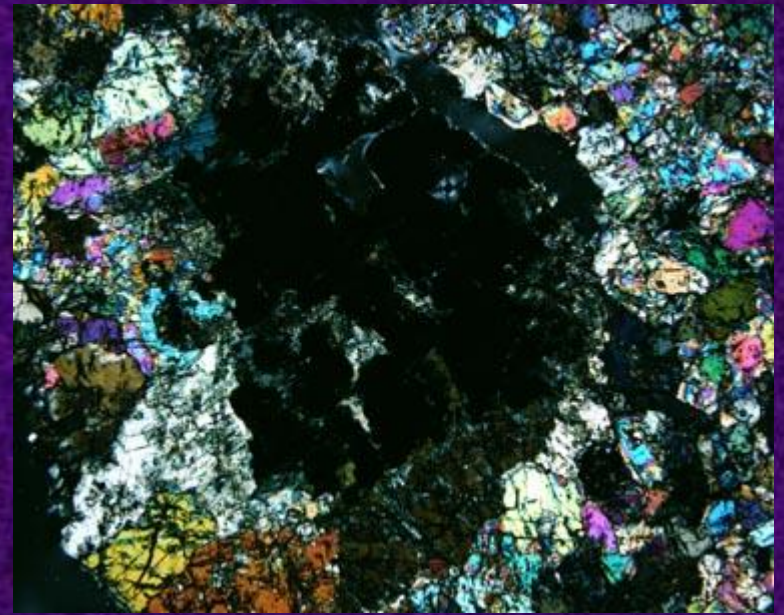
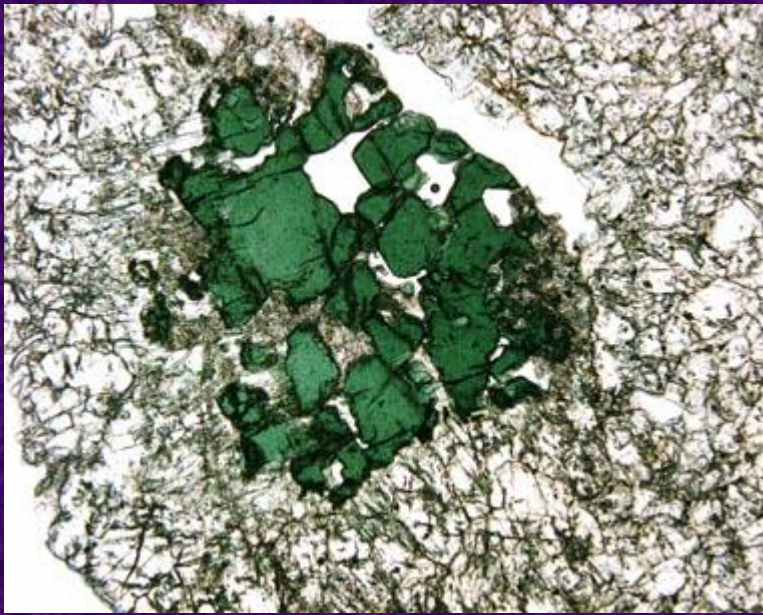
Ana



Aire

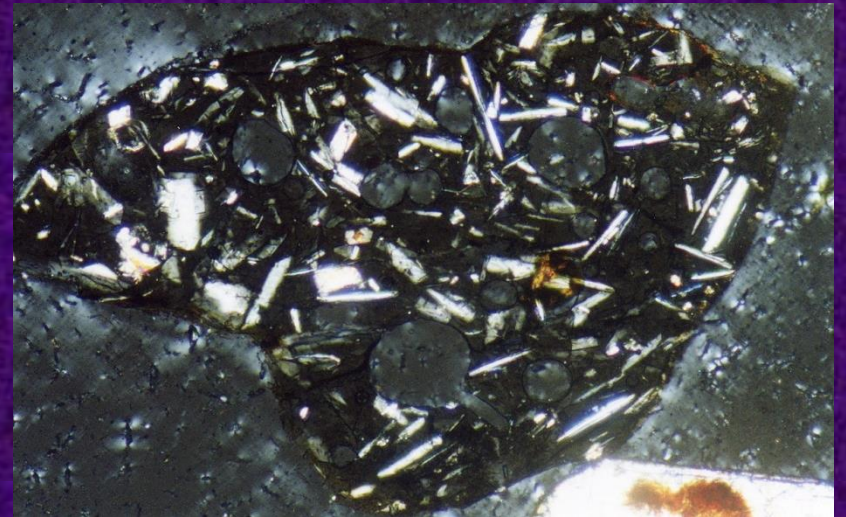
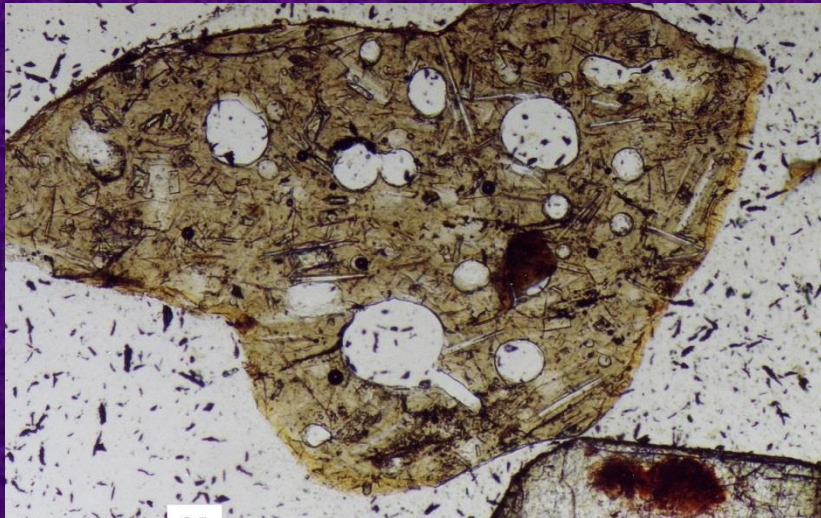


Placa de material isótropo



Espinelo

Vidrio volcánico



Recordando...

## LUZ PLANO POLARIZADA EN LOS MINERALES

**LUZ POLARIZADA:** Un haz de luz que se propaga vibra en todas las direcciones, el frente de onda es una esfera. Cuando hacemos que el haz vibre solo en un plano, se dice que obtenemos LUZ POLARIZADA.

*La polarización de la luz se puede obtener por diferentes métodos, entre otros:*

- Por reflexión repetida
- Por absorción de ciertos minerales o sustancias (polarizadores, compuestos orgánicos).
- Por doble refracción (birrefringencia) en la CALCITA.

## POLARIZACION POR ABSORCIÓN:

La turmalina tiene la propiedad de producir polarización por absorción. La luz que vibra en todas las direcciones al penetrar al cristal es fuertemente absorbida en todas las direcciones menos en un plano. Como consecuencia, del cristal emerge luz polarizada. El eje cristalográfico  $c$  es paralelo al plano de vibración. Si se cruzaran dos cristales de turmalina, en la superposición de ambos, se forma una zona oscura, debido al cruce de  $90^\circ$  de ambos plano de vibración.

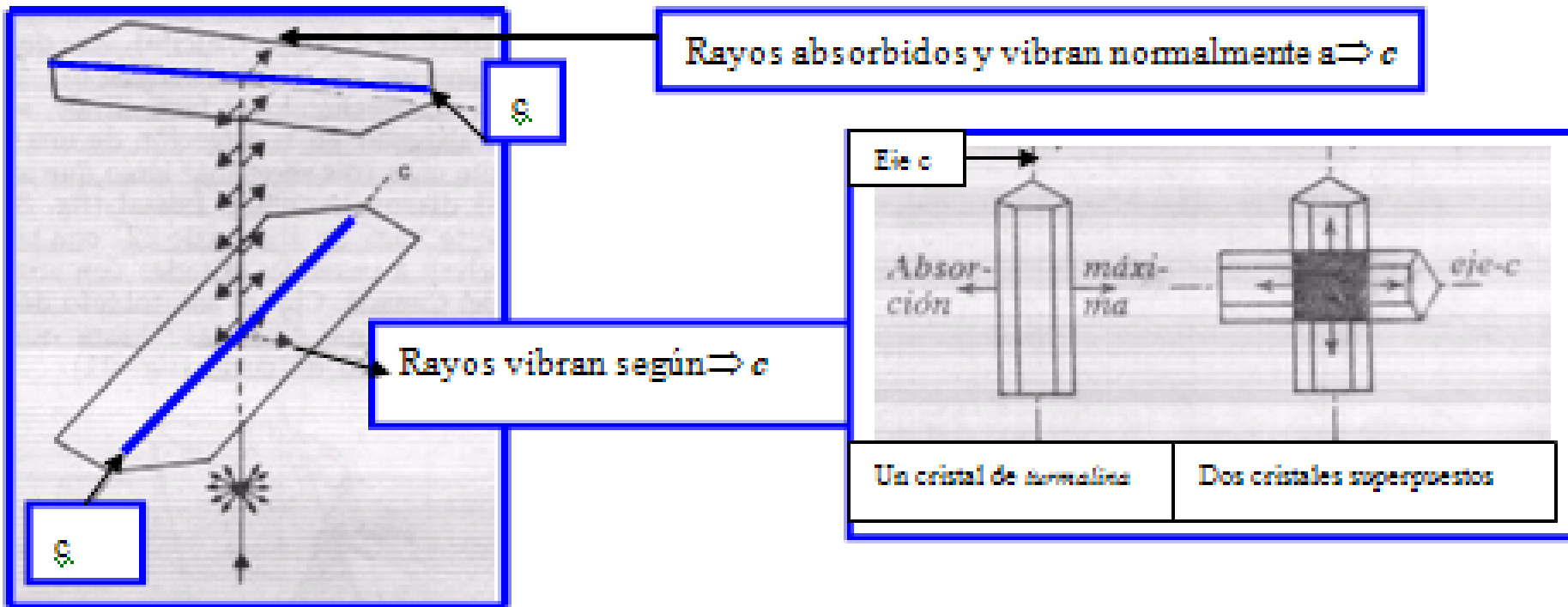


Fig.7. Absorción de las vibraciones normales al eje  $c$  en la turmalina. Kerr, 1965.



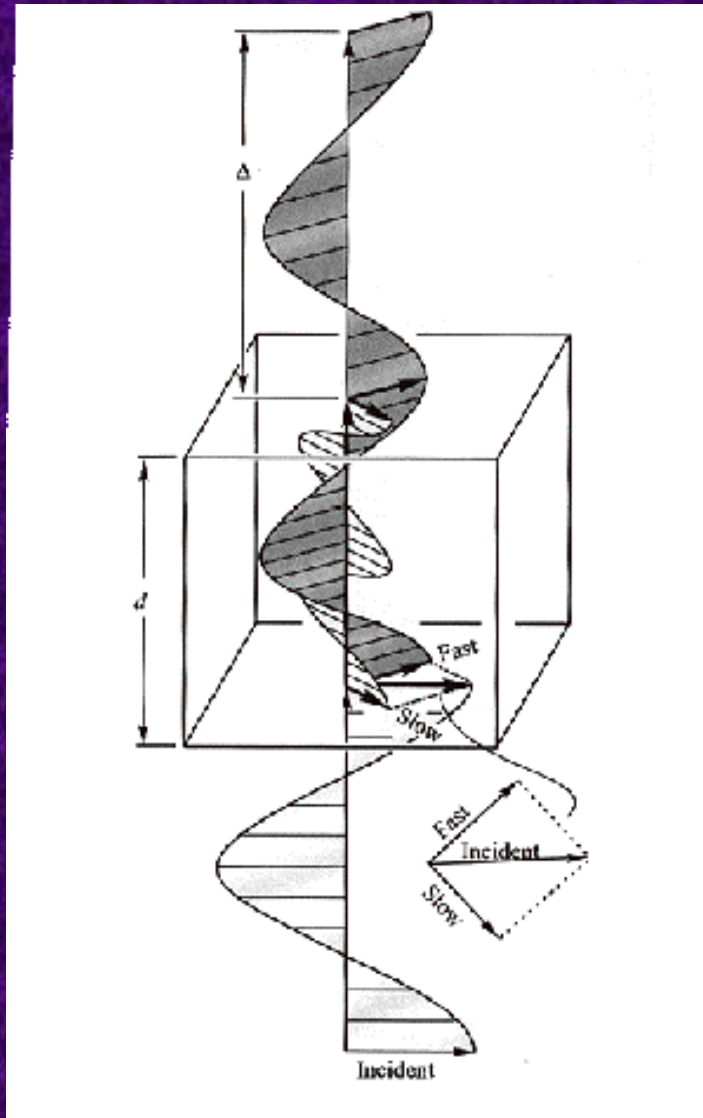
En 1852 William Bird Herapath descubrió una sustancia, sulfato de *yodoquinina* ( $C_{60}H_{84}I_{12}N_6O_{30}S_6$ ) la cual produce una fuerte absorción; por este motivo se la llamo

*“turmalina artificial”* o *herapatita* (en homenaje a su descubridor).

Más recientemente se ha conseguido orientar electromagnéticamente a estos cristales de herapatita, de manera tal que embebidos en plásticos forman como un solo cristal. Es posible preparar láminas polarizantes semejantes con una superficie de más de  $10 \text{ dm}^2$ .



# DOBLE REFRACCION o BIRREFRINGENCIA

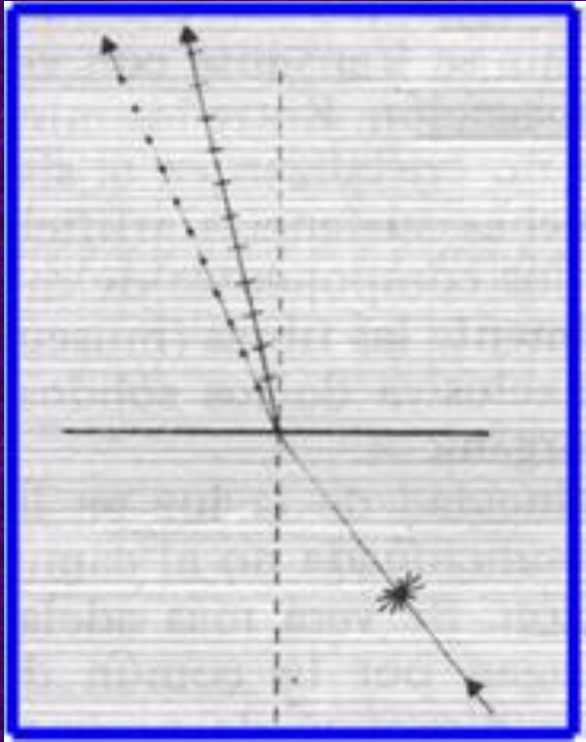


Cuando la luz polarizada monocromática incide sobre un mineral anisótropo se descompone en dos ondas que se desplazan a diferente velocidad, controladas por el ordenamiento cristalográfico del mineral.

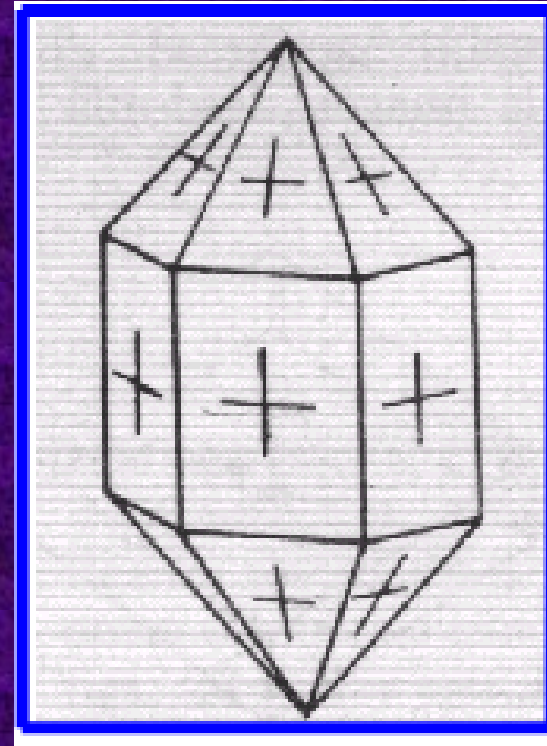
Así se generan:

- 1) Un rayo lento
- 2) Un rayo rápido
- 3) Los rayos se recomponen al salir del mineral, pero como atraviesan un volumen de mineral, lo hacen a diferente ángulo (rotación) merced al desfase entre las ondas de los rayos lento y rápido. Ese desfase se denomina **retardo**
- 4) Como ambos rayos tienen diferente velocidad, resultarán en diferentes índices de refracción

Todos los minerales transparentes anisótricos (de todos los sistemas, menos el cúbico), en mayor o menor grado, presentan el fenómeno de la doble refracción. Un rayo penetra el mineral dividiéndose en dos rayos polarizados que vibran en planos perpendiculares entre sí, y que avanzan con distinta velocidad de propagación.



**Fig. 8. Doble refracción en un medio anisotrópico. Los puntos y barras indican las direcciones de vibración. González Bonorino, 1976.**



**Fig.9. Traza de los planos de vibración en un cristal dimétrico (sistema hexagonal)**

# DEMOSTRACIÓN DE LA BIRREFRINGENCIA EN LA CALCITA

El ejemplo más notable de este fenómeno se observa en la calcita ( $\text{CaCO}_3$ )

Los índices extremos de la calcita son:  $\varepsilon = 1,486$  y  $\omega = 1,658$  - con una diferencia de **0,172**.

