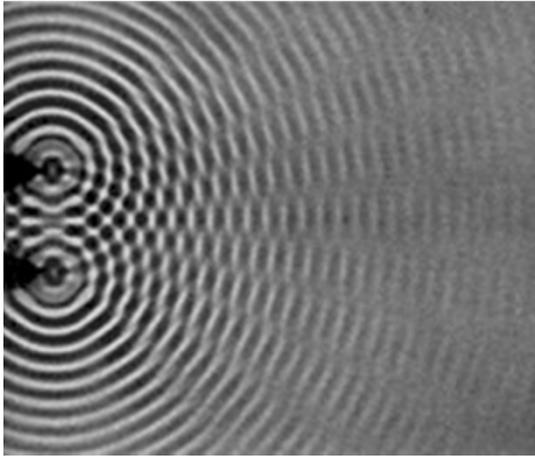


INTERFERENCIA



$$d \sin \theta = m \lambda$$

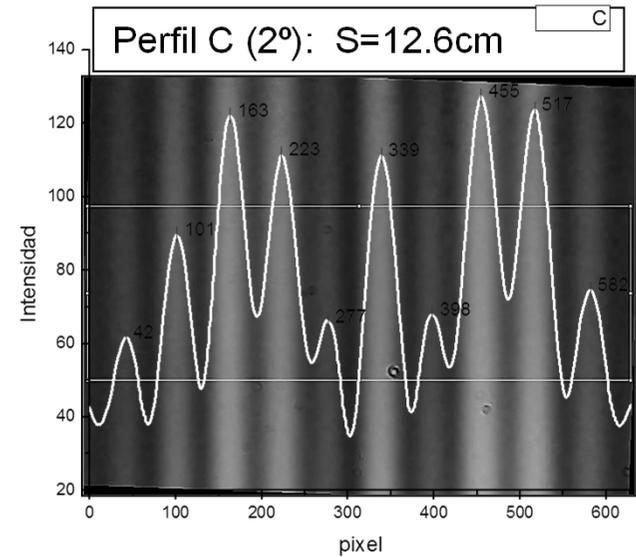
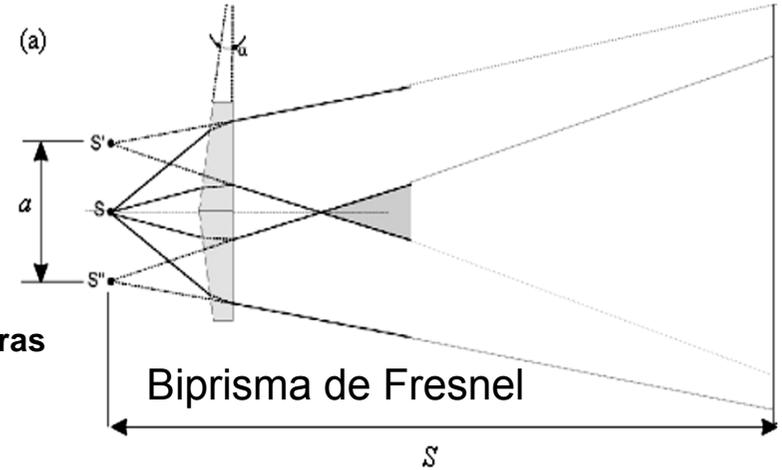
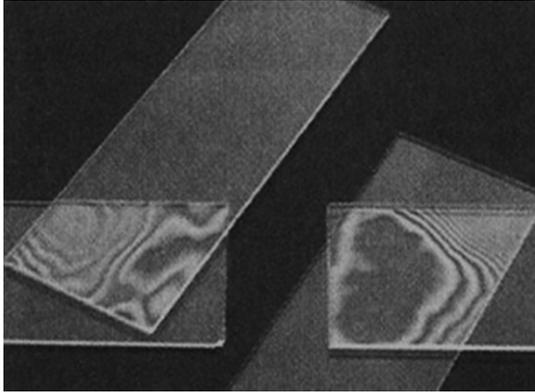
Interferencia constructiva, dos ranuras

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

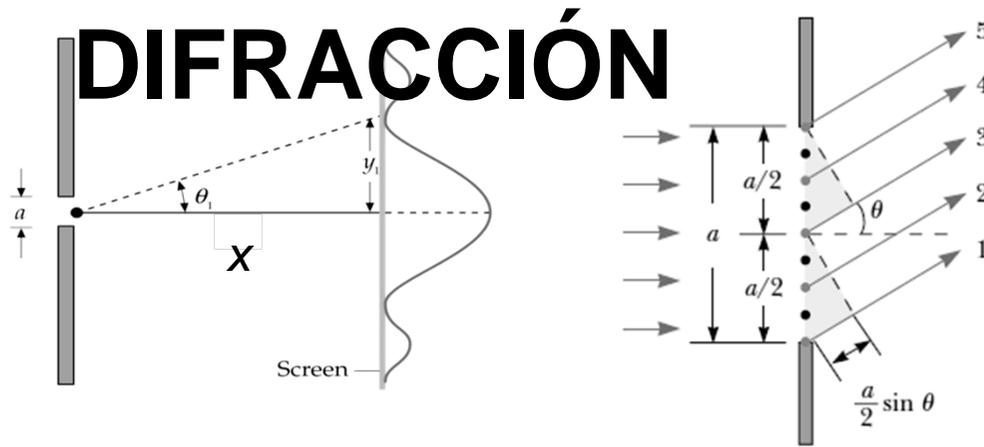
Interferencia destructiva, dos ranuras

$$y_m = R \frac{m \lambda}{d}$$

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \delta$$



DIFRACCIÓN

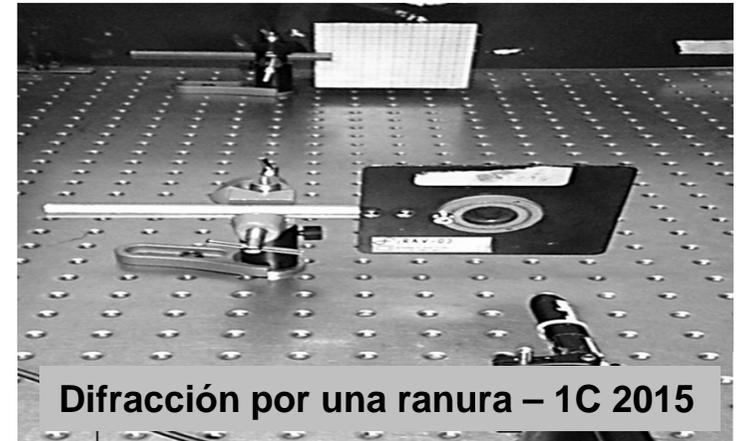
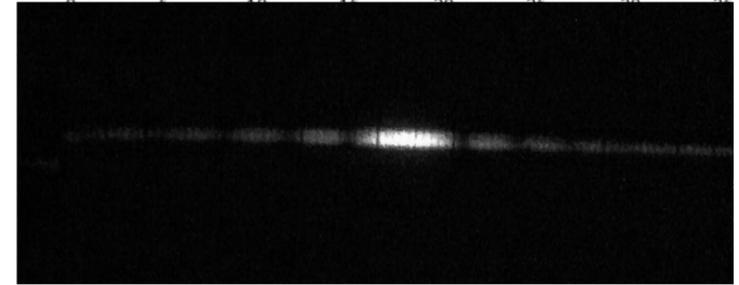
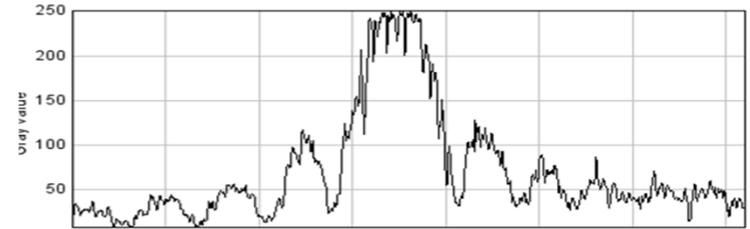


$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

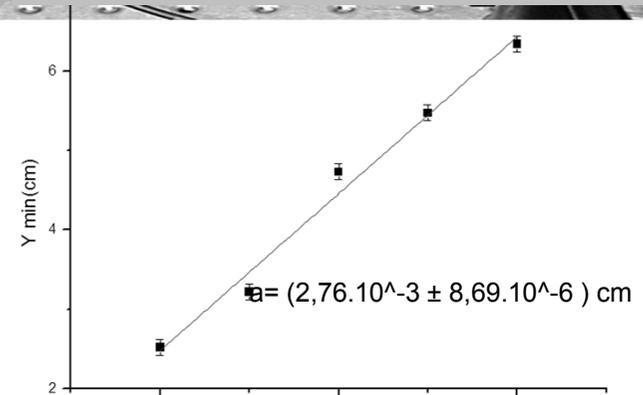
$$y_m = x \frac{m \lambda}{a} \quad (\text{para } y_m \ll x)$$

$$I = I_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

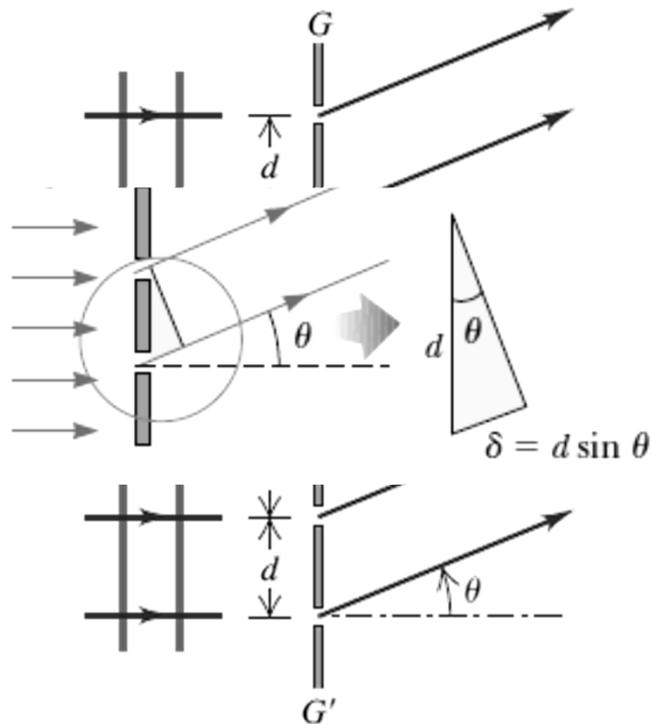


Difracción por una ranura – 1C 2015



| | Slope | Value | Standard Error |
|---|-------|--------|----------------|
| y | | 0,9878 | 0,03162 |

Red de difracción

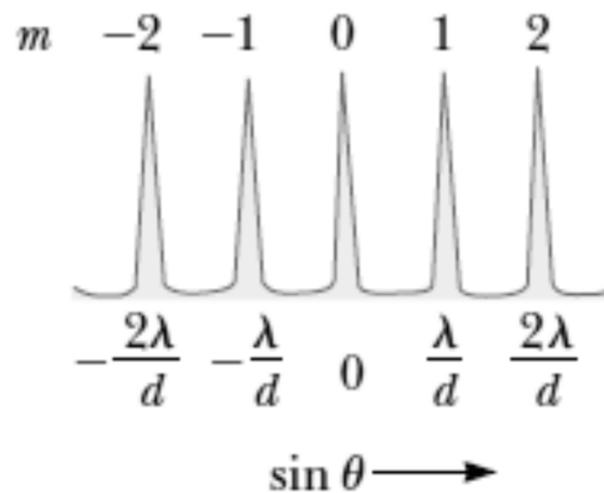
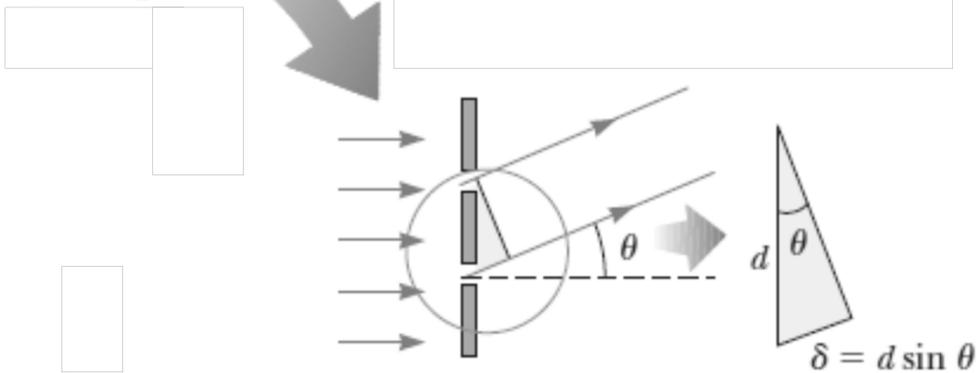
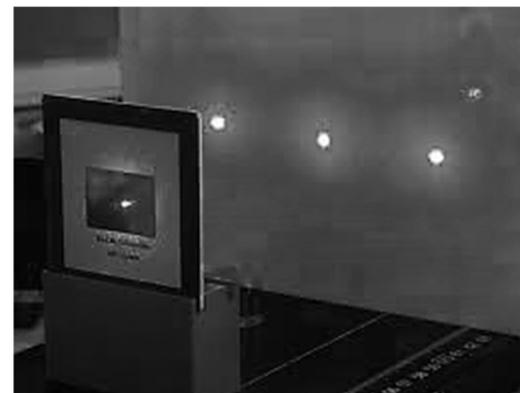
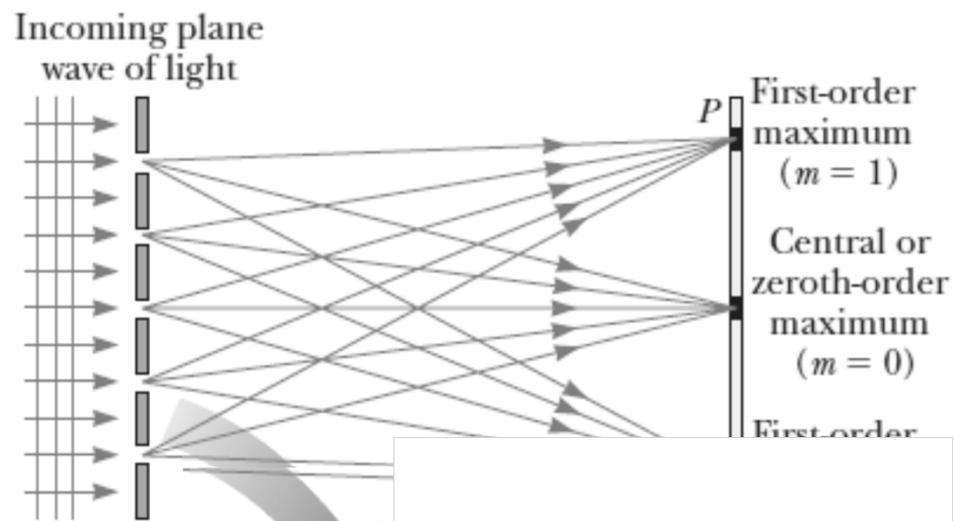


- **red de difracción**, serie de rendijas paralelas - **red de transmisión**
- a , ancho de la ranura
- d , distancia entre las ranuras- *espaciado de red*

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (\text{m\u00e1ximos de intensidad, ranuras m\u00faltiples})$$