SNELL (relación de índice con velocidad):

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

$$n = \frac{1}{v}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

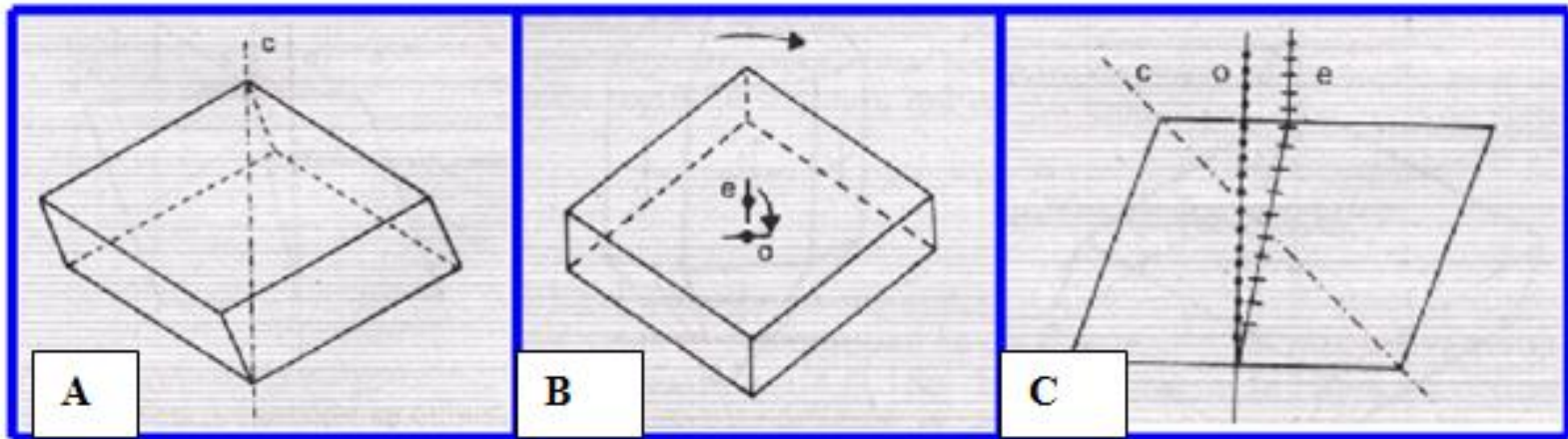
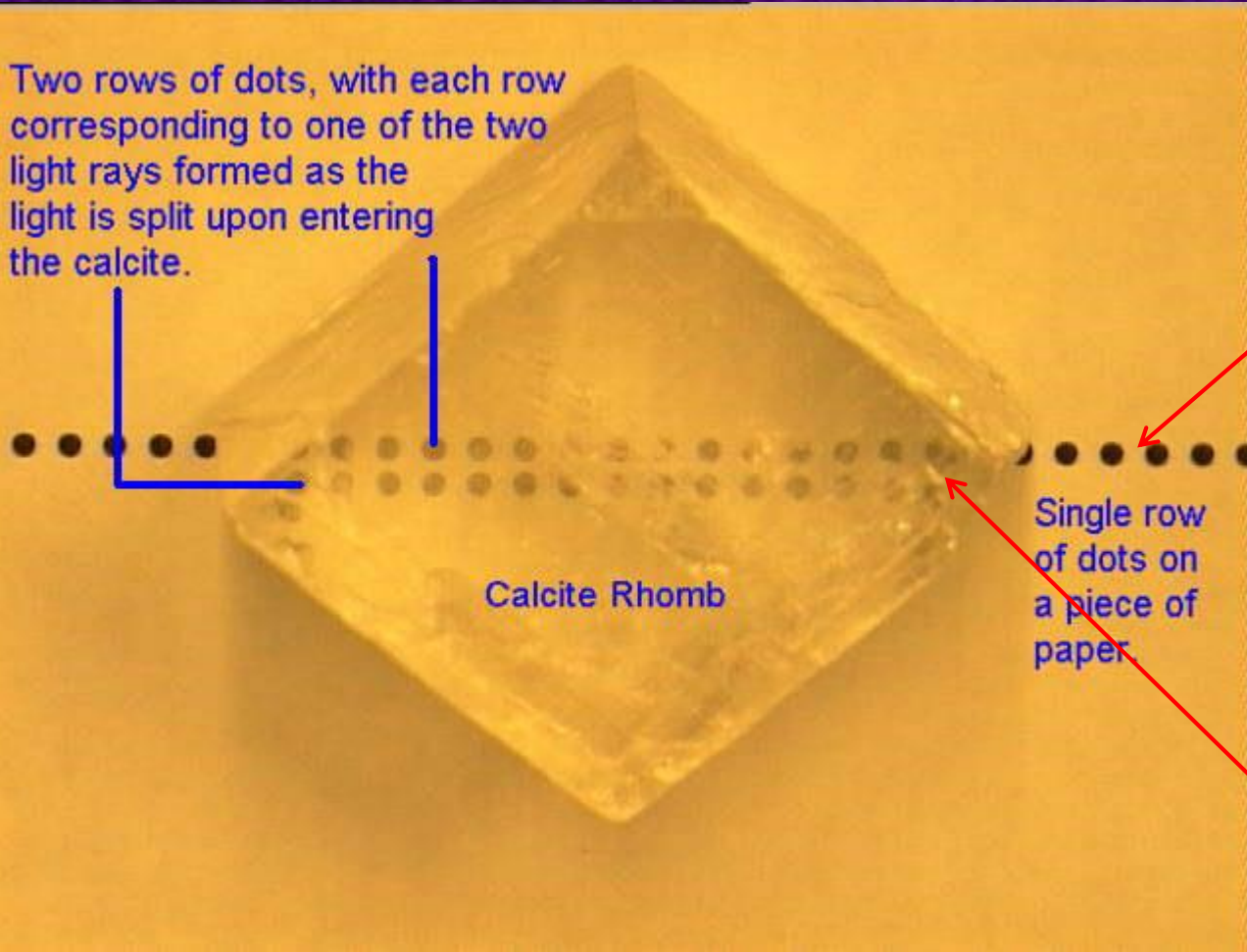


Fig. 10. (A) Romboedro de calcita. (B) Desdoblamiento de la imagen de un punto por doble refracción en un cristal de *calcita*. (C) Camino de los rayos dentro de la calcita.

Two rows of dots, with each row corresponding to one of the two light rays formed as the light is split upon entering the calcite.



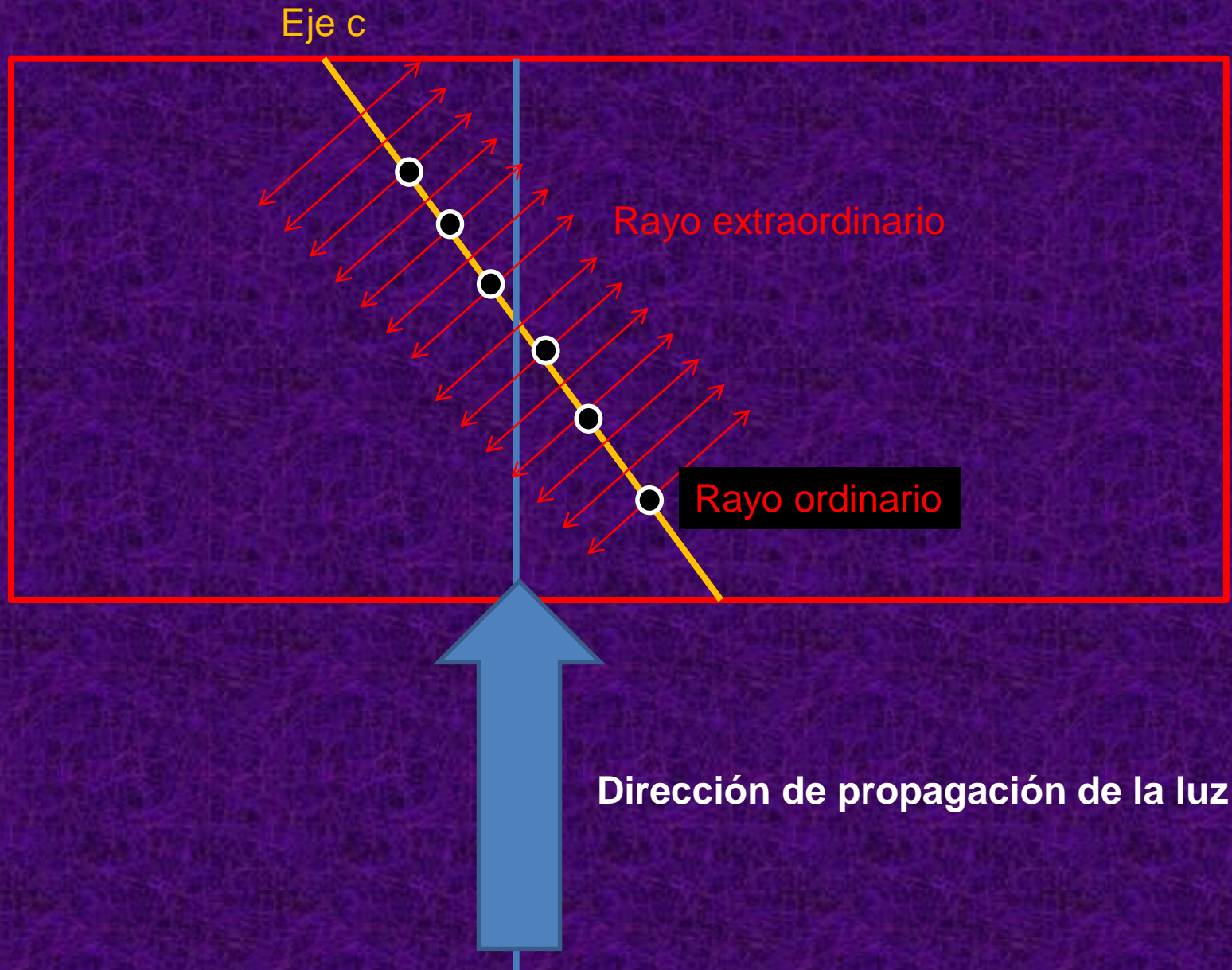
Calcite Rhomb

Single row of dots on a piece of paper

Rayo Ordinario: no desplaza la imagen

Rayo Extraordinario Imagen desplazada

# Sección de cristal de calcita



Los dos rayos *luminosos* han sido *refractados diferentemente* y los índices de refracción serán distintos.

En la calcita el rayo extraordinario  $\varepsilon$  vibra en el plano que contiene a su recta de propagación y al eje  $c$  cristalográfico (eje óptico).

El rayo ordinario  $\omega$  vibra perpendicularmente al plano definido por la recta de propagación y el eje óptico.

La birrefringencia se expresa como **la diferencia numérica entre los índices de refracción extremos del mineral.**

**BIRREFRINGENCIA** =  $n\varepsilon - n\omega \Rightarrow$  *en minerales uniáxicos (hexagonal-tetragonal)*

**BIRREFRINGENCIA** =  $n\gamma - n\alpha \Rightarrow$  *en minerales biáxicos (rómbrico-monoclínico y triclínico)*



## Luz monocromática

Retardo entre rayos lento y rápido en (a)

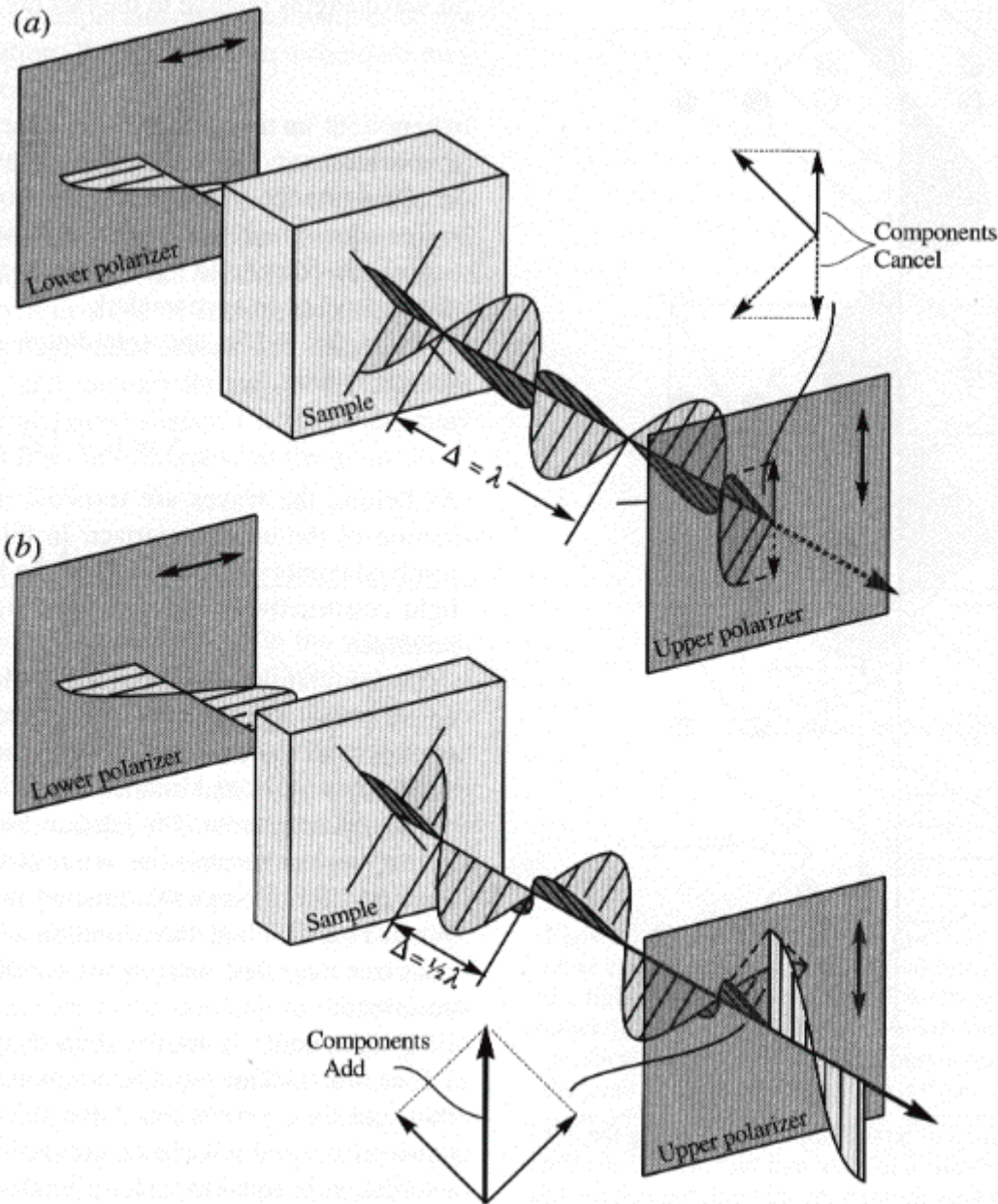
$$1 \lambda$$

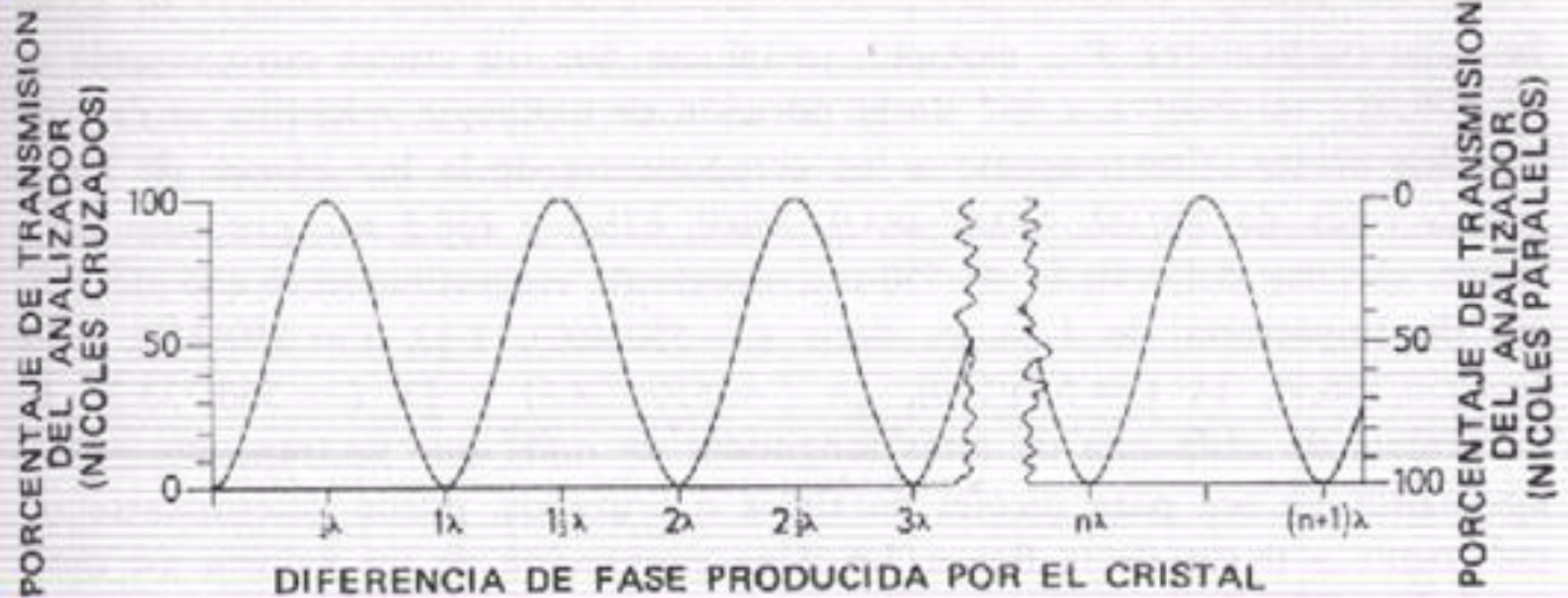
Componentes en plano de analizador se cancelan

Retardo entre rayos lento y rápido en (b)

$$1/2 \lambda$$

Componentes en plano de analizador se suman





**Fig. 27.** Transmisión de la luz producida por el analizador de acuerdo con la diferencia de fase producida en esta luz por un paso anterior a través del cristal (a  $45^\circ$  de la posición de extinción). Úsese la escala de la izquierda si los nicoles están cruzados, y la de la derecha si están paralelos. El valor 100 significa que toda luz que incide en el cristal procedente del polarizador, pasa transmitida s través del analizador.

# LA INTERFERENCIA DE LA LUZ

## DIFERENCIA DE FASE

Por su diferencia de velocidad, los dos rayos que emergen del mineral tienen una diferencia de fase  $P$ .

$$P = \Delta / \lambda \quad (\Delta = \text{retardo})$$

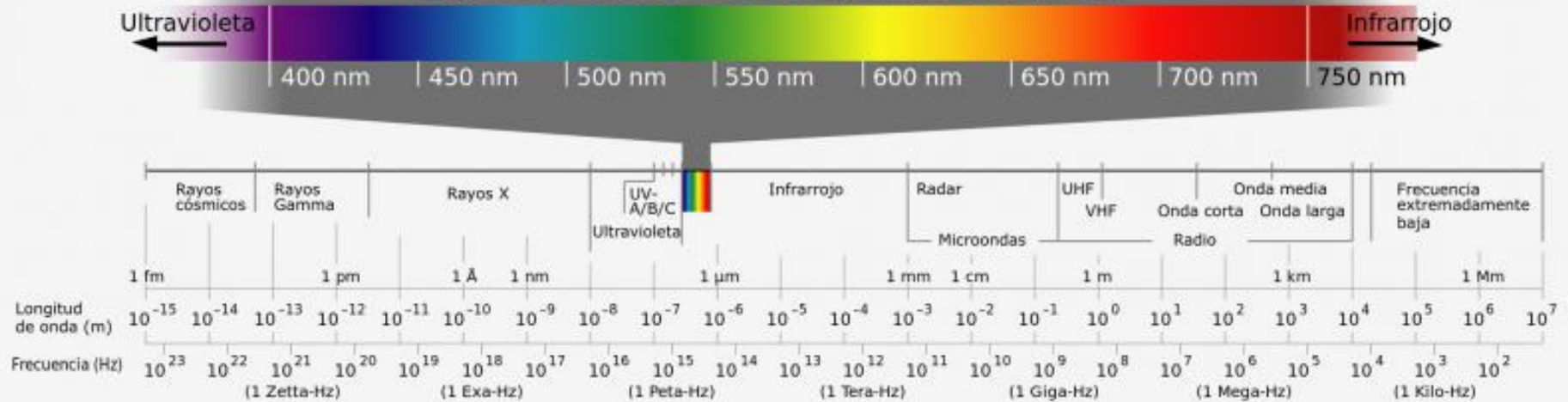
$\Delta = t(n_2 - n_1)$ , siendo  $t$  = largo recorrido (espesor del mineral) y  $n_2 - n_1$  la birrefringencia del mineral

$$P = t(n_2 - n_1) / \lambda$$

Cuando el retardo es un múltiplo entero de una longitud de onda ( $n\lambda$ ), las ondas emergen del analizador en fases totalmente opuestas la resultante es = 0. En consecuencia se tiene un campo oscuro.

Cuando la retardación es un número impar de  $\frac{1}{2}$  longitud de onda ( $(2n+1)/2 \times \lambda \Rightarrow \frac{1}{2}\lambda, 3/2\lambda, 5/2\lambda \dots$  etc) las componentes de las ondas en el plano del analizador se adicionan y como resultante se tiene una máxima intensidad de luz.