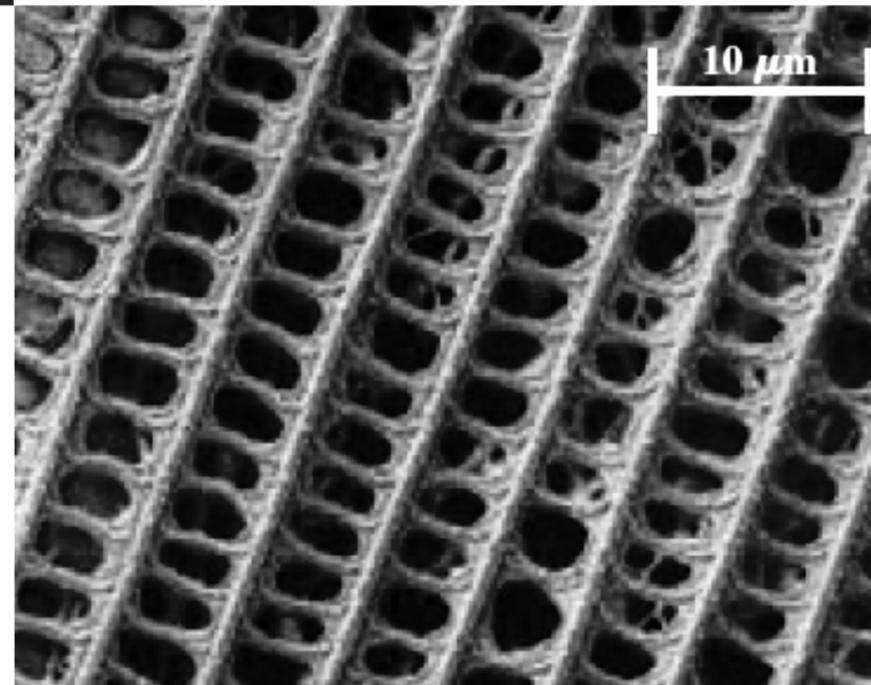
d , rec\u00edproco del n\u00famero de rendijas por unidad de longitud

transmisi\u00f3n



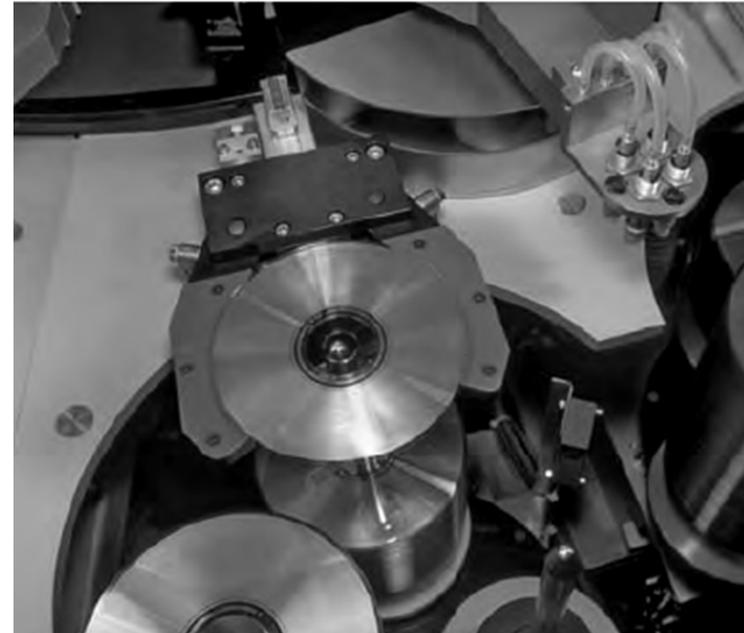


- **red de reflexión**, serie de crestas o surcos igualmente espaciados en una pantalla reflectora
- reflexión especular
- intensidad máxima, ángulos donde la diferencia de fase es un múltiplo entero de 2π

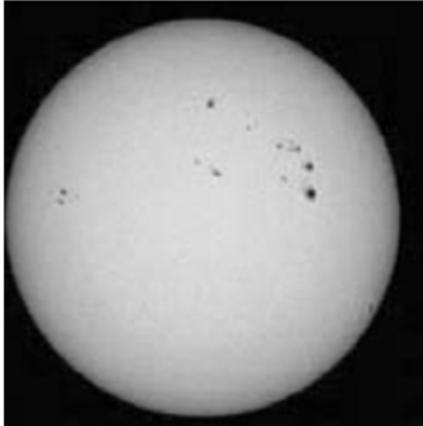
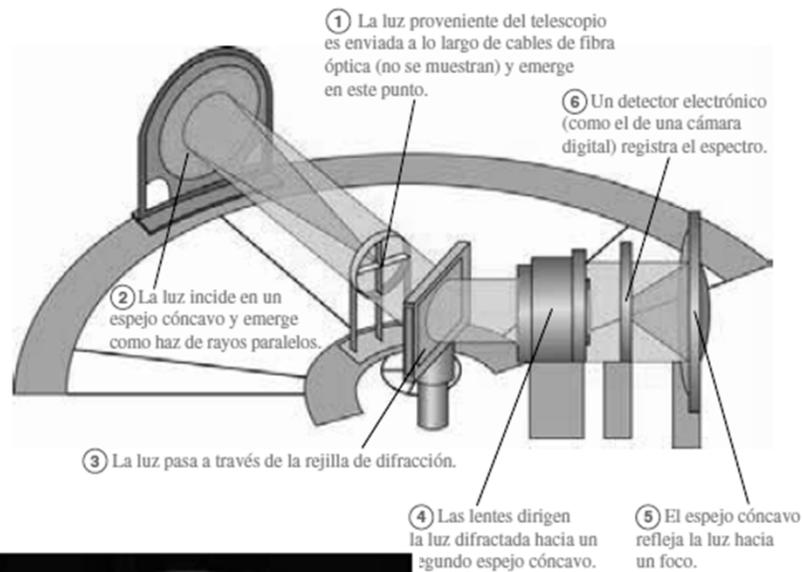


La luz reflejada de la superficie de un CD es multicolor. Los colores y sus intensidades dependen de la orientación relativa con respecto a nuestro ojo y relativa también a la fuente.

- la separación entre pistas en el disco es del orden de $1\ \mu\text{m}$
- interferencia constructiva
- longitud de onda

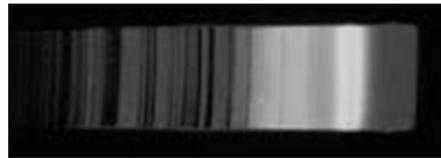


Espectrógrafos de red



Fotografía de luz visible del Sol.

Una rejilla de difracción dispersa la luz solar para formar un espectro. Ciertas longitudes de onda específicas son absorbidas cuando la luz solar pasa a través de la atmósfera del Sol, dejando líneas oscuras en el espectro.



En espectroscopía suele ser importante distinguir longitudes de onda que difieren muy poco. La diferencia mínima de longitud de onda $\Delta\lambda$ que un espectrógrafo es capaz de distinguir se describe mediante el **poder de resolución cromático** R , el cual se define como

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm$$

- cuanto **mayor** sea el número de rendijas N , *mejor será la resolución*
- cuanto **más alto** sea el orden m del máximo de patrón de difracción que se utilice, *mejor será la resolución*.

El máximo de orden m -ésimo se presenta cuando la diferencia de fase ϕ correspondiente a ranuras adyacentes es

$$\phi = 2\pi m$$

El primer mínimo al lado de ese máximo aparece cuando

$$\phi = 2\pi m + 2\pi/N$$

La diferencia de fase también está dada por

$$\phi = (2\pi d \sin \theta) / \lambda$$

el intervalo angular $d\theta$ que corresponde a un pequeño incremento $d\phi$ de desplazamiento de fase se obtiene a partir de la diferencial de esta ecuación:

$$d\phi = \frac{2\pi d \cos \theta d\theta}{\lambda}$$

Cuando $d\phi = 2\pi/N$, esto corresponde al intervalo angular $d\theta$ entre un máximo y el primer mínimo adyacente. Por lo tanto,

$$\frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi d \cos \theta d\theta}{\lambda} \quad \text{o bien} \quad d \cos \theta d\theta = \frac{\lambda}{N}$$

Ahora necesitamos hallar la separación angular $d\theta$ entre máximos de dos longitudes de onda levemente distintas.

$$d \cos \theta d\theta = m d\lambda$$

De acuerdo con nuestro criterio, se alcanza el límite o la resolución cuando estas dos separaciones angulares son iguales. Igualando las dos expresiones

$$\frac{\lambda}{N} = m d\lambda \quad \text{y} \quad \frac{\lambda}{d\lambda} = Nm$$

Si $\Delta\lambda$ es pequeña,

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm$$

(poder de resolución cromático)

Difracción de rayos X

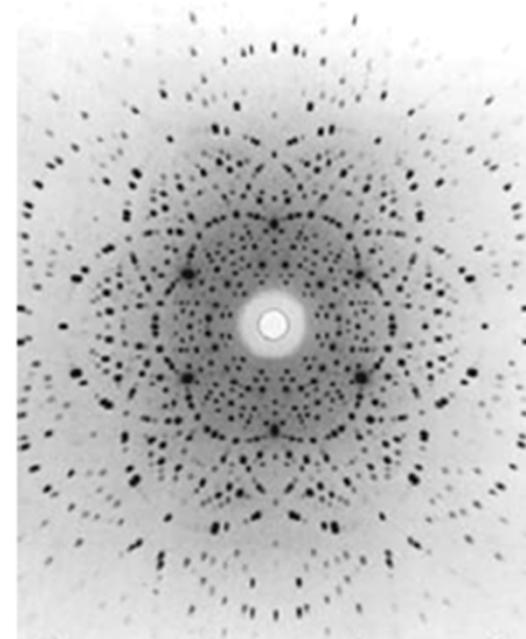
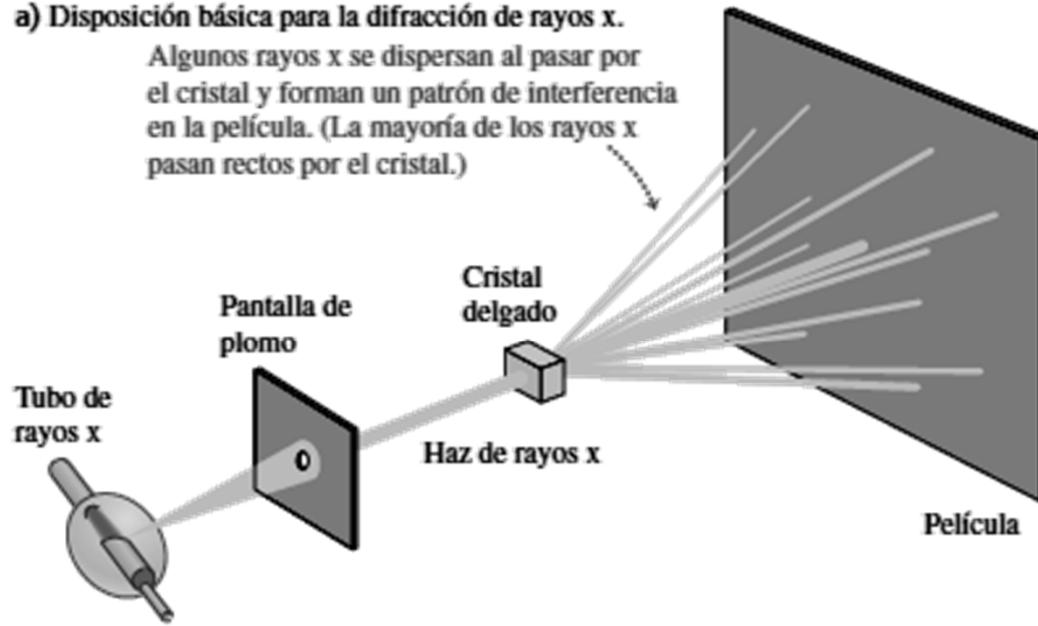
- los rayos X fueron descubiertos por Wilhelm Röntgen en 1895
- ondas electromagnéticas del orden de 10^{-10} m
- en un sólido cristalino los átomos están dispuestos en un patrón de forma regular
- en 1912, Max von Laue propuso que un cristal serviría como red de difracción 3D para los rayos X
- en 1912, Friederich, Knipping y von Laue realizaron experimentos de difracción de rayos X
- *los rayos X dispersados formaron un patrón de interferencia*
- *los rayos X son ondas*
- *los átomos están dispuestos conforme a una distribución regular*

Wilhelm Röntgen (1845 – 1923)

Max von Laue (1879 – 1960)

a) Disposición básica para la difracción de rayos x.

Algunos rayos x se dispersan al pasar por el cristal y forman un patrón de interferencia en la película. (La mayoría de los rayos x pasan rectos por el cristal.)



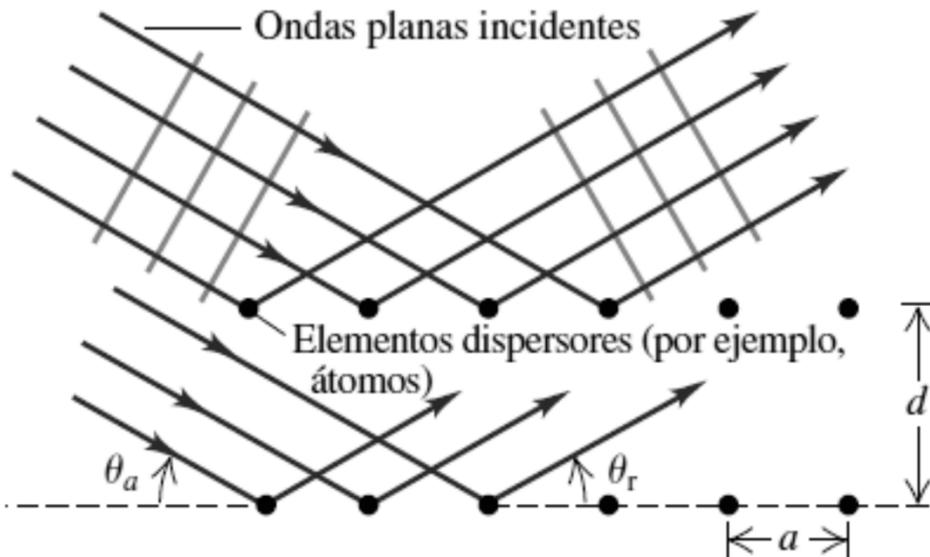
Used with permission of Eastman Kodak Company



© I. Andersson Oxford Molecular Biophysics Laboratory/Photo Researchers, Inc.

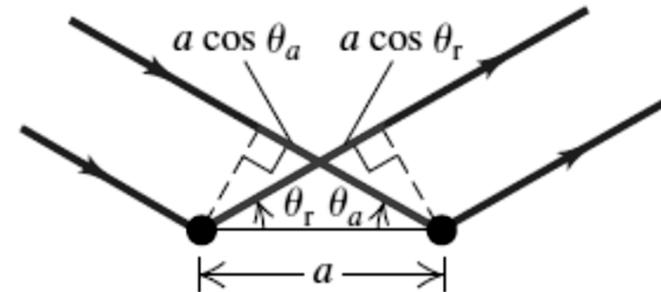
Modelo bidimensional de dispersión con respecto a una formación rectangular. Observe que los ángulos en b) se miden desde la *superficie* del cristal no desde su normal.

a) Dispersión de ondas desde una formación rectangular



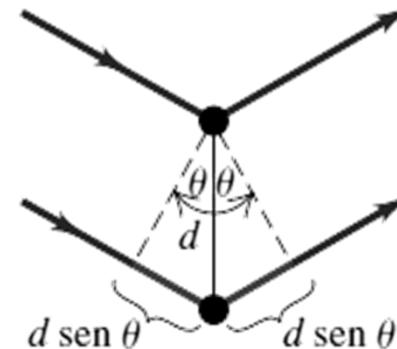
b) Dispersión desde los átomos adyacentes en una fila

La interferencia desde átomos adyacentes de una fila es constructiva cuando las longitudes del trayecto $a \cos \theta_a$ y $a \cos \theta_r$ son iguales; así que el ángulo de incidencia θ_a es igual al ángulo de reflexión (dispersión) θ_r .



c) Dispersión desde átomos en filas adyacentes

La interferencia desde átomos en filas adyacentes es constructiva cuando la diferencia de trayecto $2d \sin \theta$ es igual a un número entero de longitudes de onda, como en la ecuación (36.16).