## Espectro visible por el ojo humano (Luz)



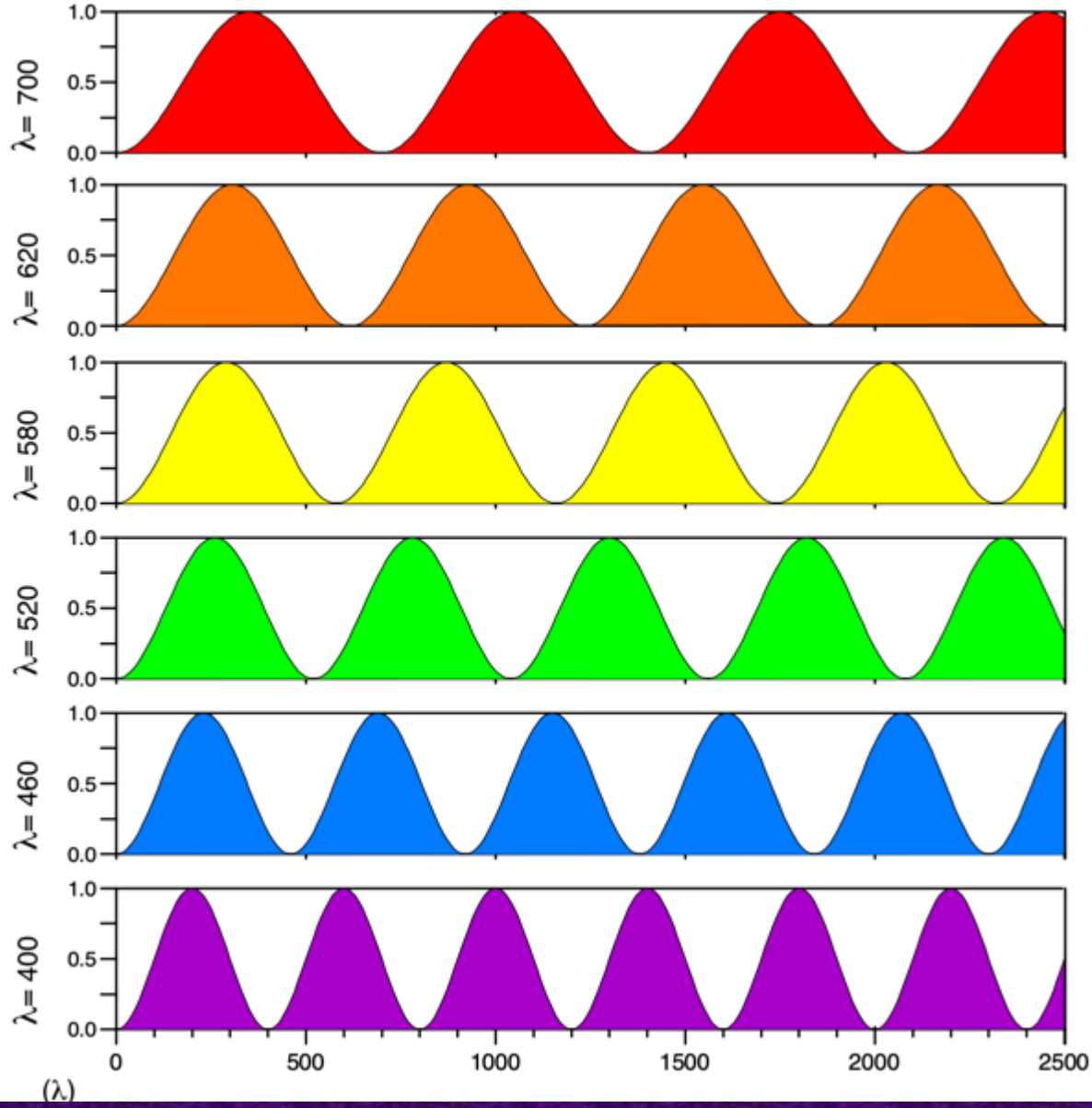
Pero si la luz es blanca...

Dado un espesor “t” continuo de una placa de mineral (sección delgada) y una birrefringencia ( $n_2 - n_1$ ) fijas

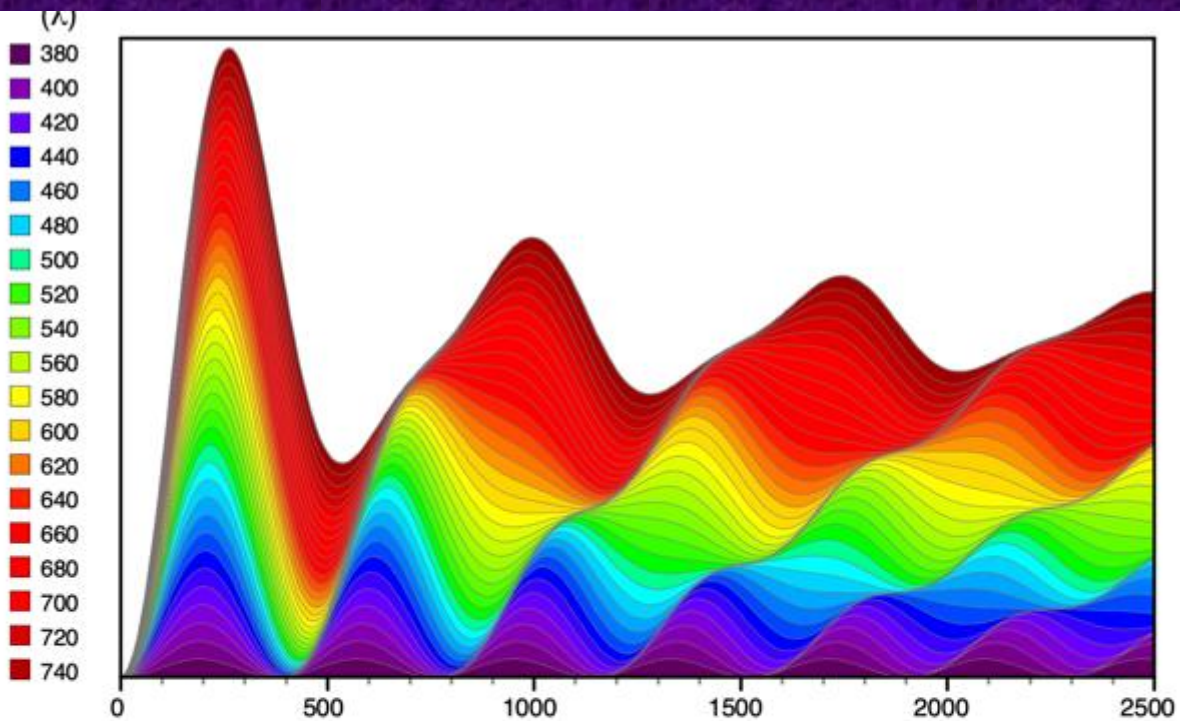
Algunas longitudes de onda se anularán en el retardo (desfase  $n\lambda$ ), mientras que otras estarán desfasadas positivamente (retardo  $n \cdot 1/2 \lambda$ ), resultando en colores determinados por la interferencia de las ondas

# Intensidad de la luz

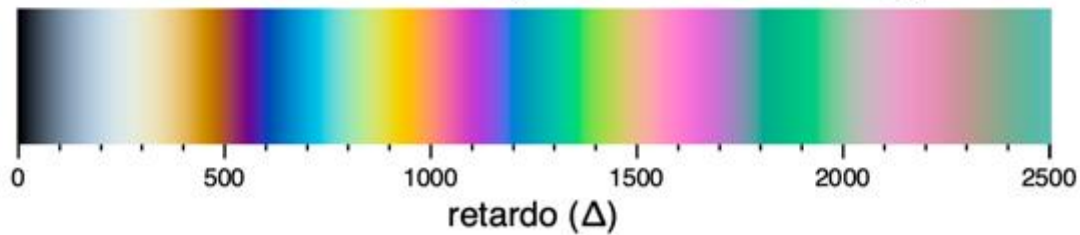
que atraviesa el analizador ( $\lambda$  en nm)



Intensidad de la luz que atraviesa  
el analizador



Colores resultantes (Tabla de Michel-Lévy)



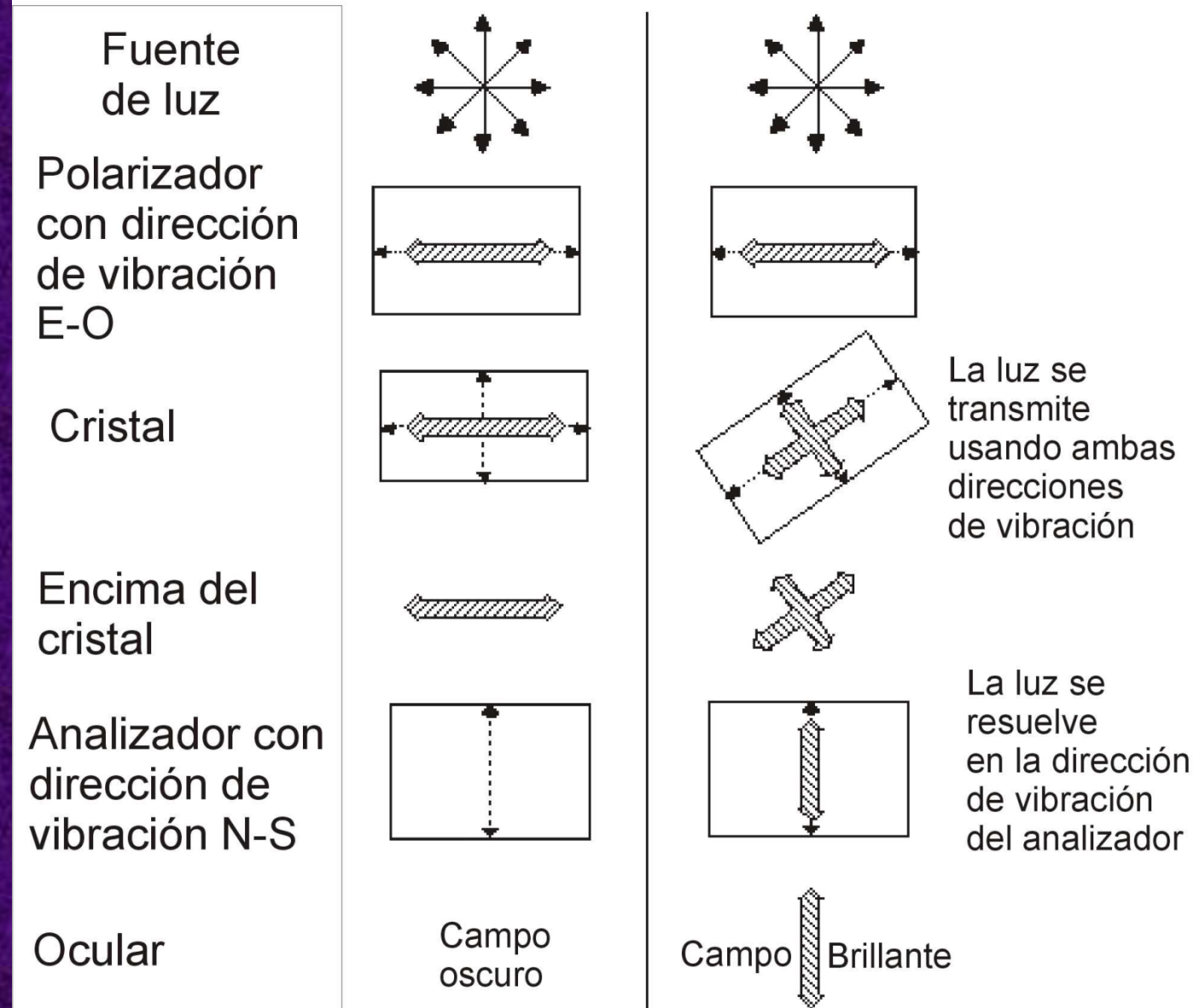
# Dirección de vibración

Si alguna dirección de vibración del mineral coincide con el plano del polarizador la onda pasa sin modificación (sin separarse en 2 rayos)

Si las direcciones de vibración forman un ángulo ( $\neq 0$ ) con el polarizador la luz se separa en 2 rayos que se componen e interfieren resolviéndose con componentes en el plano del analizador

Cristal en extinción

Cristal en máxima iluminación



## COLORES DE INTERFERENCIA

En la mayoría de las secciones (orientaciones del corte), al girar la platina con el analizador interpuesto se observa que el mineral pasa por 4 posiciones de extinción (campo oscuro) y 4 de máxima iluminación a  $45^\circ$  de cada posición de extinción. Por qué??

Al tratarse de **luz blanca polarizada** el color de interferencia variará con

- 1) el espesor “t” de la sección del mineral,
- 2) la naturaleza birrefringente del mineral (birrefringencia absoluta),
- 3) la dirección de corte u orientación del grano (birrefringencia relativa = sección de la indicatriz).

Los cristales aparecerán coloreados (colores de interferencia), como resultado de la desigual transmisión de los distintos componentes de la luz blanca. Las longitudes de onda particulares que transmite (o absorbe) el analizador dependen del retardo producido en la luz en su anterior paso a través del cristal.



# INFLUENCIA DEL ESPESOR

Para explicar este caso usaremos un trozo de cuarzo cortado en paralelo al eje c y en forma de cuña.

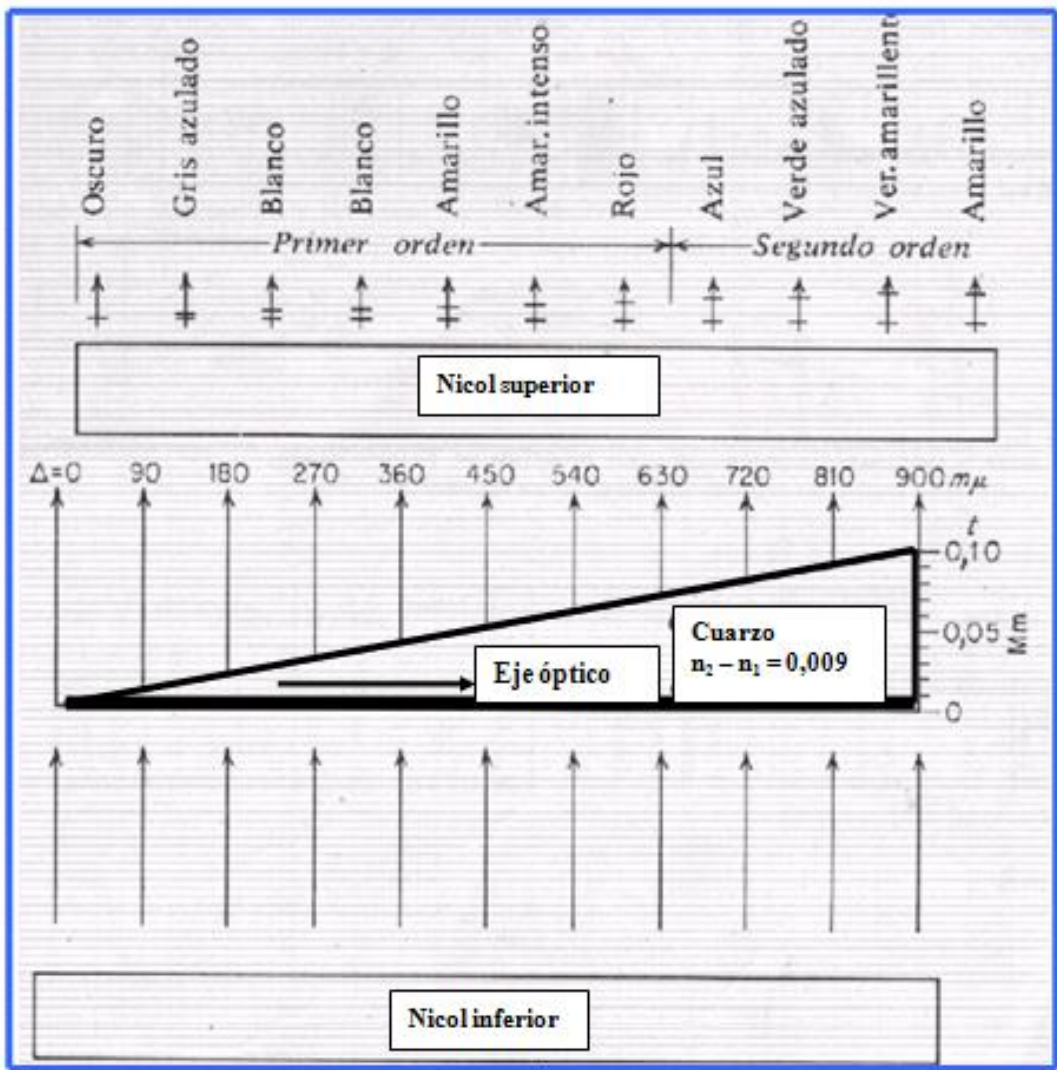


Fig.30. Colores de interferencia debidos a una porción de una cuña de cuarzo, situada entre nicoles cruzados y con luz blanca. Kerr, 1965.

## Quartz Wedge Interference Fringe Patterns

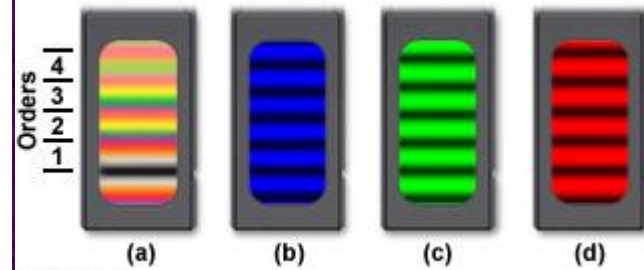


Figure 2

¿Por qué se ven las rayas negras e iluminadas cuando se usa luz monocromática?

En la cuña de cuarzo la diferencia de ( $n_2-n_1$ ) es constante ( $\sim 0,009$ ), sólo varía el espesor  $t$  - Si  $P = t(n_2-n_1)/\lambda$  y  $\Delta = t \cdot (n_2-n_1)$

Cuando  $t = 0$ ,  $\Delta(\text{retardo}) = 0 \rightarrow$  campo oscuro

Si  $t \uparrow$ ,  $\Delta \uparrow$

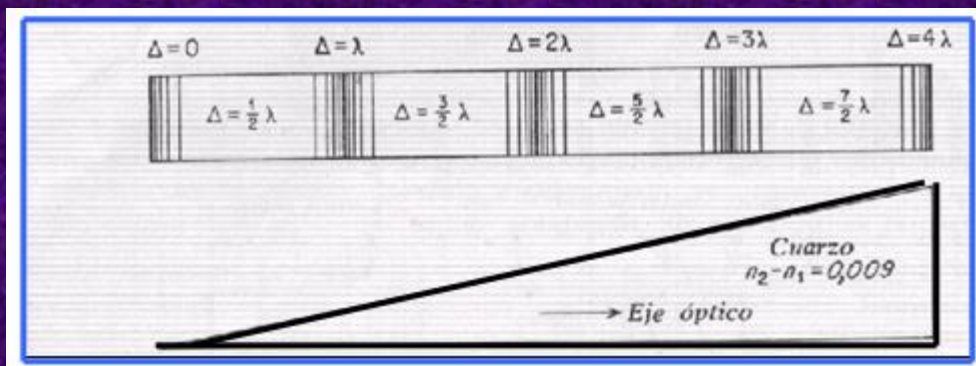
Al usar luz blanca una serie de colores, desde el gris, gris azulado, blanco, amarillo, anaranjado, rosado, azul, verde, se producen por interferencia de las ondas.

Los colores se repiten en serie, hasta que los colores de orden superior son de tonos iridiscentes tenues.