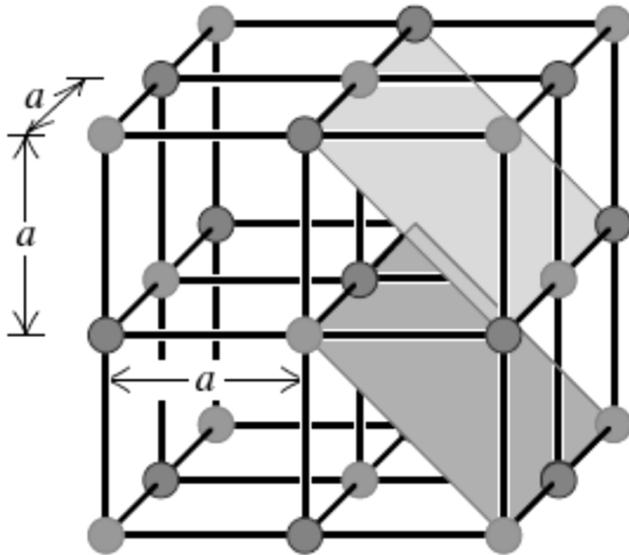


Podemos extender este análisis a una formación tridimensional considerando *planos* de elementos dispersores en vez de *filas*.

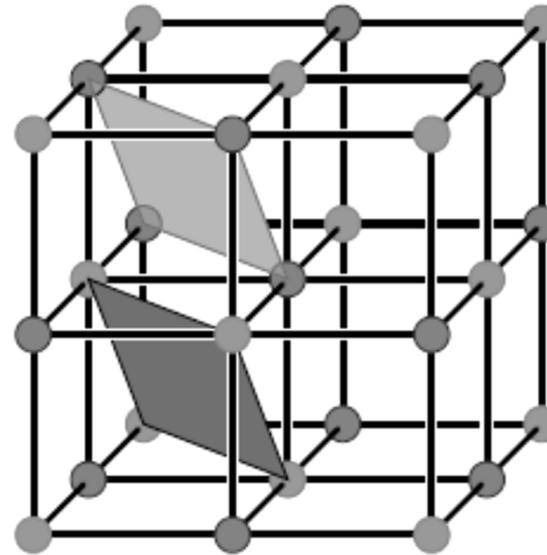
- cristal cúbico y dos familias diferentes de planos cristalinos. Hay además tres conjuntos de planos paralelos a las caras del cubo, con separación a .
- existen muchos conjuntos distintos de planos paralelos,
- también son muchos los valores de d y los conjuntos de ángulos que producen interferencia constructiva en toda la red cristalina.

- **reflexión de Bragg**

a) La separación de los planos es $d = a/\sqrt{2}$.

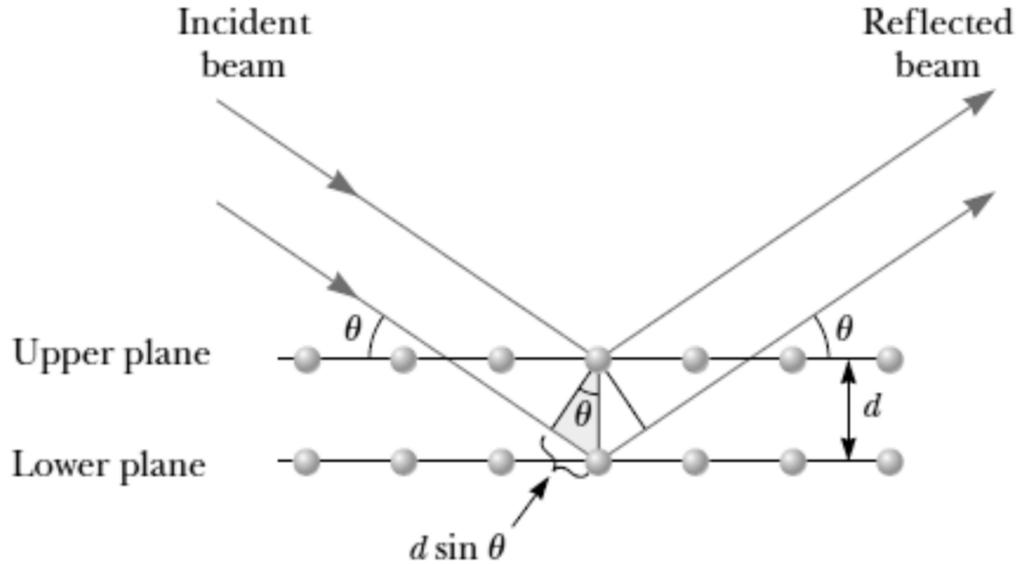
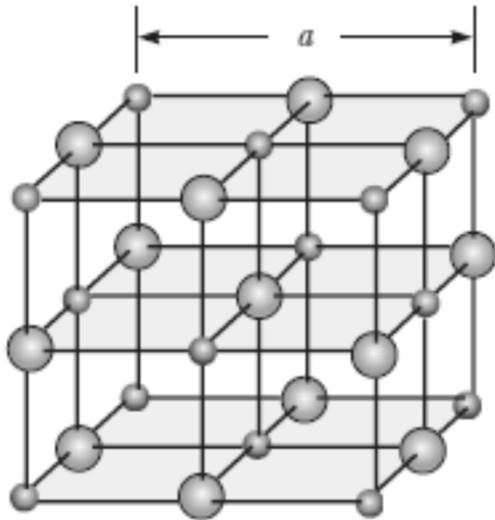


b) La separación de los planos es $d = a/\sqrt{3}$.



$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

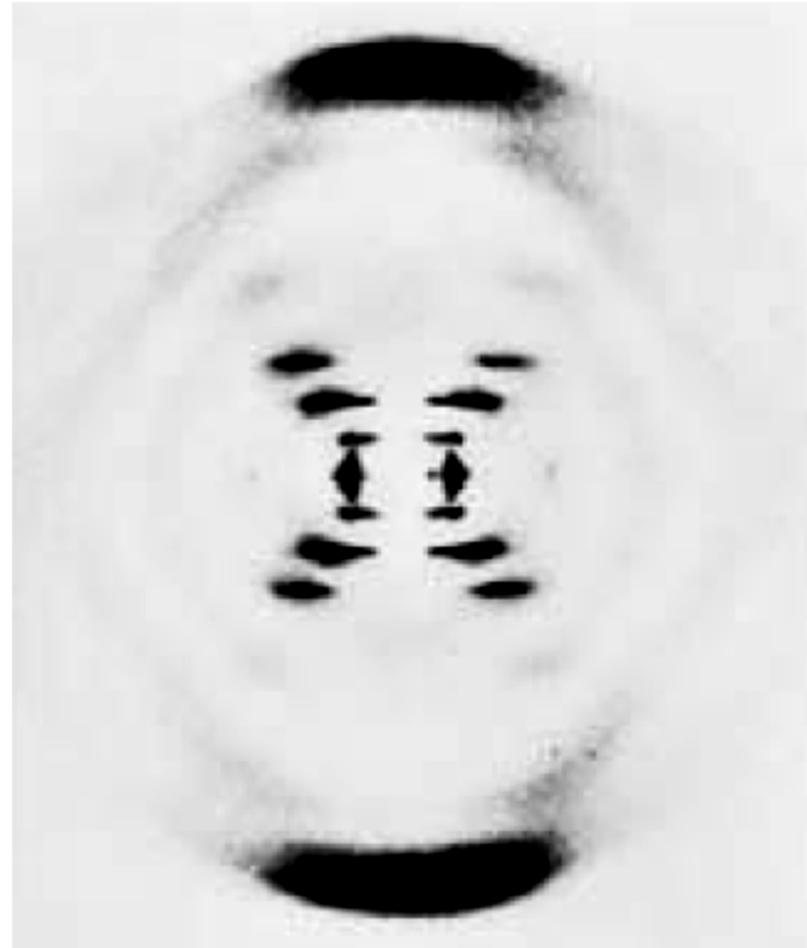
(condición de Bragg para que haya interferencia constructiva desde una formación)



- el ángulo de incidencia debe ser igual al ángulo de dispersión
- la diferencia de trayecto correspondiente a filas adyacentes debe ser igual a $m\lambda$, donde m es un entero.

La difracción de rayos x también desempeña un importante papel en el estudio de estructuras de líquidos y de moléculas orgánicas.

- Rosalind Franklin obtuvo esta revolucionaria imagen de difracción de rayos x del DNA
- las bandas oscuras dispuestas en cruz suministraron la primera prueba de la estructura helicoidal de la molécula de DNA

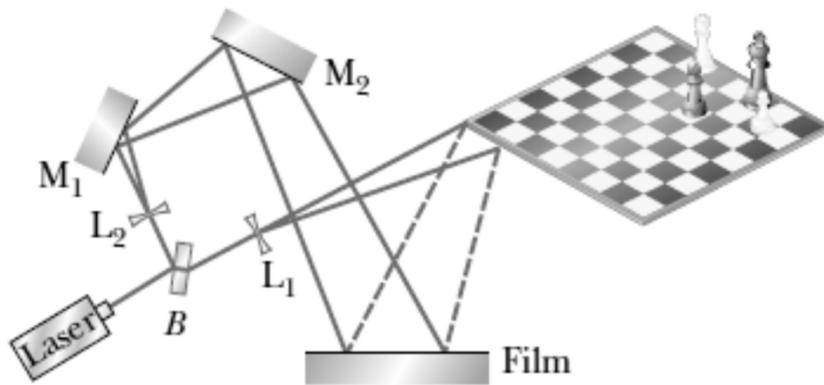


An X-ray diffraction photograph of a vertically oriented DNA fiber, taken by Rosalind Franklin.

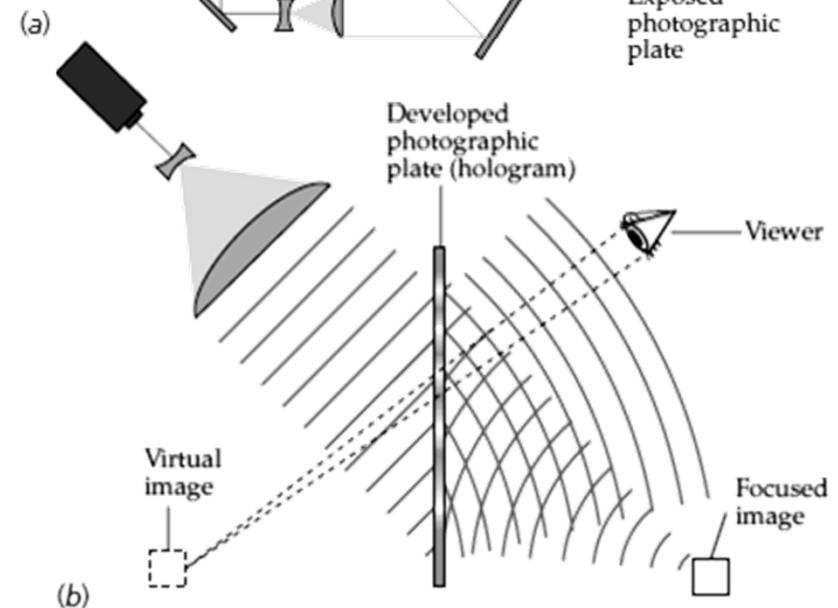
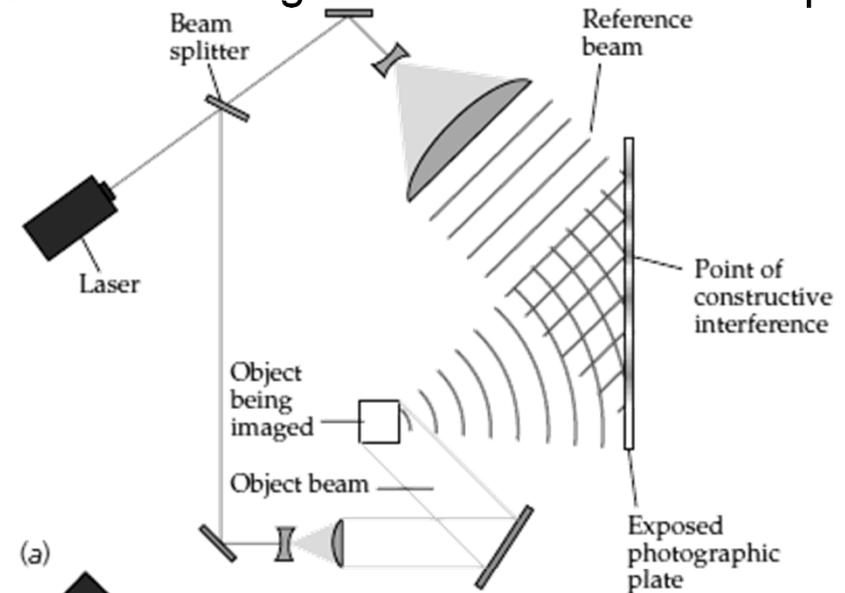
Rosalind Elsie Franklin (1920-1958), química y cristalógrafa inglesa

Holografía

La **holografía** es una técnica para registrar y reproducir una imagen de un objeto por medio de efectos de interferencia. La física de la holografía fue desarrollada por Dennis Gabor en 1948.



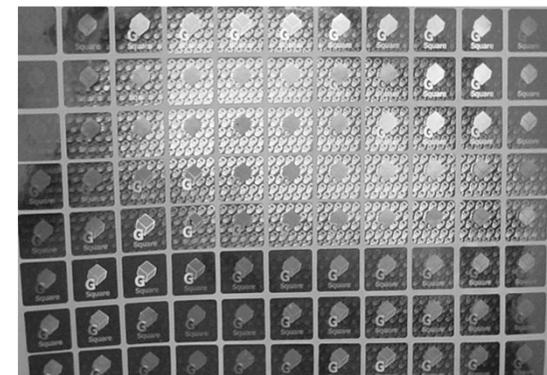
- haz de referencia
- haz procedente del objeto
- película fotográfica
- imagen 3D



Problemas prácticos

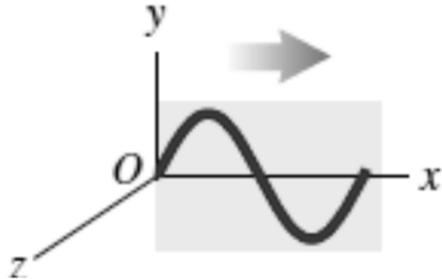
la luz debe ser coherente

estabilidad mecánica extrema

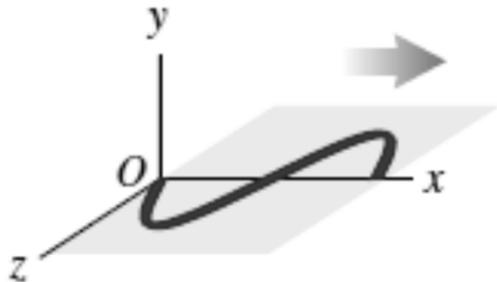


Polarización

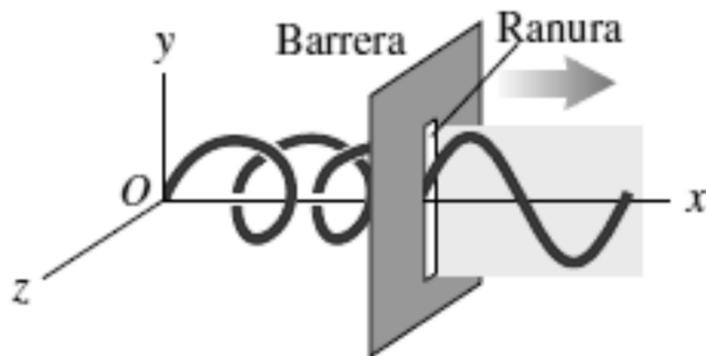
La *polarización* es una característica de todas las ondas transversales