Colores de **primer orden** hasta **550 m $\mu$**  (rojo) de retardo

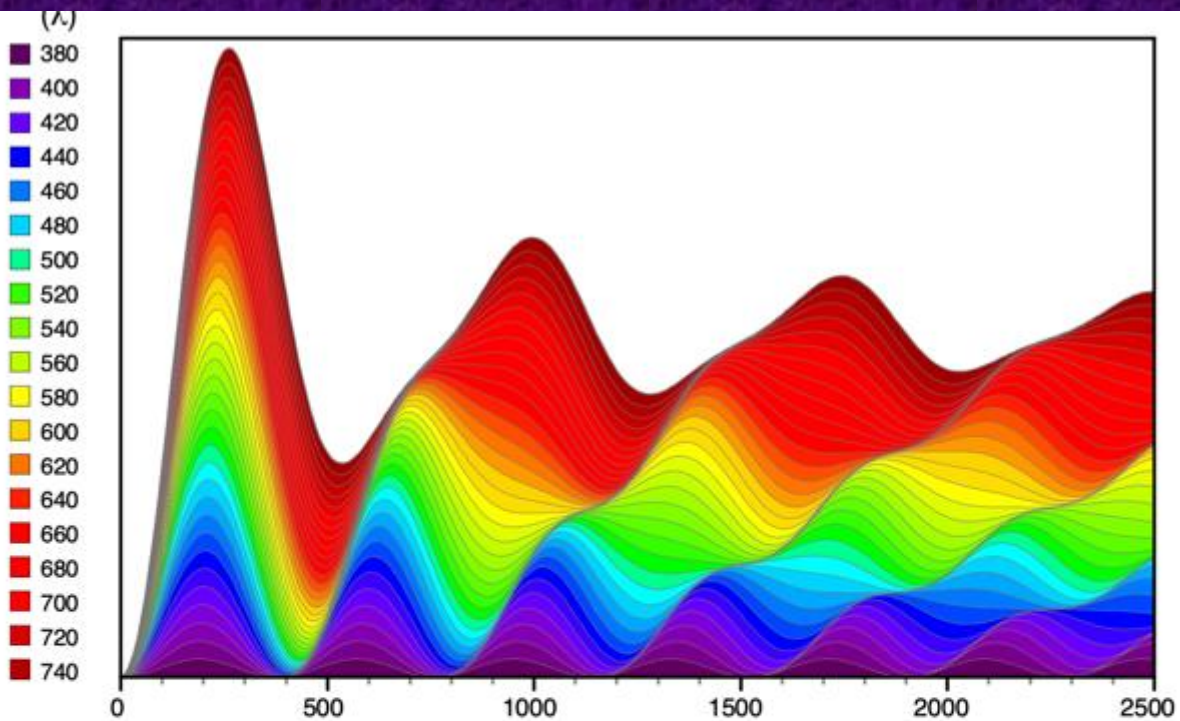
Colores de segundo orden de **550 m $\mu$  a 1100 m $\mu$** ,

desde **1100 m $\mu$  a 1650 m $\mu$**  colores de **tercer orden, etc**

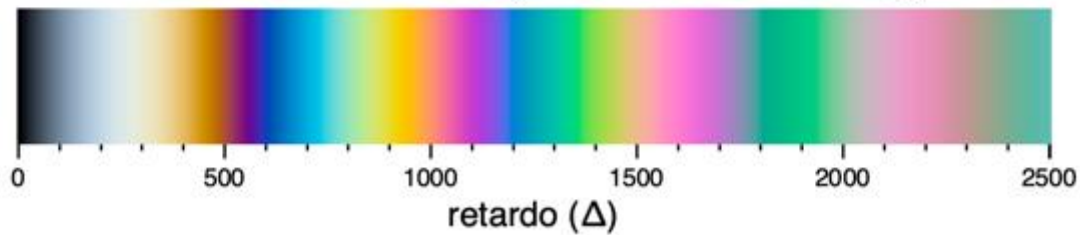


Si la luz es monocromática los órdenes quedan limitados por bandas negras (extinción de luz) donde el retardo  $\Delta$  es igual a  $n \lambda$

Intensidad de la luz que atraviesa el analizador

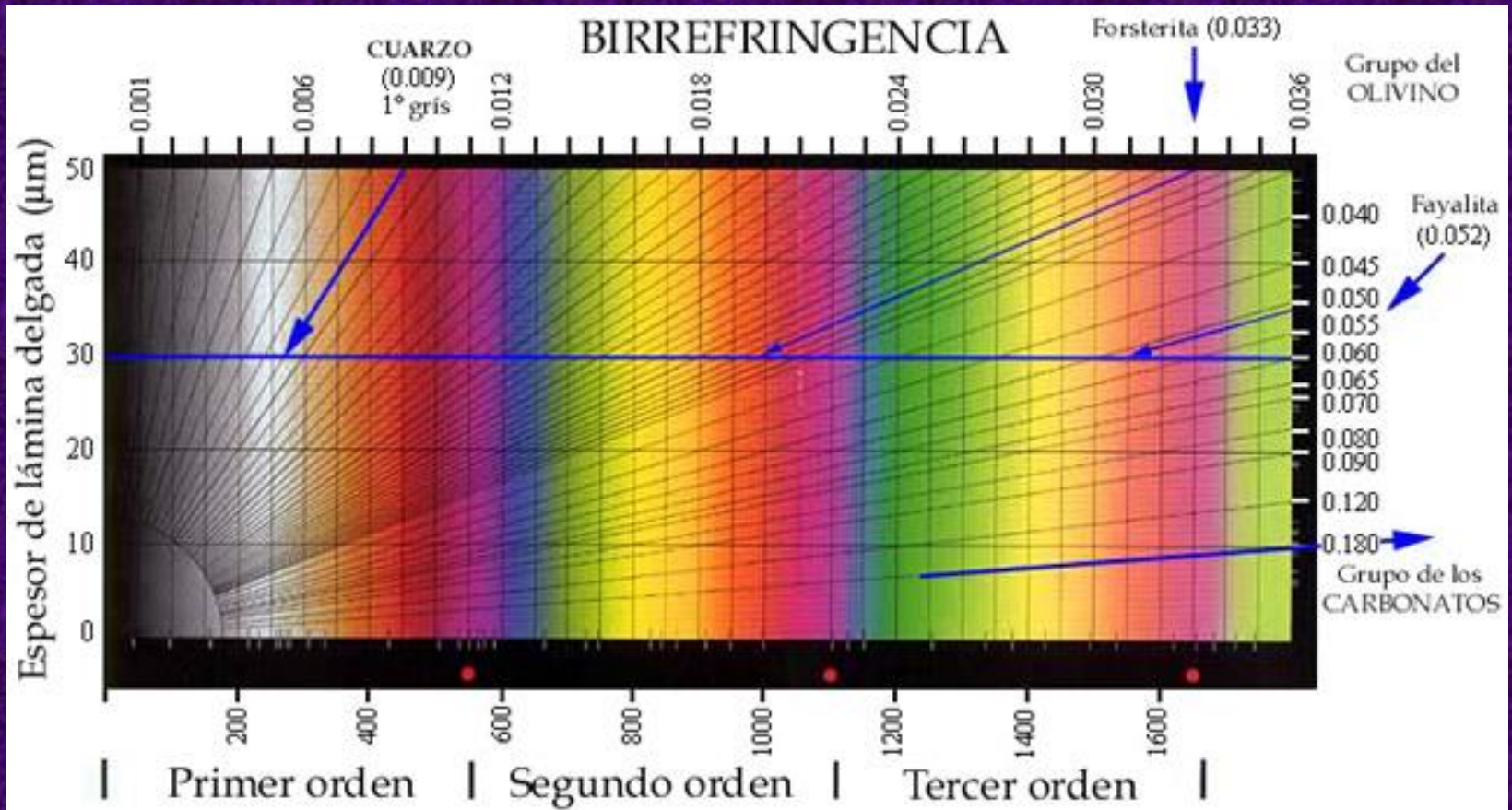


Colores resultantes (Tabla de Michel-Lévy)



Con luz blanca...

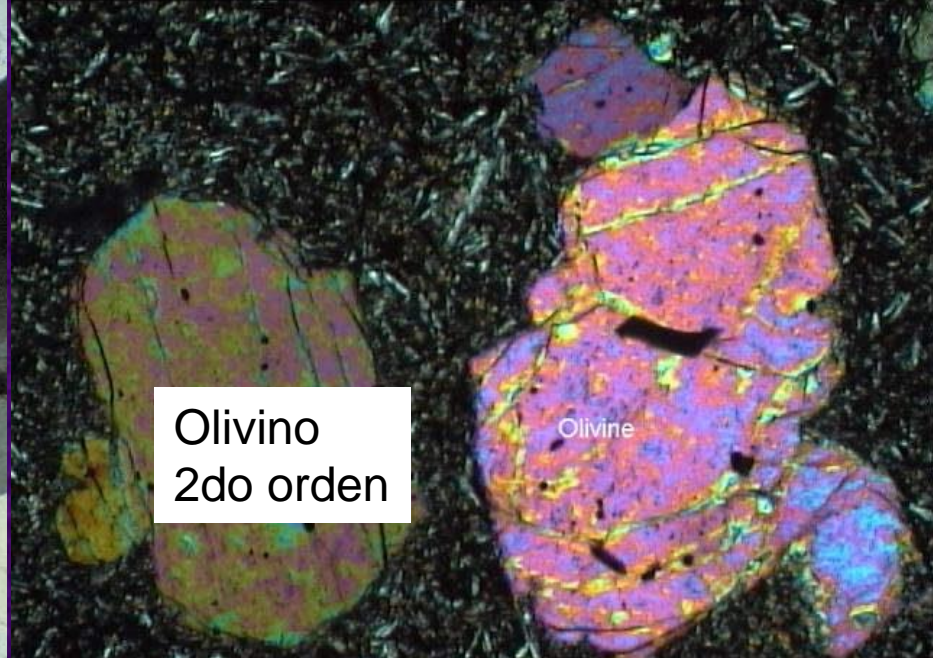
## Tabla de colores de interferencia de Michel Levy



Las secciones delgadas están normalizadas a 30 μm

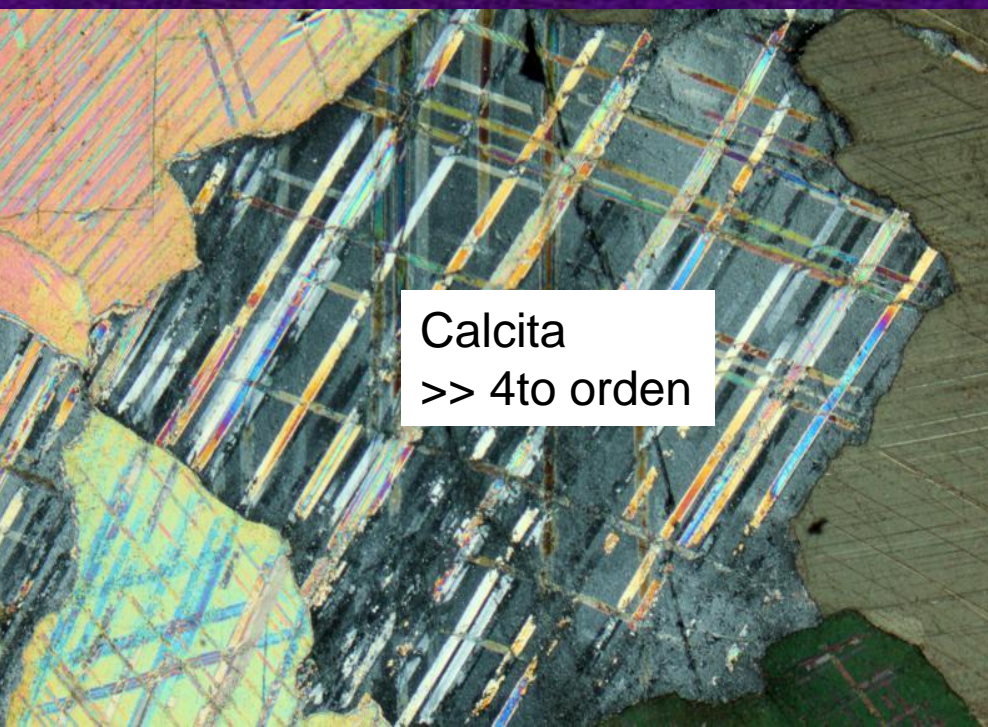


Cuarzo  
1º orden



Olivino  
2do orden

Olivine



Calcita  
>> 4to orden



Clorita  
anómalo

## COMPENSADORES:

Las placas compensadoras proporcionan retardos conocidos que se suman o se restan al retardo proporcionado por las muestras observadas. Estos compensadores pueden proveer retardos constantes como:

- 1) La lámina de yeso  $1\lambda$  ( $550\ \mu\text{m}$ ) de retardo y
- 2) La lámina de mica  $\frac{1}{4}\lambda$

- 3) La cuña de cuarzo ó
- 4) El compensador de Berek brindan retardos variables ( $\neq$  espesor)

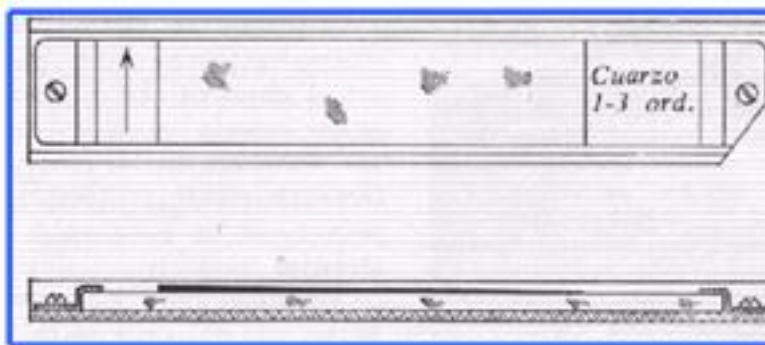


Fig. 37. Cuña de cuarzo montada sobre una placa de cristal en una armadura metálica. La flecha indica la dirección del rayo lento. En general una cuña de cuarzo cubre cuatro Órdenes.

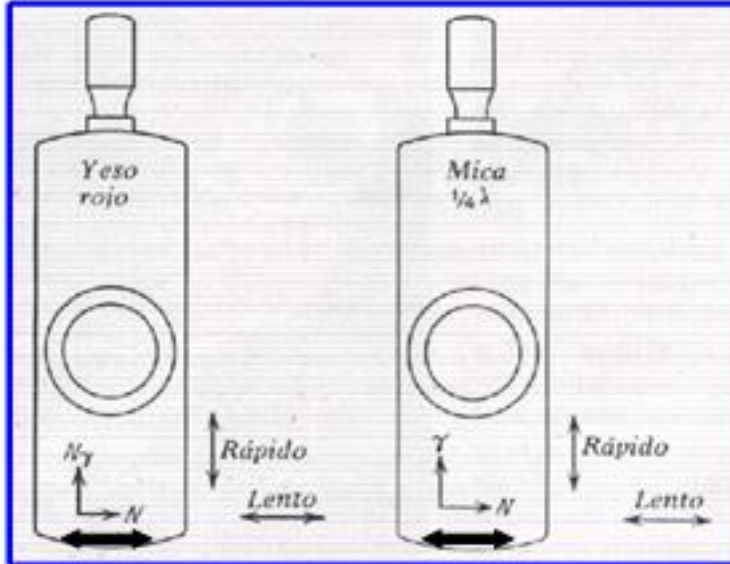


Fig. 38. Lámina de yeso con un retardo de  $1\lambda$  y lámina de mica con un retardo de  $\frac{1}{4}\lambda$

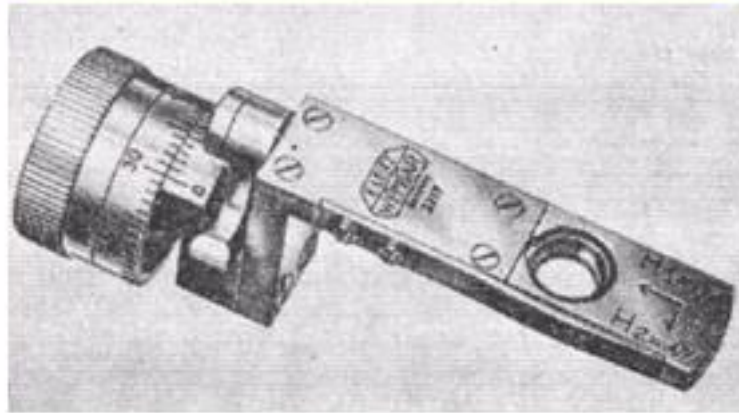


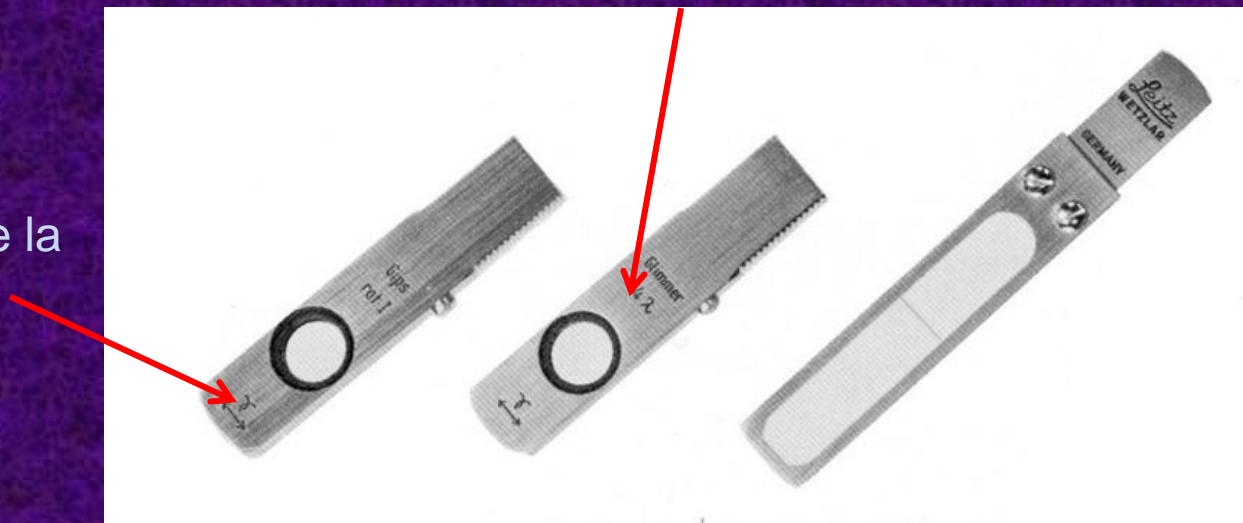
Fig. 39. Compensador de Berek.