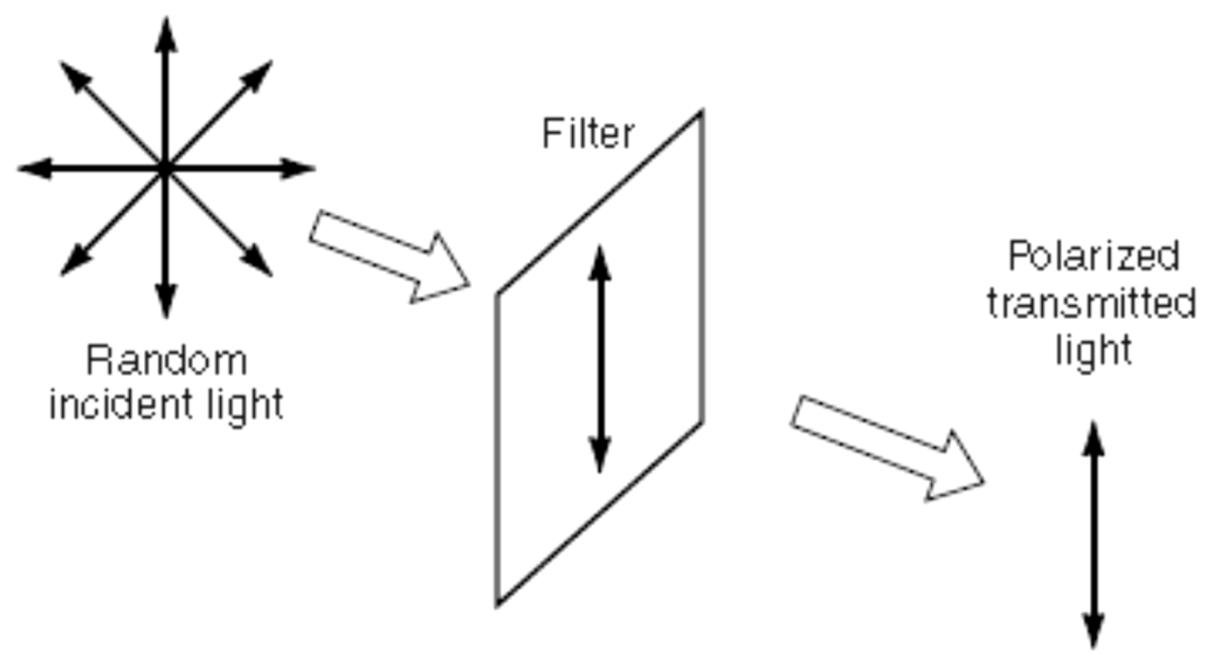
- onda transversal linealmente polarizada en la dirección y



- onda transversal linealmente polarizada en la dirección z

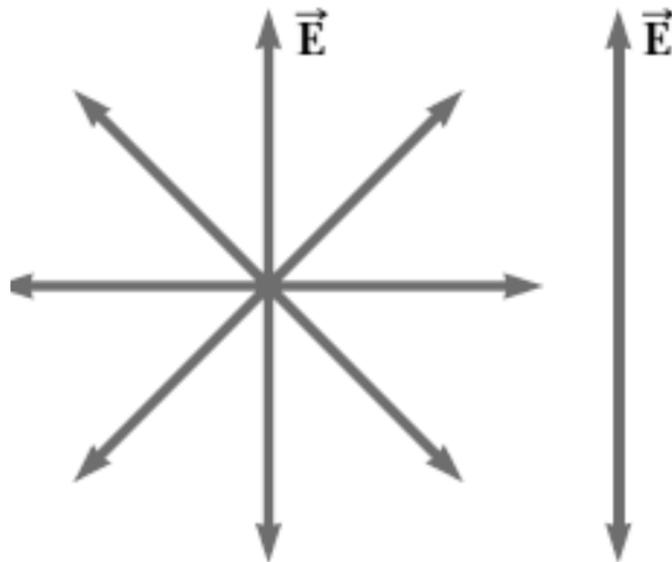


- **filtro polarizador** deja pasar solamente los componentes polarizados en la dirección y





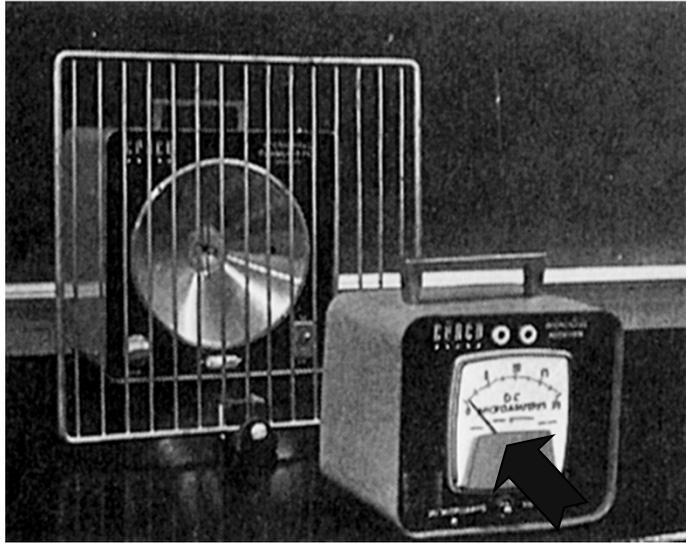
▪ las ondas emitidas por un transmisor de radio, por lo general, están linealmente polarizadas.



▪ **luz no polarizada** o *luz natural*, luz emitida es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles

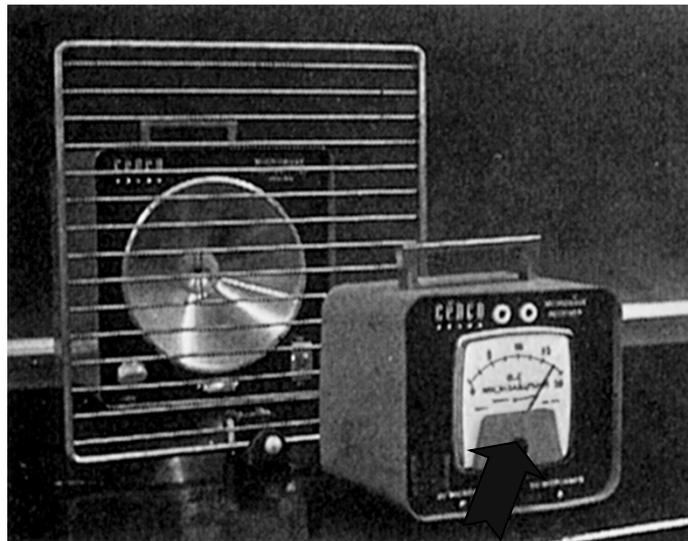
Demostración de la polarización de microondas.

Puede demostrarse la polarización de las ondas electromagnéticas mediante microondas, que tienen longitudes de onda del orden del centímetro



- *la antena dipolar es vertical*
- *campo eléctrico de las microondas es vertical*

Ondas no se transmiten



- *la antena dipolar es horizontal*
- *campo eléctrico de las microondas es vertical*

Ondas se transmiten

Existen cuatro fenómenos que producen ondas electromagnéticas polarizadas a partir de ondas no polarizadas