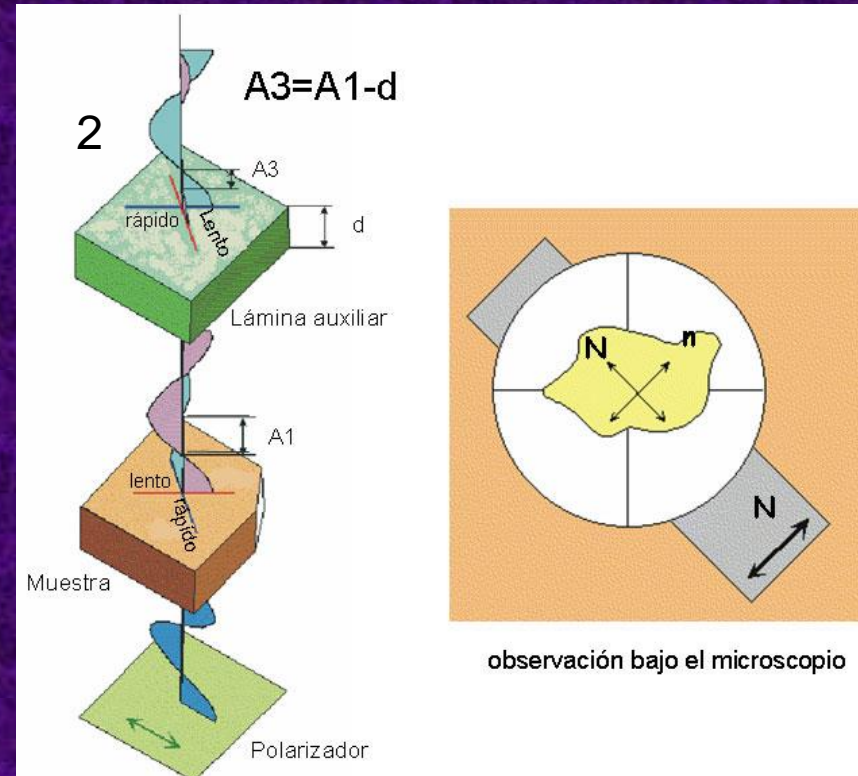
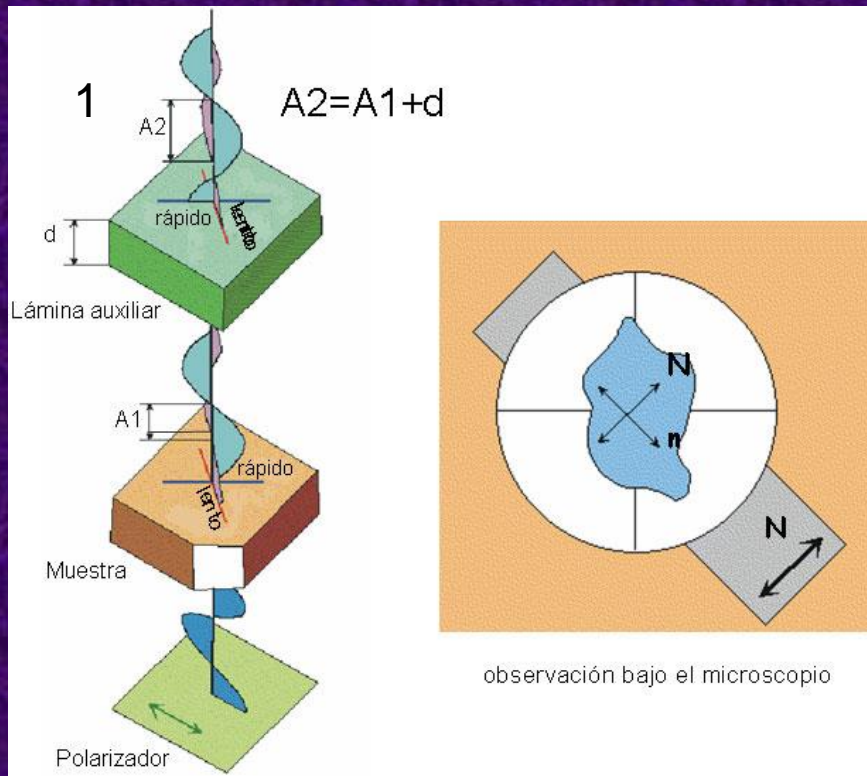
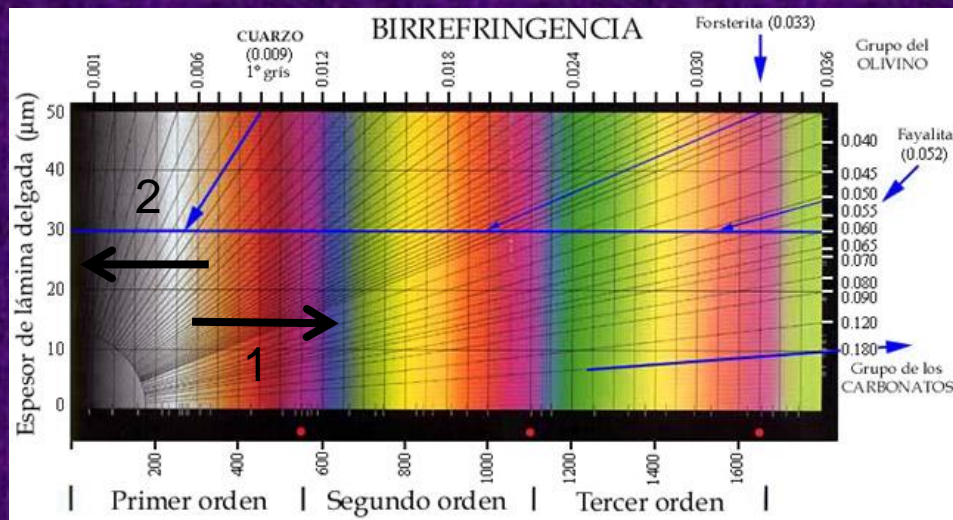
En observaciones ortoscópicas con analizador, y usando compensadores podemos reconocer:

- 1) el orden de un color de interferencia de una sección
- 2) las direcciones de vibración de la sección, o sea donde vibran el rayo lento o rayo rápido

Retardo impuesto ( $1 \lambda$ ,  $\frac{1}{4} \lambda$ , etc)

dirección de vibración rayo lento de la placa

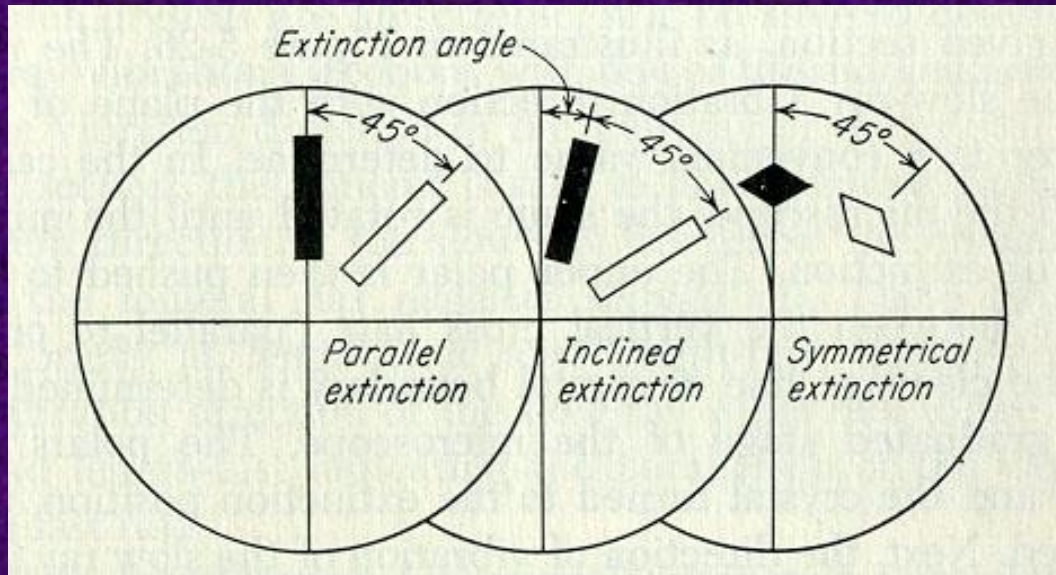






# Ángulo de extinción

Dependiendo de la diferencia angular que existe entre la posición de las direcciones de vibración con alguna dirección cristalográfica específica, se tienen distintos ángulos de extinción.



1

2

3

## 1- Extinción paralela

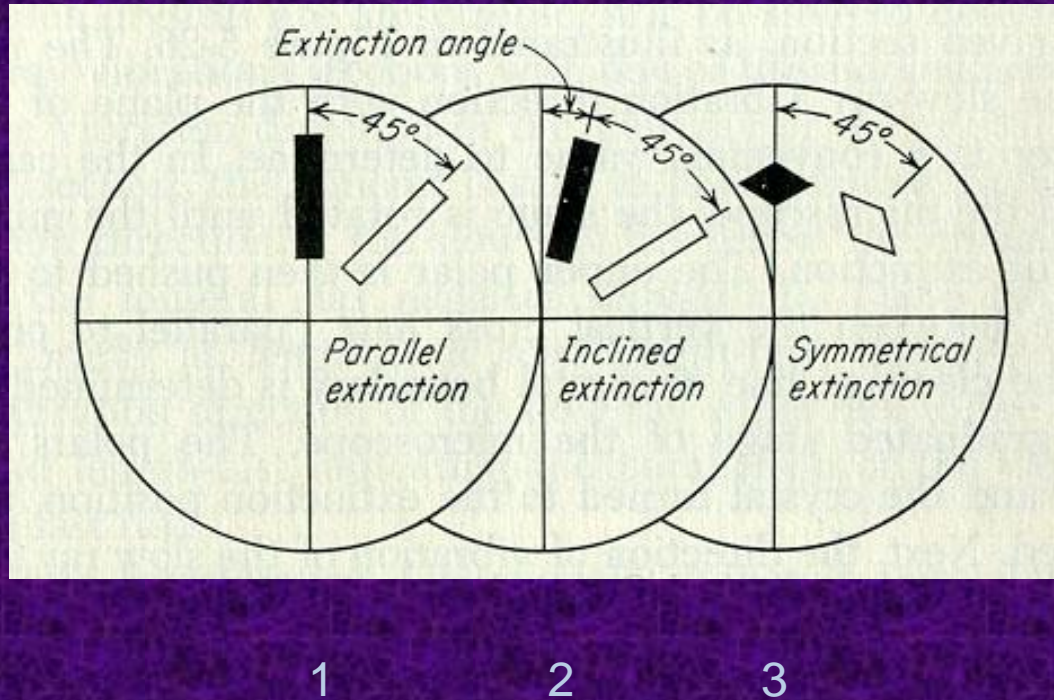
Las direcciones de vibración coinciden con las cristalográficas.

Máxima iluminación a  $45^\circ$

## 3- Extinción simétrica

Variante de la paralela pero a  $45^\circ$  de las direcciones cristalográficas

# Ángulo de extinción



## 2- Extinción oblicua

Las direcciones de vibración no coinciden con las cristalográficas, sino que se ubican a un cierto ángulo.

Máxima iluminación ?

Las direcciones cristalográficas se identifican a partir de elementos como

- Contornos minerales (euhedralidad - subhedralidad)
- Trazas de exfoliación
- Maclas

Los ángulos son medidos en el vernier de la platina graduada

## Ángulo de extinción

La notación del ángulo de extinción debe referirse al rayo más lento y al elemento cristalográfico considerado, por ej.:

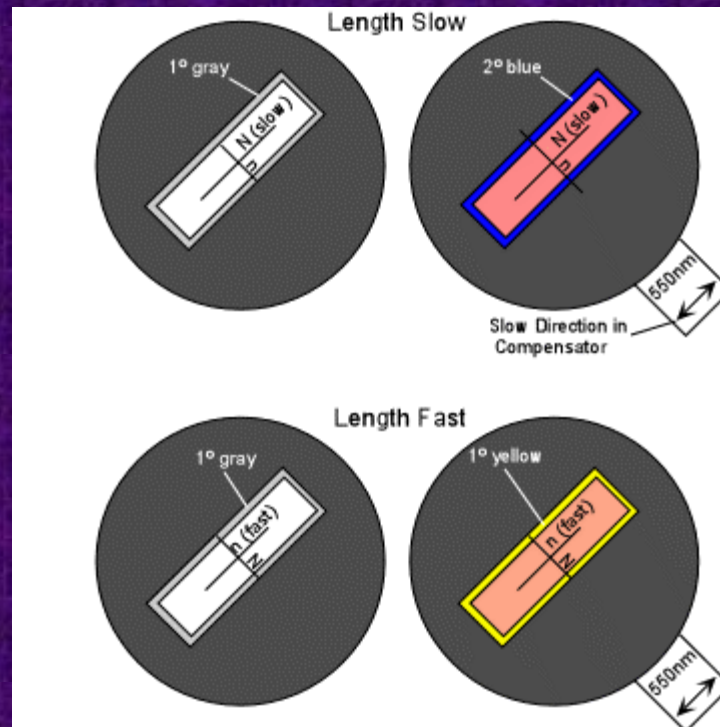
$$Z \wedge C = 30^\circ$$

$$Z \wedge 110 = 22^\circ$$

Siendo Z el rayo lento  
C el eje cristalográfico  
110 el índice de Miller de una dirección  
cristalográfica (cara, macla, clivaje, etc)

# Elongación

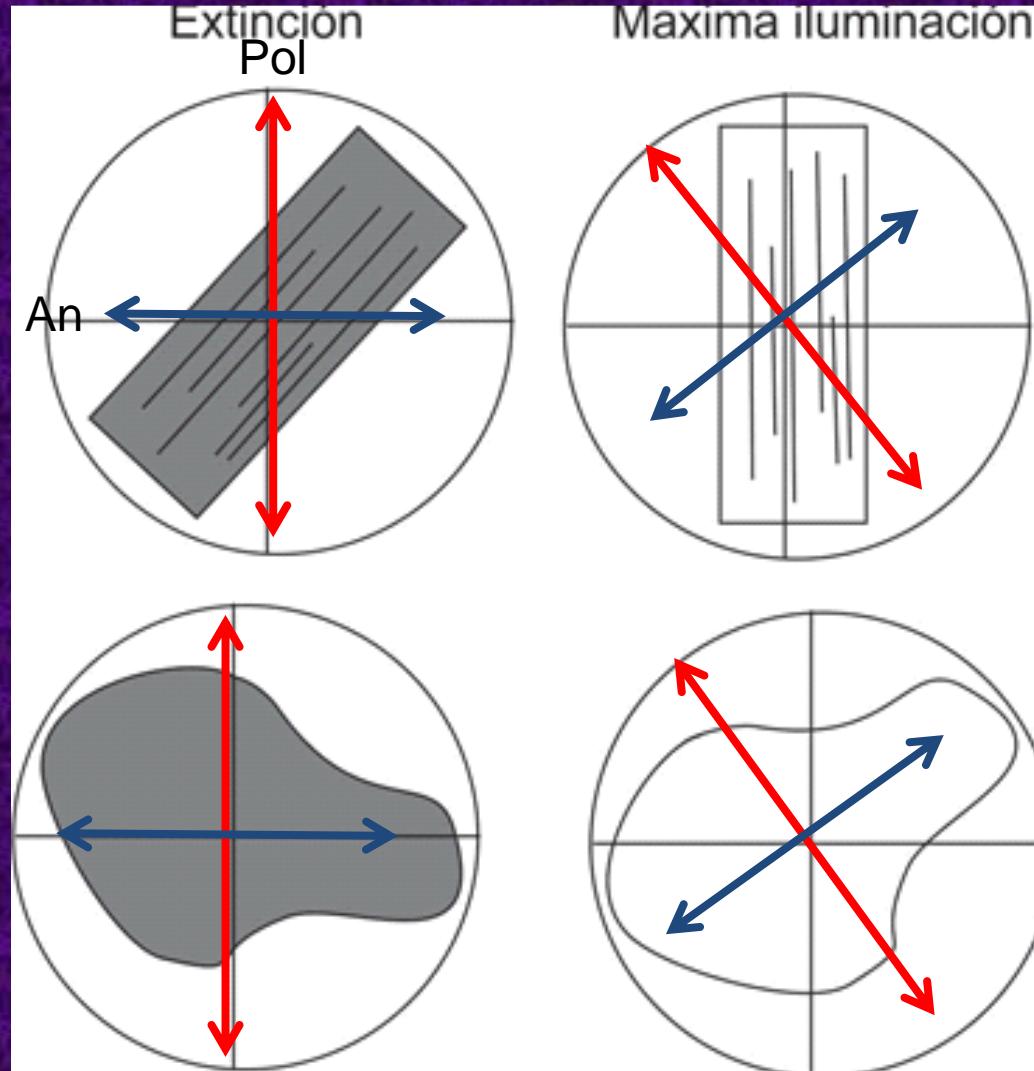
- Minerales de hábito acicular, tabular, alargado
- Definir la dirección de vibración del rayo que coincide con máxima dimensión.
- Si el rayo lento coincide con la elongación se dice largo-lento
- Si es el rayo rápido se dice largo-rápido.



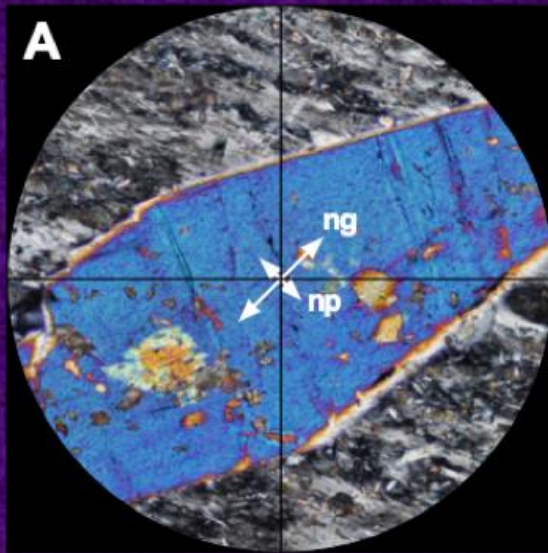
**Largo-lento  
Adición**

**Largo-rápido  
Sustracción**

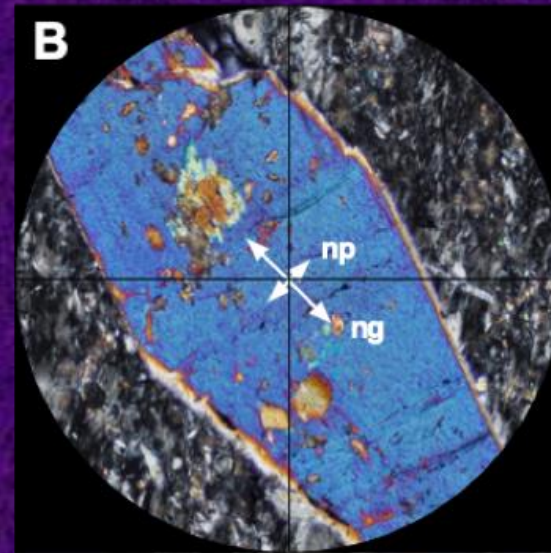
# Direcciones de vibración?



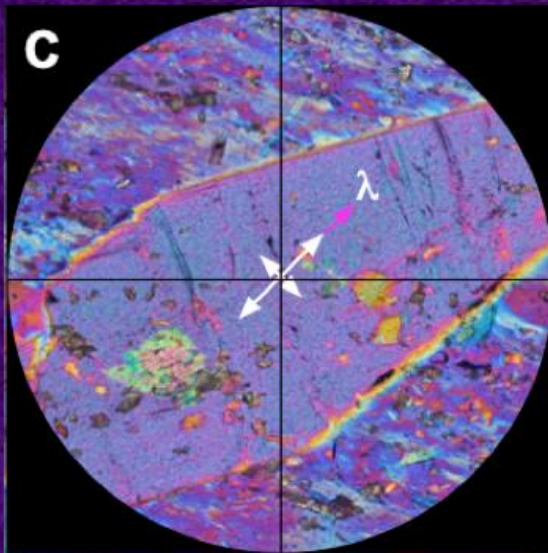
Identificar Rayos??



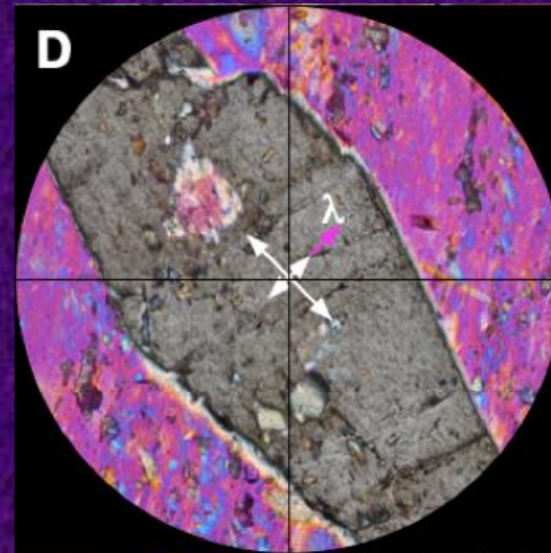
Posición de máxima iluminación



Posición de máxima iluminación



Al introducir el compensador  $\lambda$ , el color sube



Al introducir el compensador  $\lambda$ , el color baja



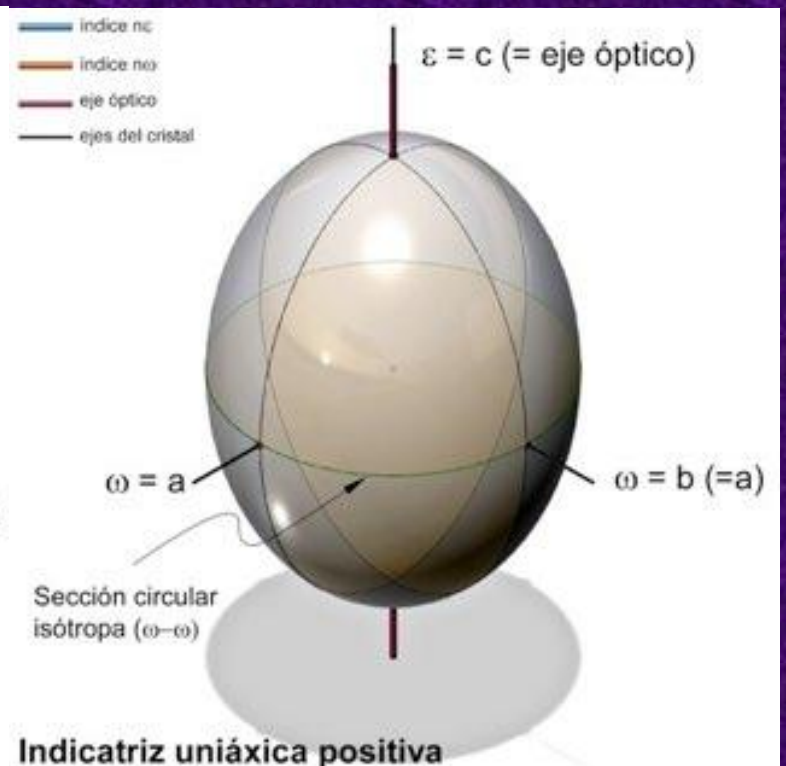
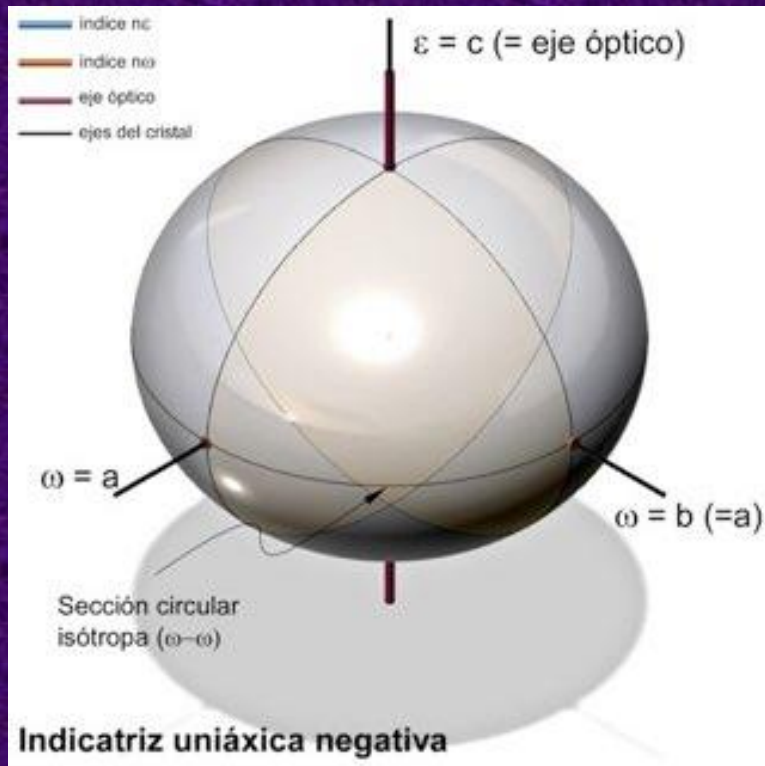
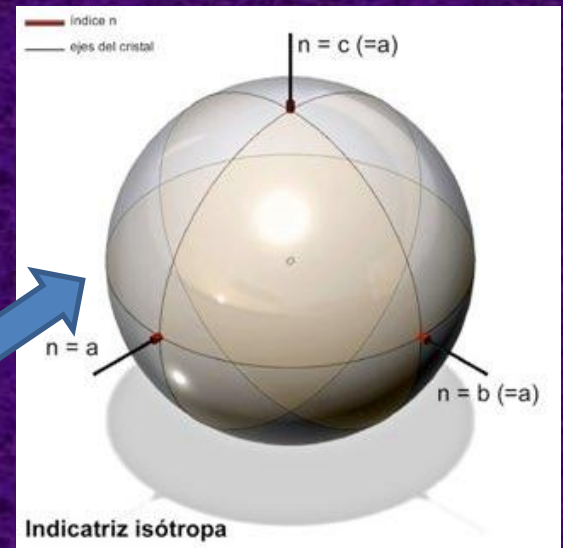
color de interferencia

# Indicatriz Uniaxial

Elipsoide de revolución

comparar con la indicatriz isótropa !

Sistemas dimétricos

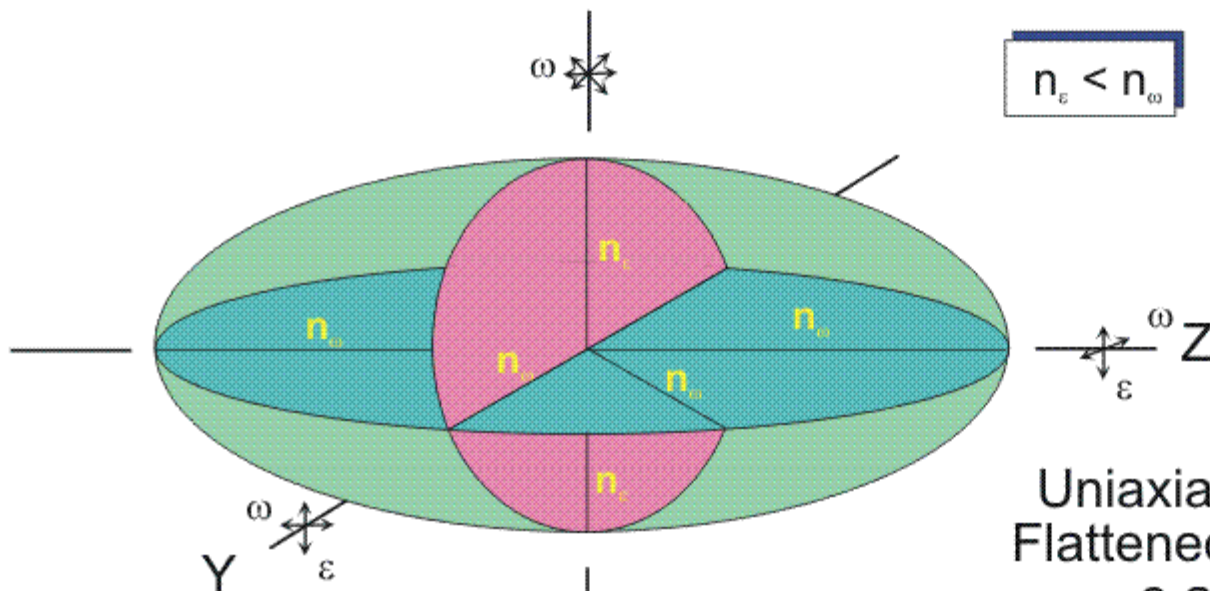






# UNIAXIAL NEGATIVE INDICATRIX

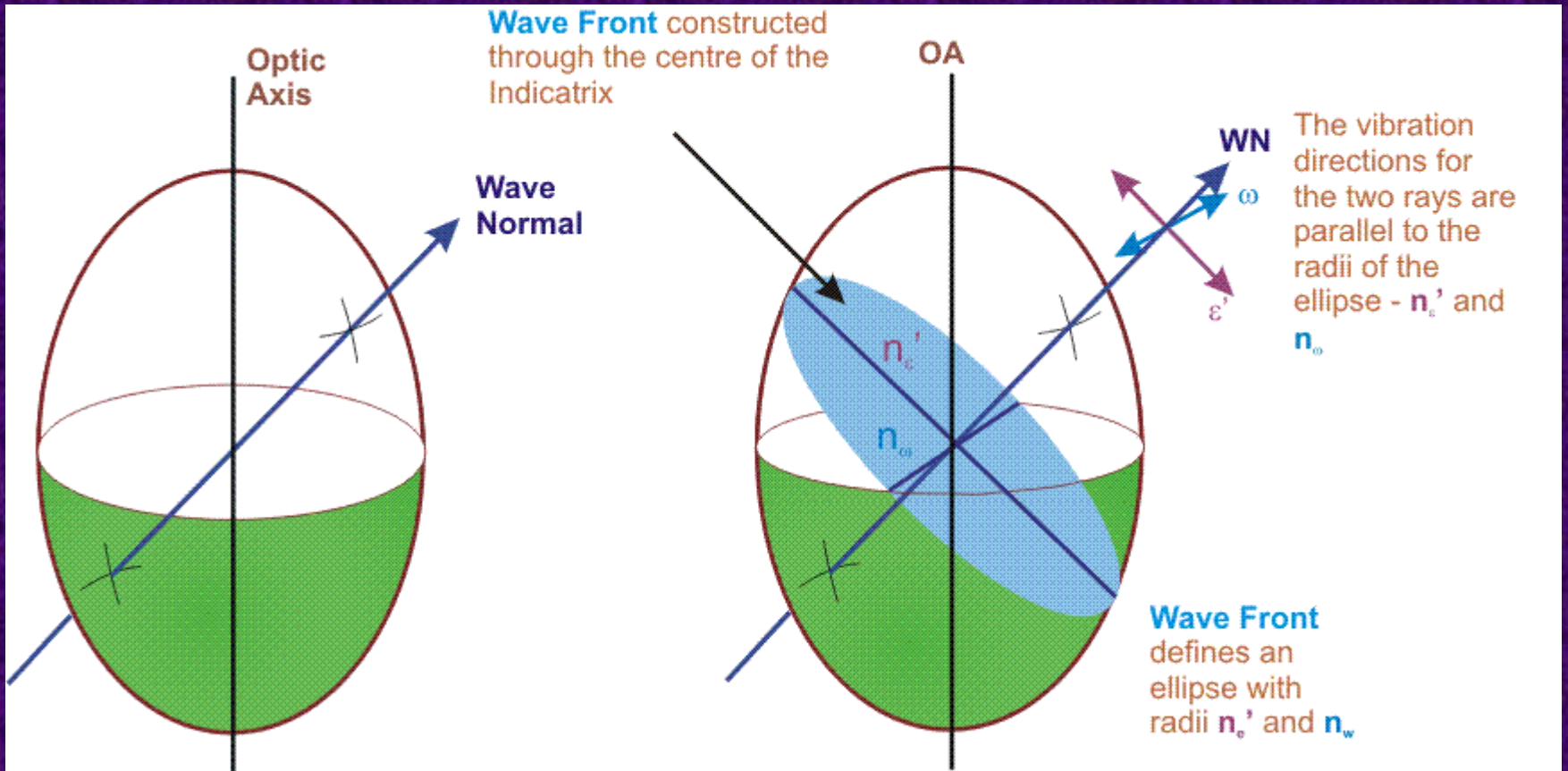
X = optic axis = c-axis



Uniaxial Negative Indicatrix  
 Flattened along the optic axis  
 c-axis = optic axis  
 c-axis = X indicatrix axis

Si  $\omega > \epsilon$  = negativo

# Sección al azar



Elipse de radios  $\varepsilon' < \varepsilon$  y  $\omega$

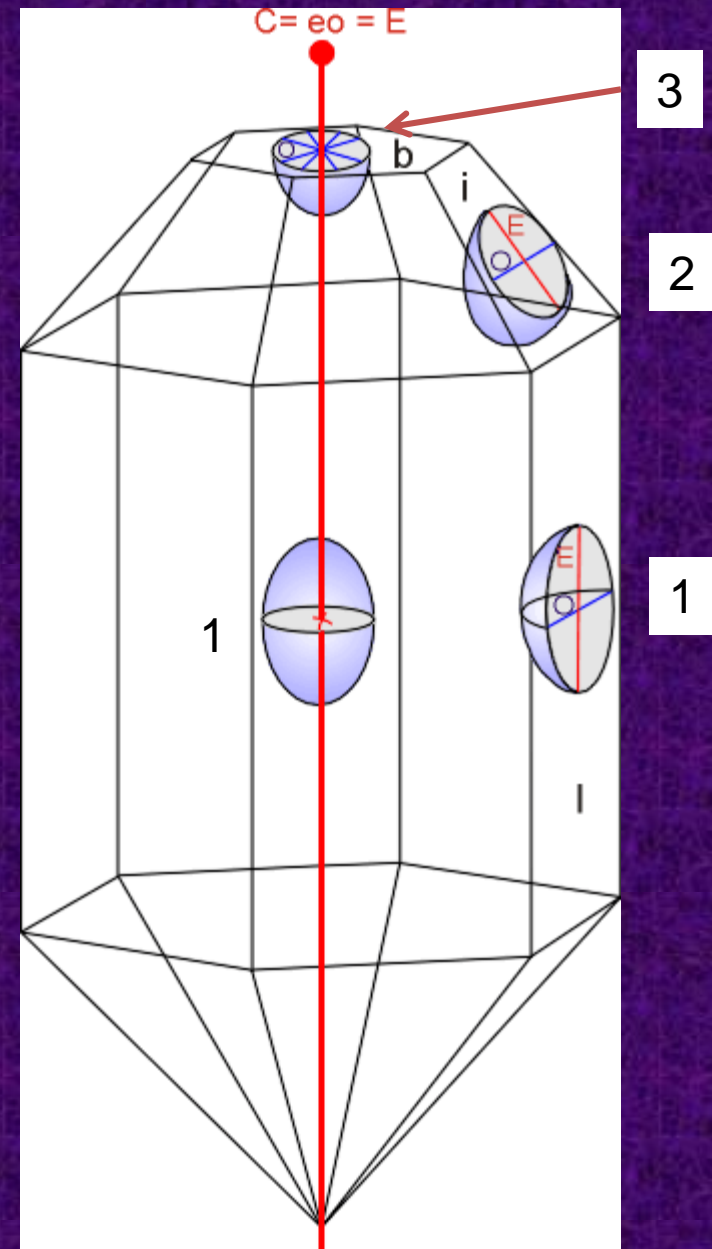
# Diferentes secciones en un cristal de cuarzo (hexagonal)

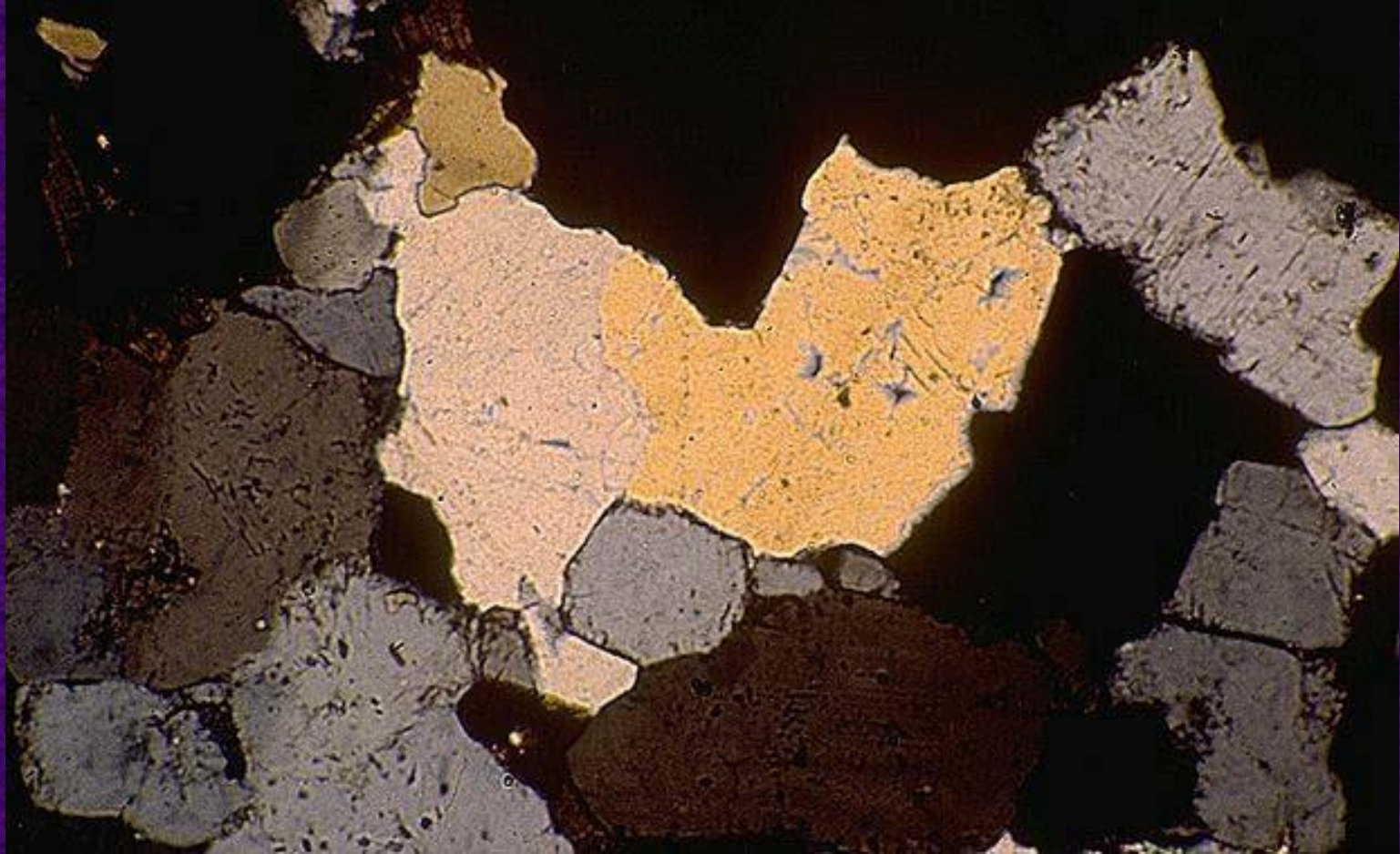
Eje c es **eje óptico** = la normal a una sección circular del elipsoide

1) Sección paralela al eje óptico  
 $\varepsilon$  y  $\omega$  yacen en la platina  
Máxima birrefringencia

2) Sección oblicua al eje óptico  
 $\varepsilon' < \varepsilon$  y  $\omega$  yacen en la platina  
Birrefringencia intermedia

3) Sección perpendicular al eje óptico  
Únicamente  $\omega$  yace en la platina  
Birrefringencia?

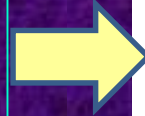




# LUZ POLARIZADA CONVERGENTE

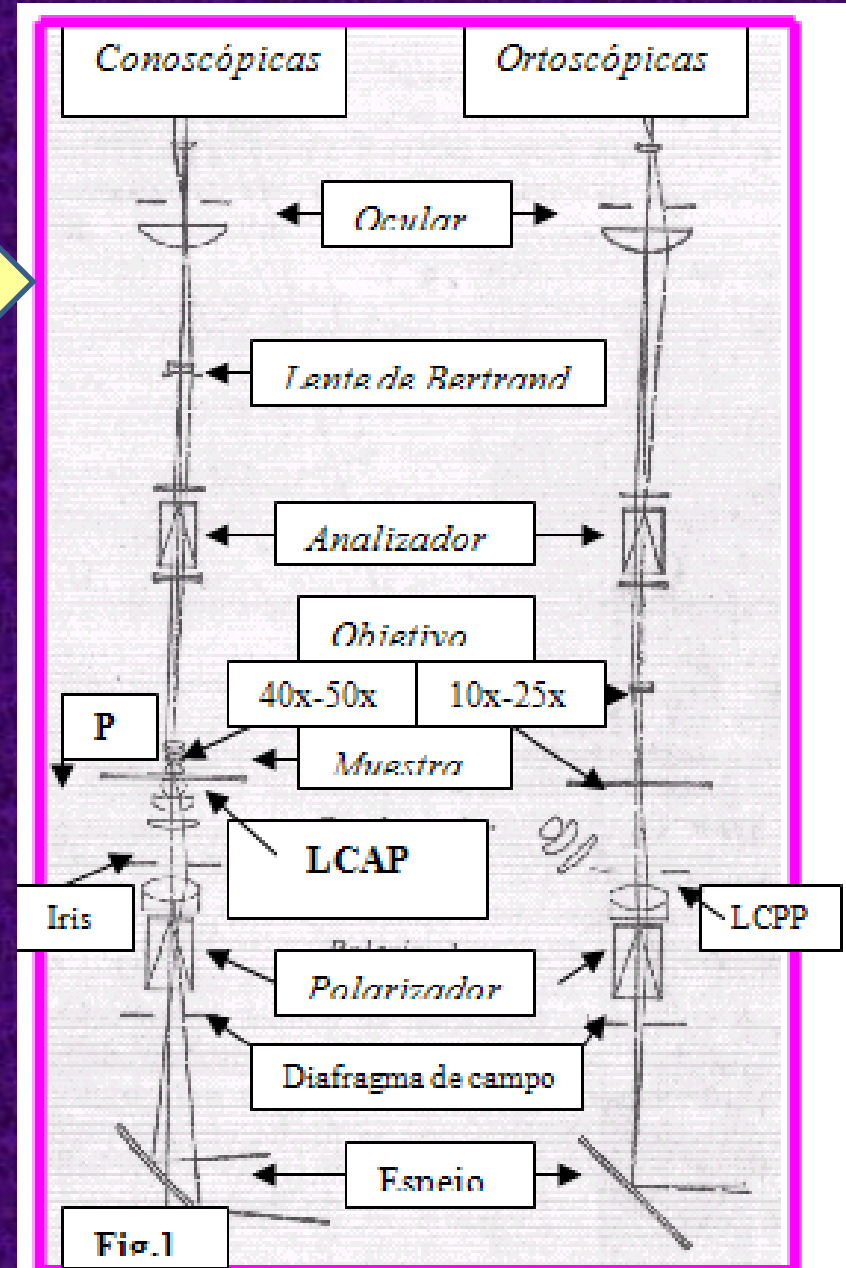
## Conoscopía

El tren del microscopio que se usa para la obtención de figuras de interferencias visibles en el campo del ocular.



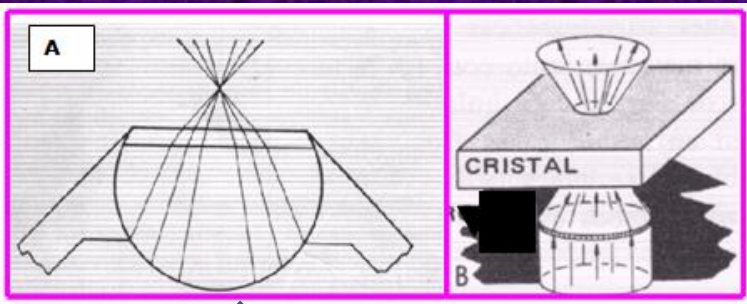
Las figuras de interferencias son particularmente útiles para la determinación del carácter y signo óptico de los minerales. Las figuras se forman por debajo del plano focal del ocular.

La lente de Bertrand, tiene como finalidad llevar la imagen de la figura al campo del ocular. También se pueden observar las figuras quitando tanto la lente de Bertrand como el ocular.



# FORMACIÓN DE FIGURAS DE INTERFERENCIA

La lente frontal del condensador de alto poder es la lente que produce un haz convergente sobre la placa del mineral. Más conocida como “lente convergente”

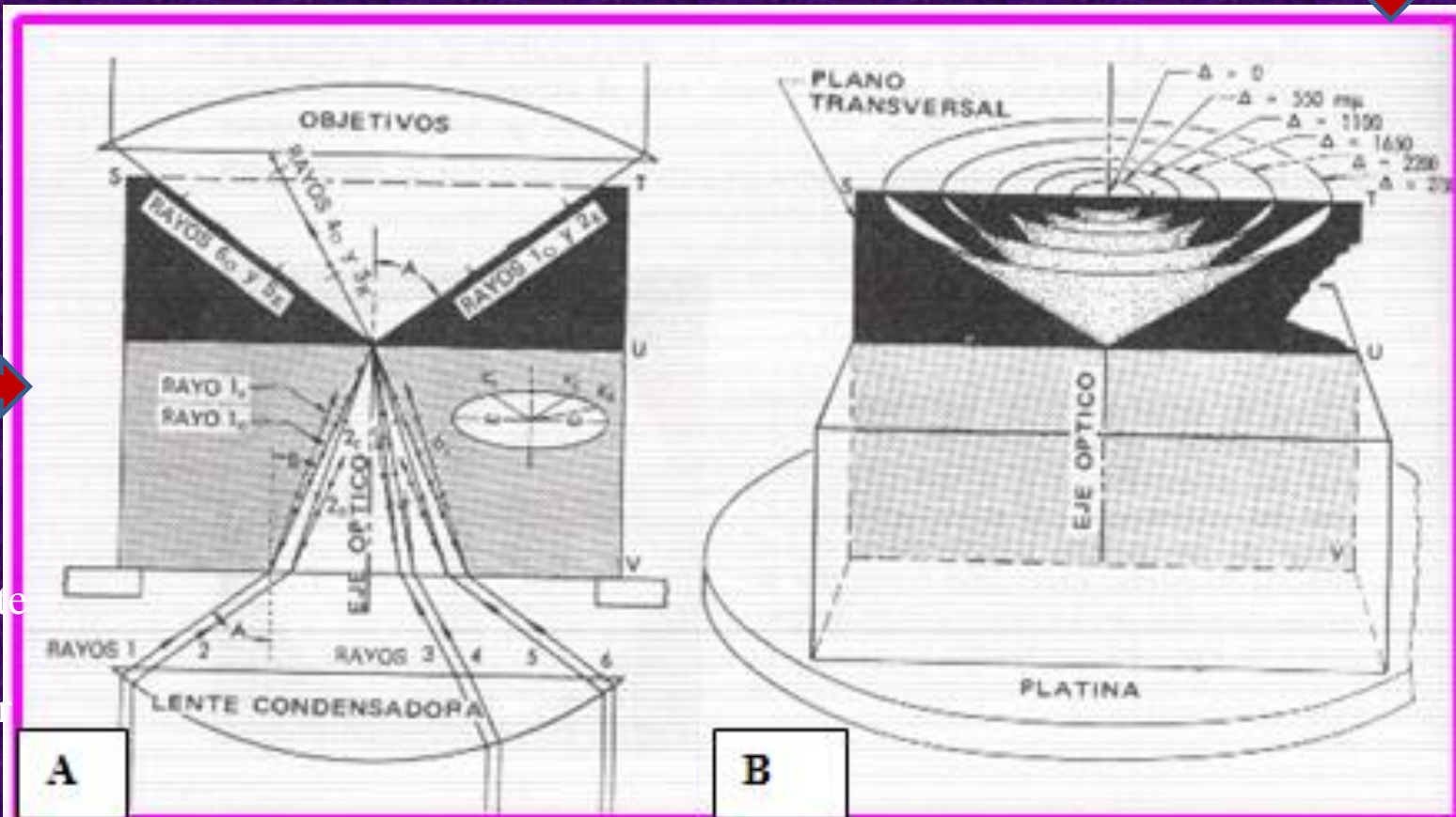


Marcha de los rayos con luz convergente, que atraviesan el mineral en las observaciones conoscópicas

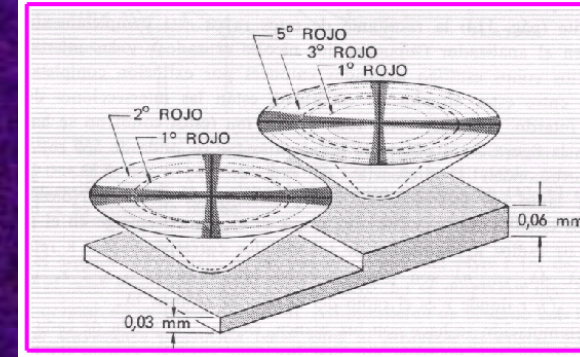
(B) Conos de igual retardo, para los mismos, en perspectiva

Lente convergente

(A) Vista transversal de un cristal uniáxico, iluminado conoscópicamente cuyo eje óptico sea perpendicular a la platina.



La luz polarizada convergente produce variaciones en el retardo cuando se interpone el analizador de manera similar a la que se produce la cuña de cuarzo (variación de espesor “t”).



**El uso de la lente convergente** hace que los rayos incidan radialmente alrededor del centro. En consecuencia las direcciones de vibraciones se distribuyen tangencial y radialmente en una rotación de  $360^\circ$ .

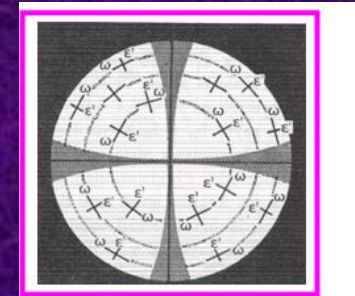
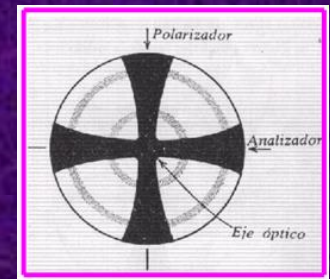


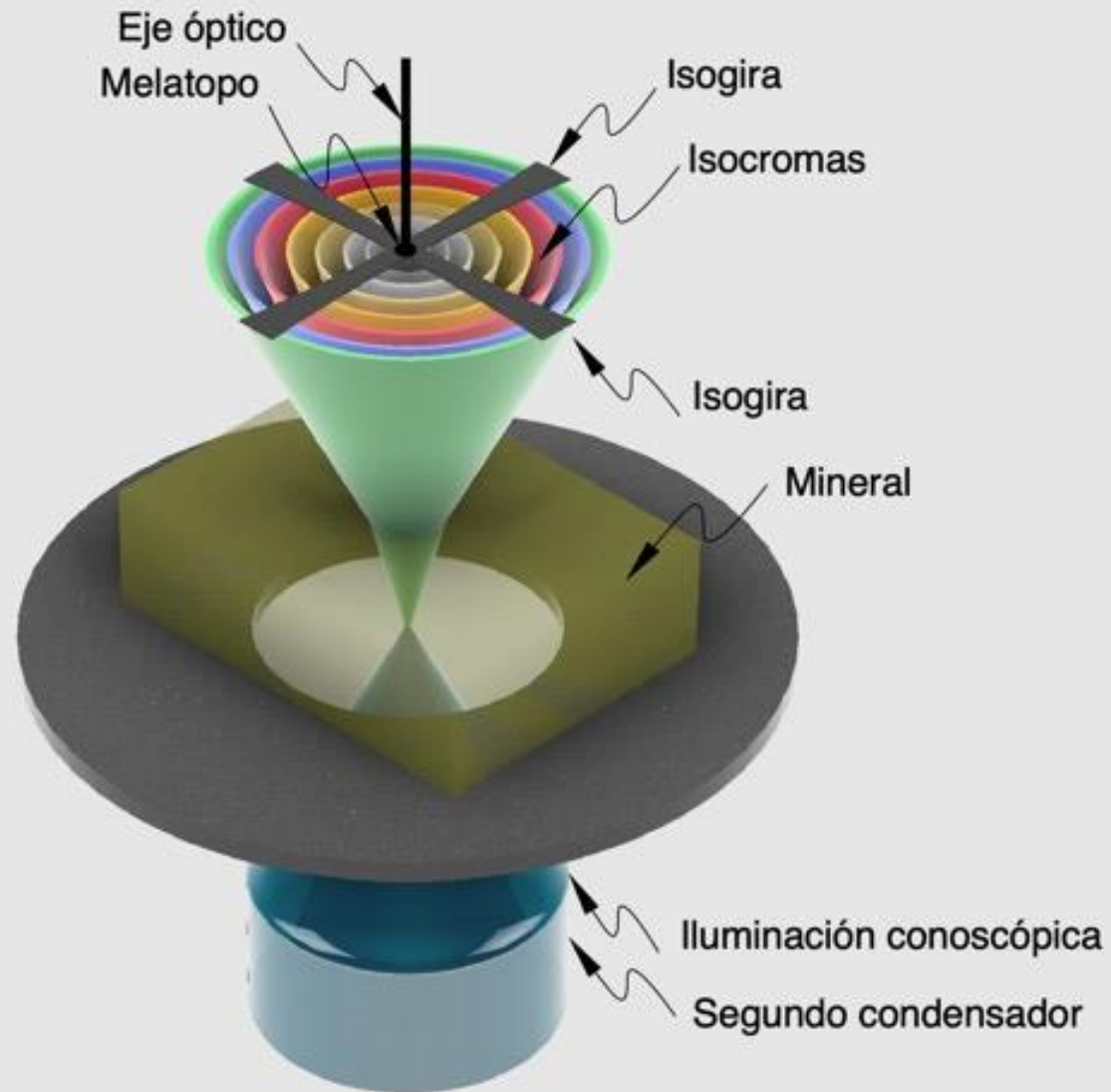
Fig.9. Distribución radial de isocromas

La **cruz negra** que se observa en una figura centrada de eje óptico se produce porque las direcciones de vibración en el mineral observado coinciden con las direcciones de los polarizadores (inferior y analizador)



Las bandas coloreadas (isocromas), se distribuyen en círculos concéntricos, y su número depende de: a) el espesor de la placa mineral, b) de la birrefringencia del mineral. La secuencia de los colores es la misma que para la tabla de colores de Michel Levy.

## Figura de interferencia uniáxica





# Formación de las isocromas

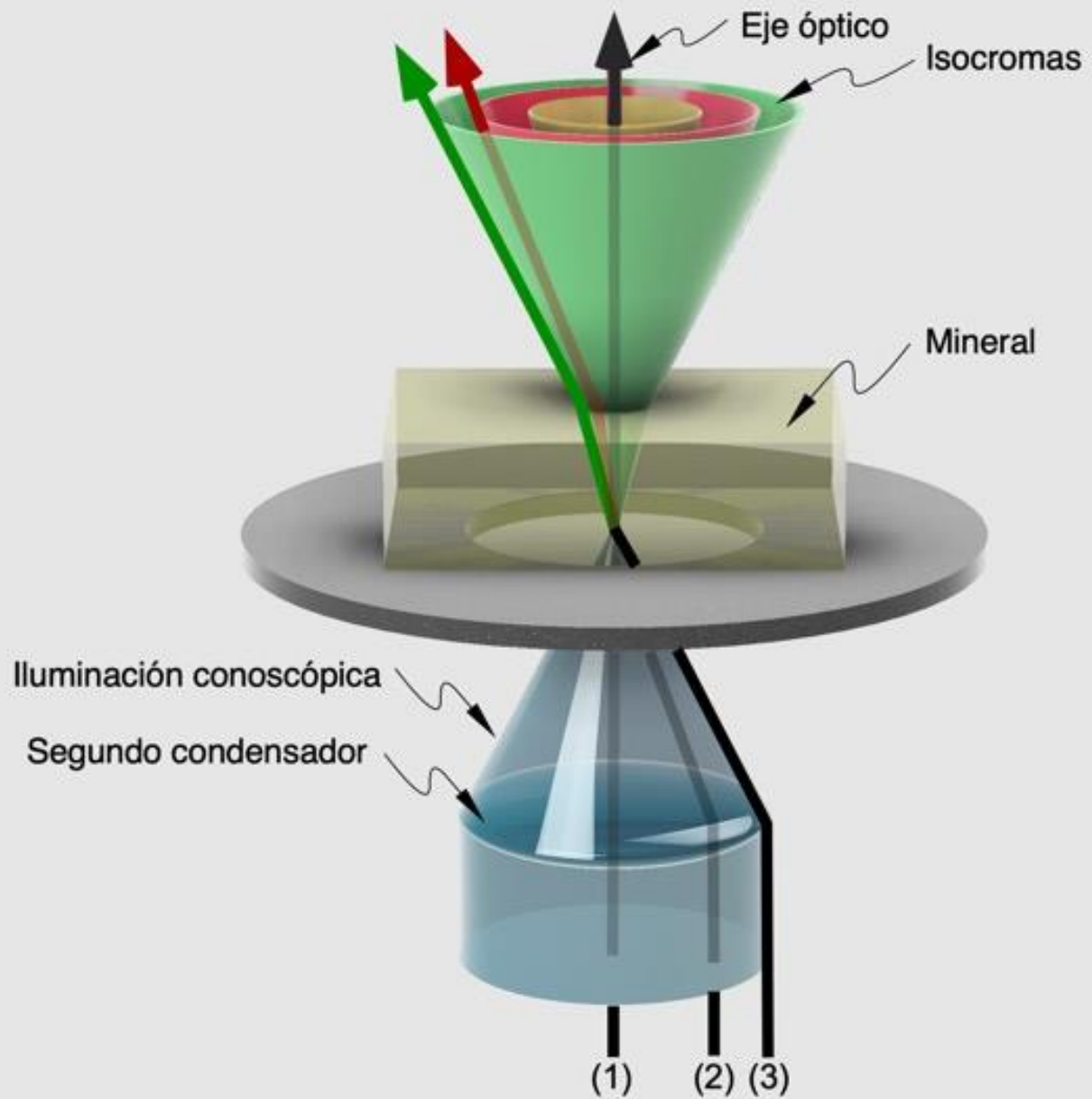
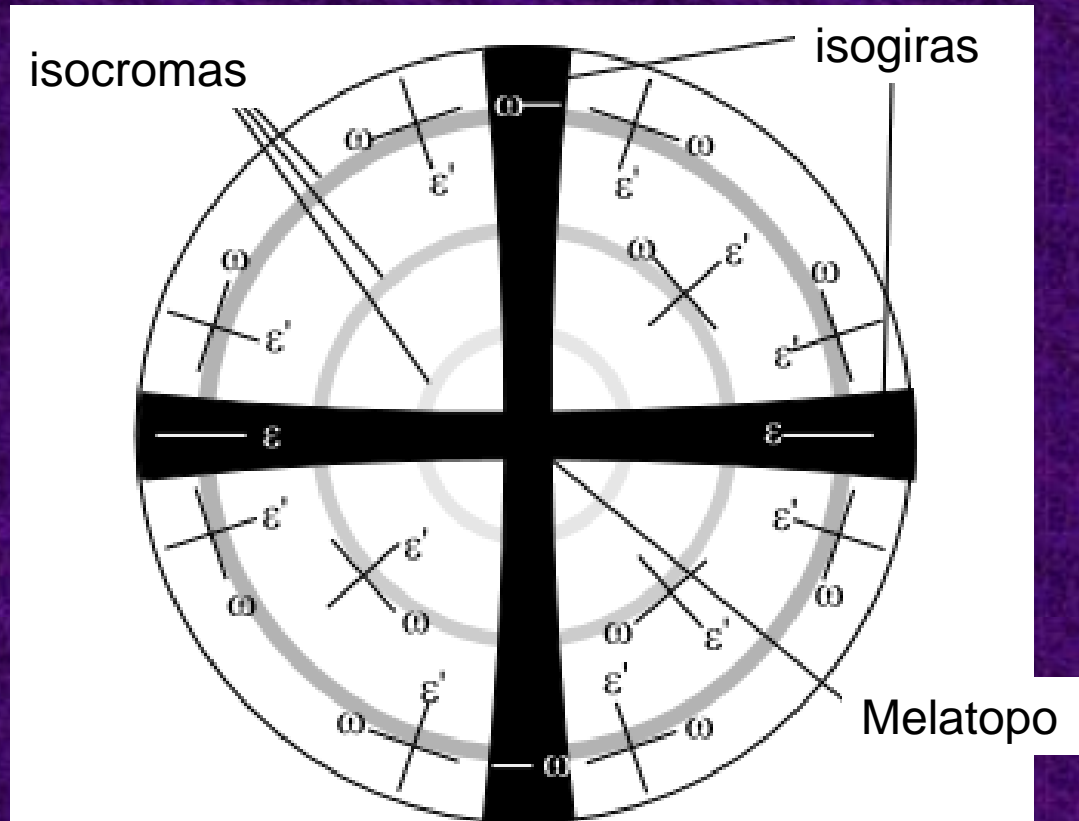


Figura uniaxial centrada de eje óptico  
Sección isótropa (siempre extinguida)  
El eje c (e.o.) es perpendicular a la platina



Giro de 360 °: no hay cambio

Figura uniaxial descentrada de eje óptico  
 Sección de birrefringencia intermedia  
 El eje c del mineral está oblicuo

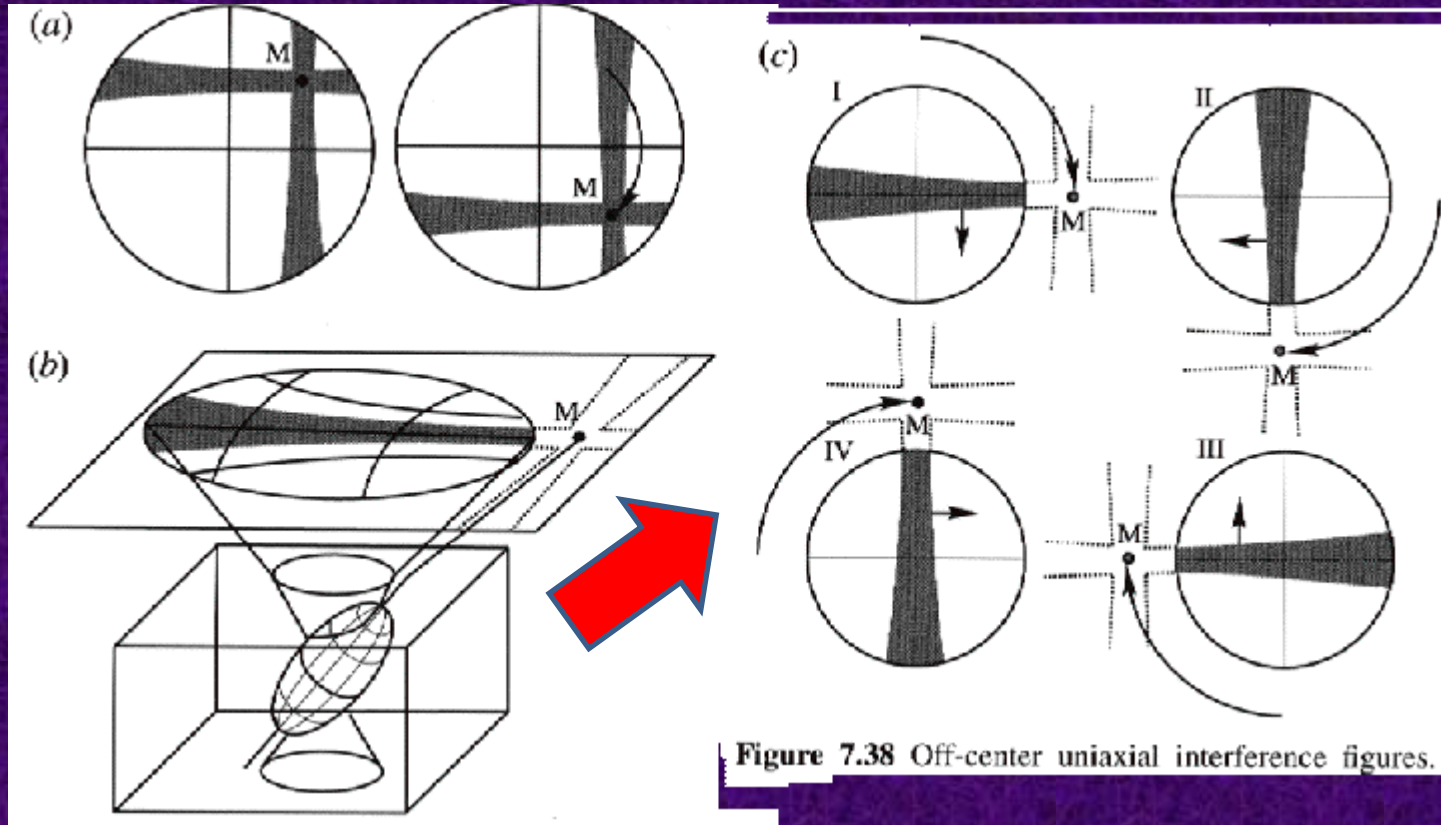
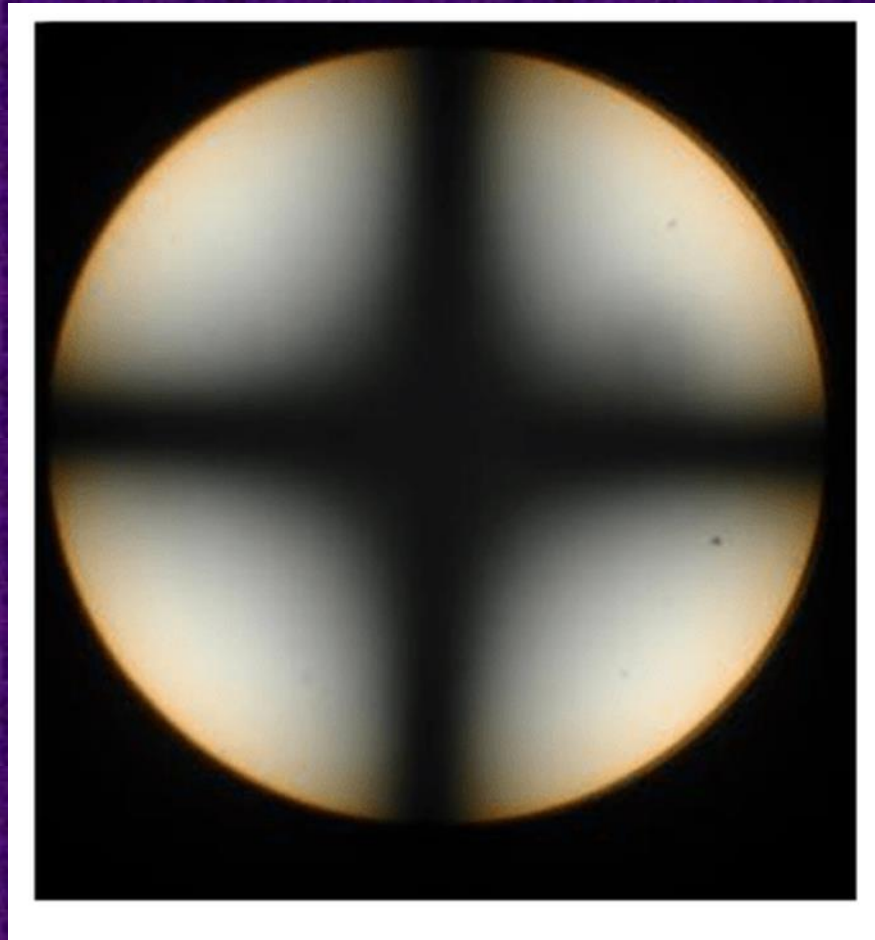


Figure 7.38 Off-center uniaxial interference figures.

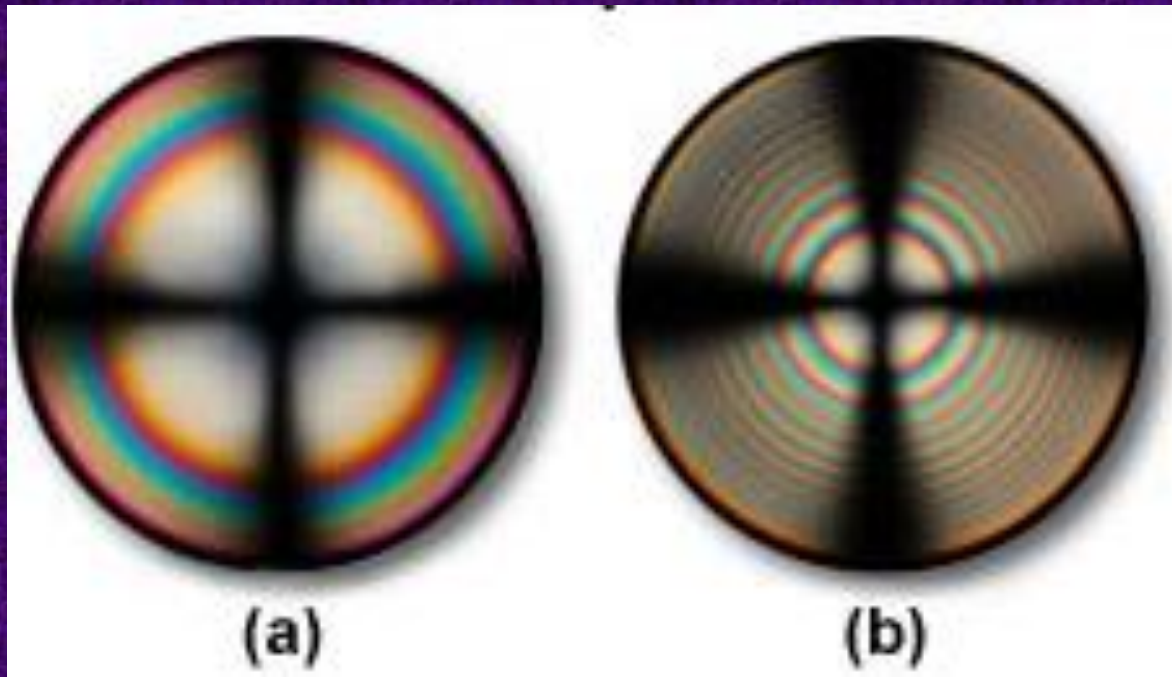
Levemente excéntrico

Muy descentrado

Giro de 360° en dirección horaria permite conocer qué cuadrante de la figura observamos  
 Secuencia: abajo, izquierda, arriba, derecha



Mineral de birrefringencia baja: cuarzo, apatita, corindón



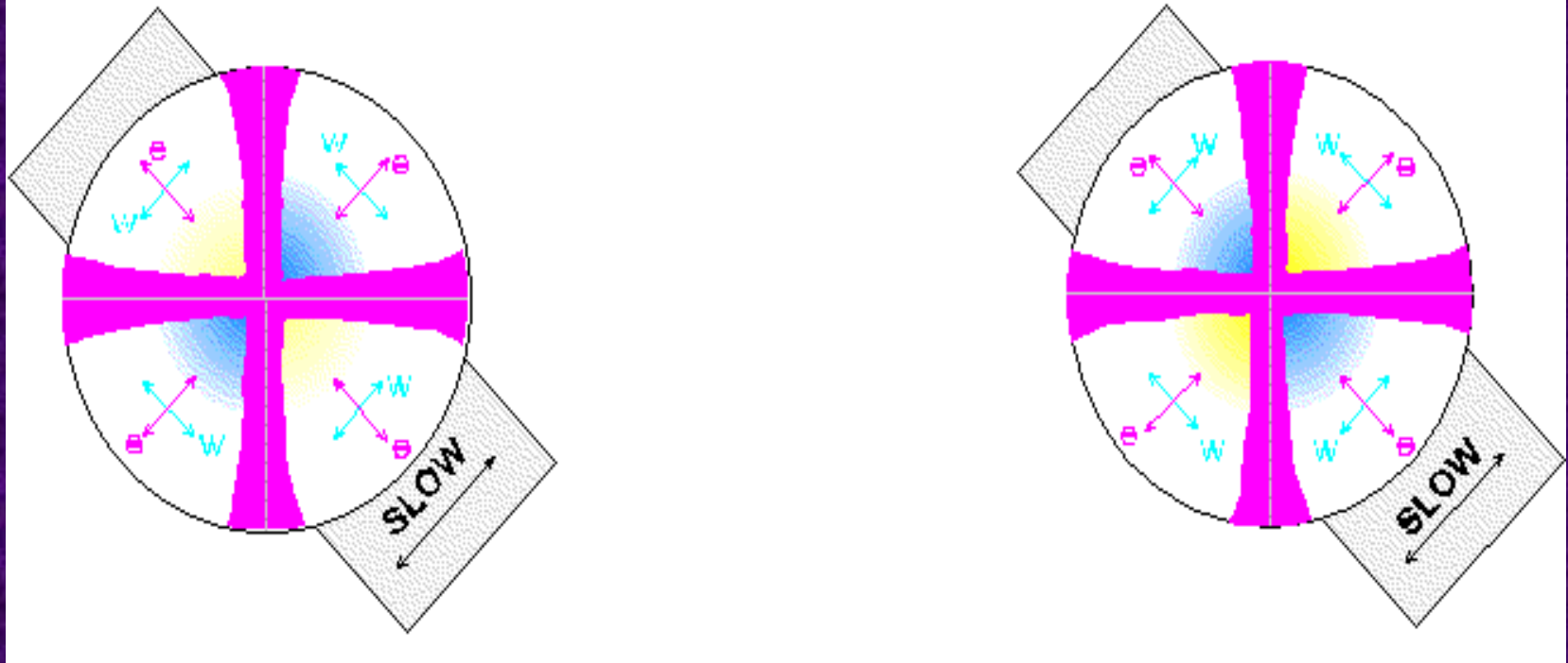
(a) Mineral de birrefringencia moderada: turmalina

(b) Mineral de alta birrefringencia: calcita, dolomita, circón, titanita

# Determinación del signo óptico

## Minerales de baja birrefringencia

### Placa de Yeso



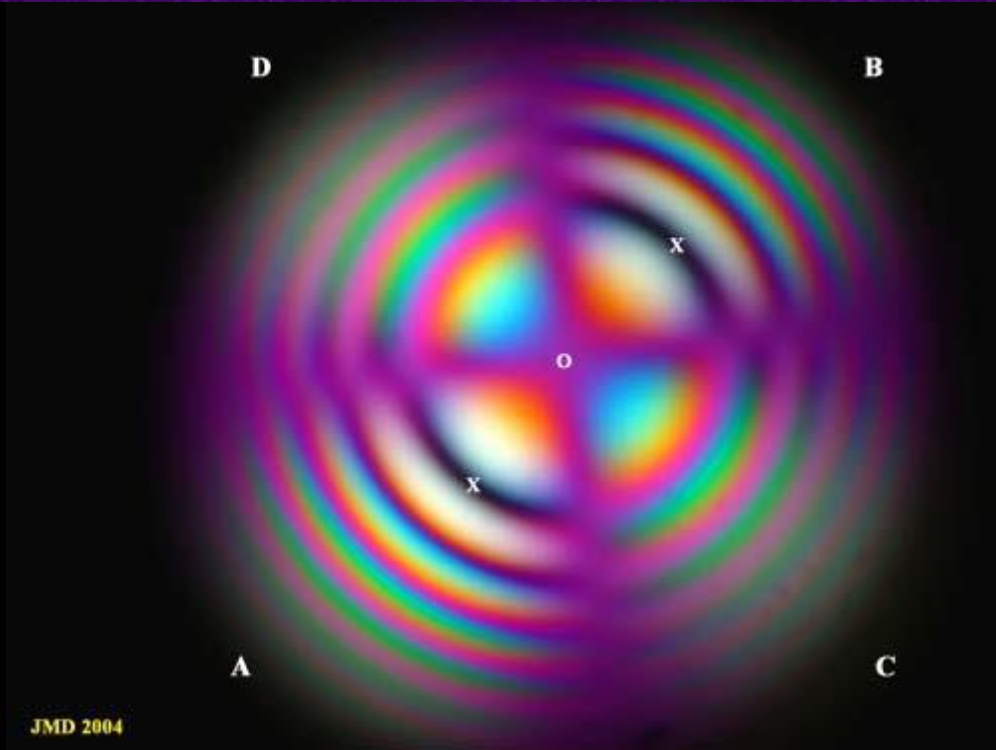
Positivo: epsilon es el rayo lento → epsilon + gamma del yeso  
**adición en cuadrantes NE y SO**

Negativo: epsilon es el rayo rápido → omega + gamma del yeso  
**adición en cuadrantes NO y SE**

Calcita: mineral uniaxial de elevada birrefringencia

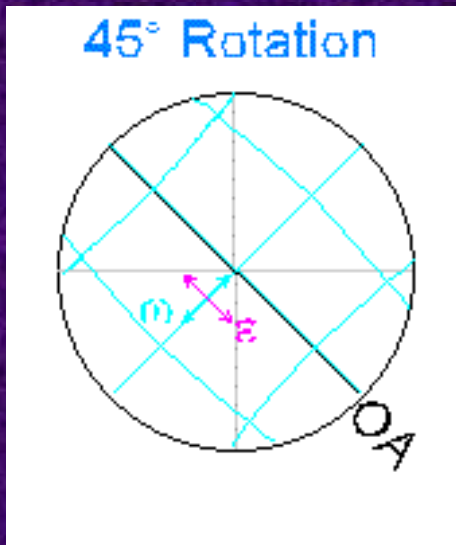
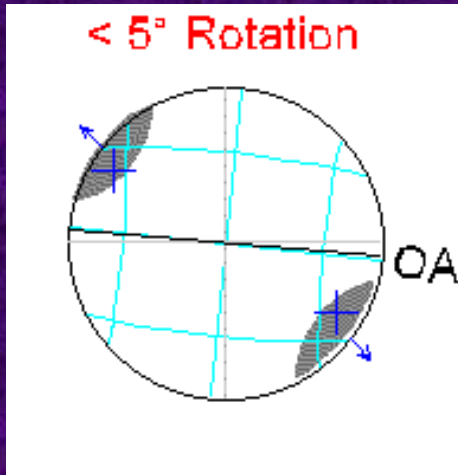


Sin placa compensadora



Con placa compensadora

De qué signo es el mineral?

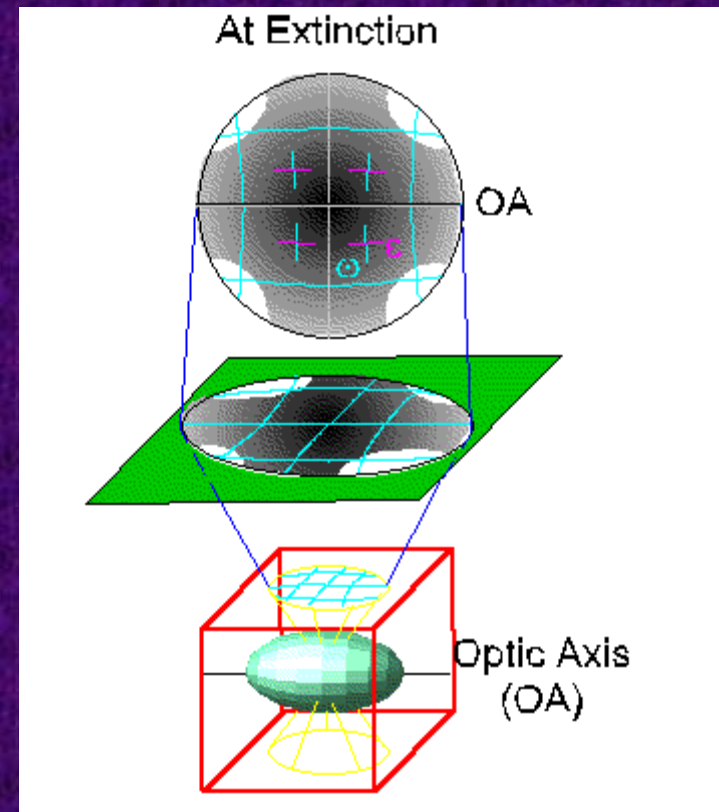


La figura se desarma  
en dirección al eje  
óptico

## Figura de flash uniaxial

$\varepsilon$  y  $\omega$  yacen sobre la platina  
Birrefringencia máxima

**Cruz de brazos anchos**



OJO: No sirve para definir el carácter óptico !!