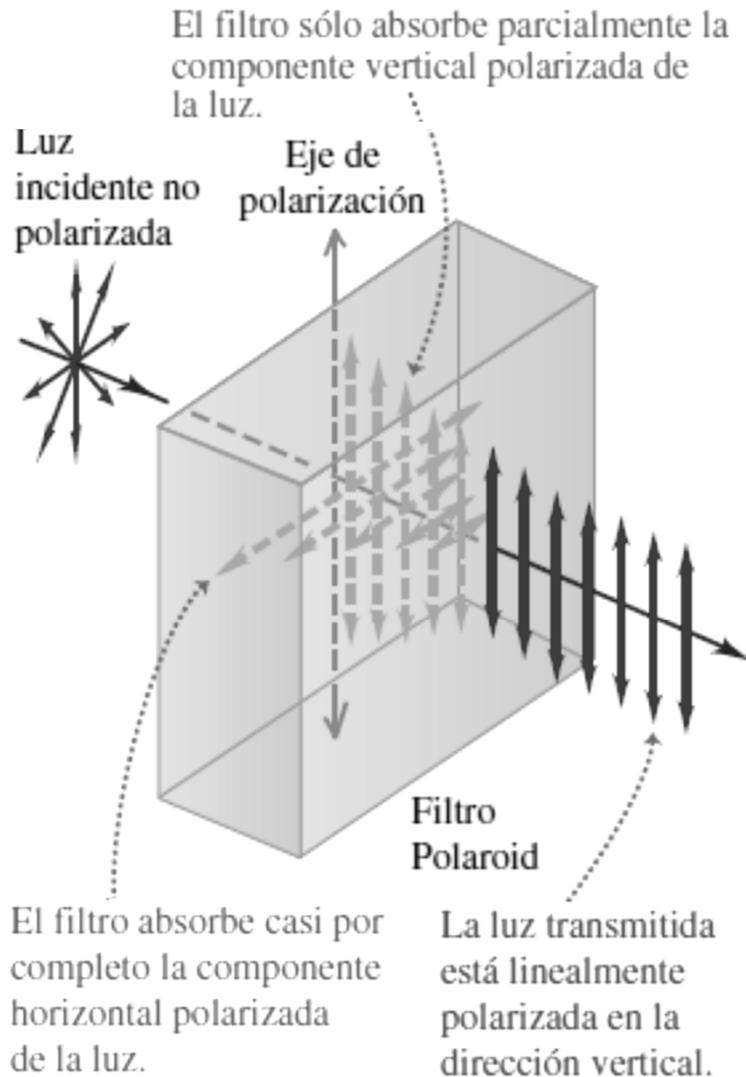
1. absorción

2. reflexión

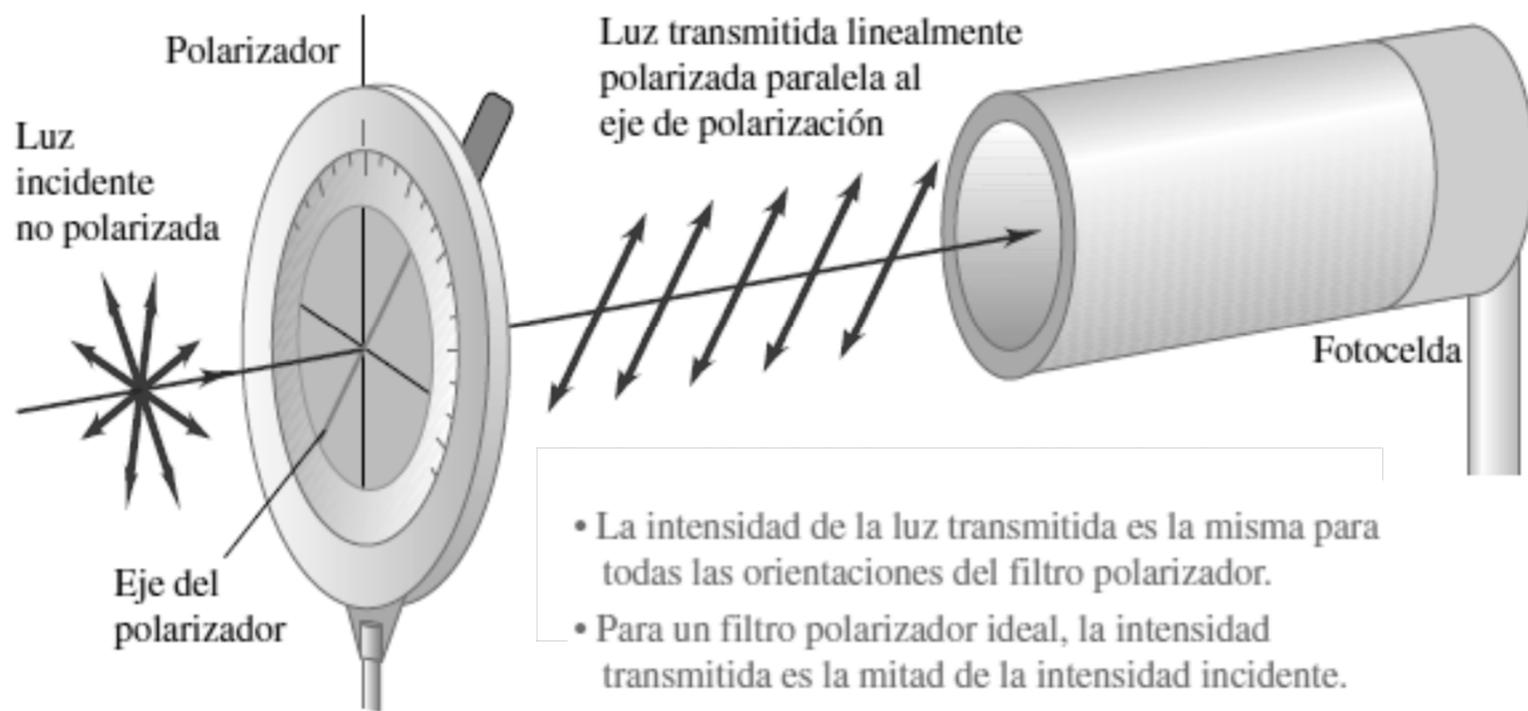
3. dispersión o *scattering*

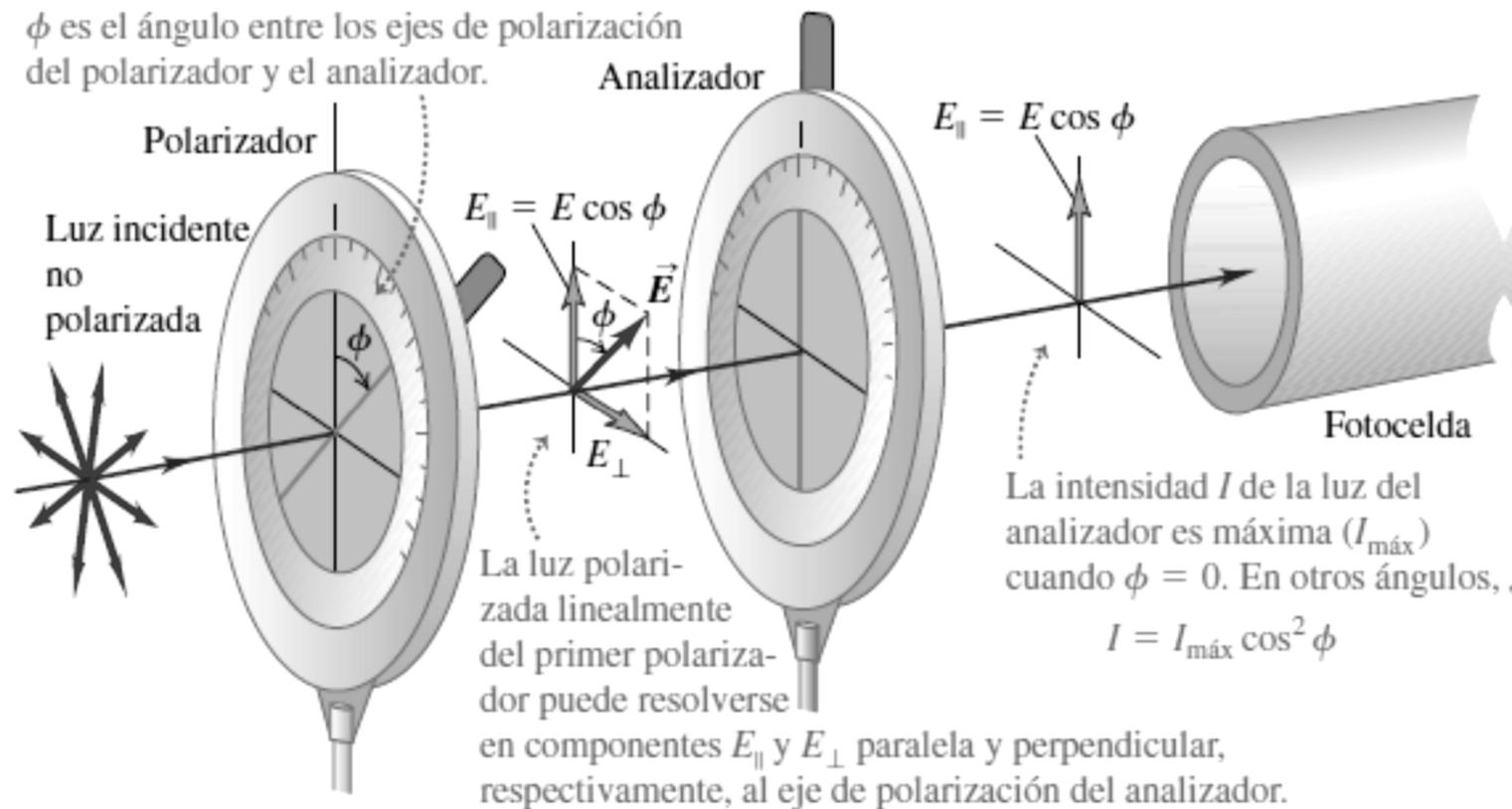
4. birrefringencia

Polarización por absorción



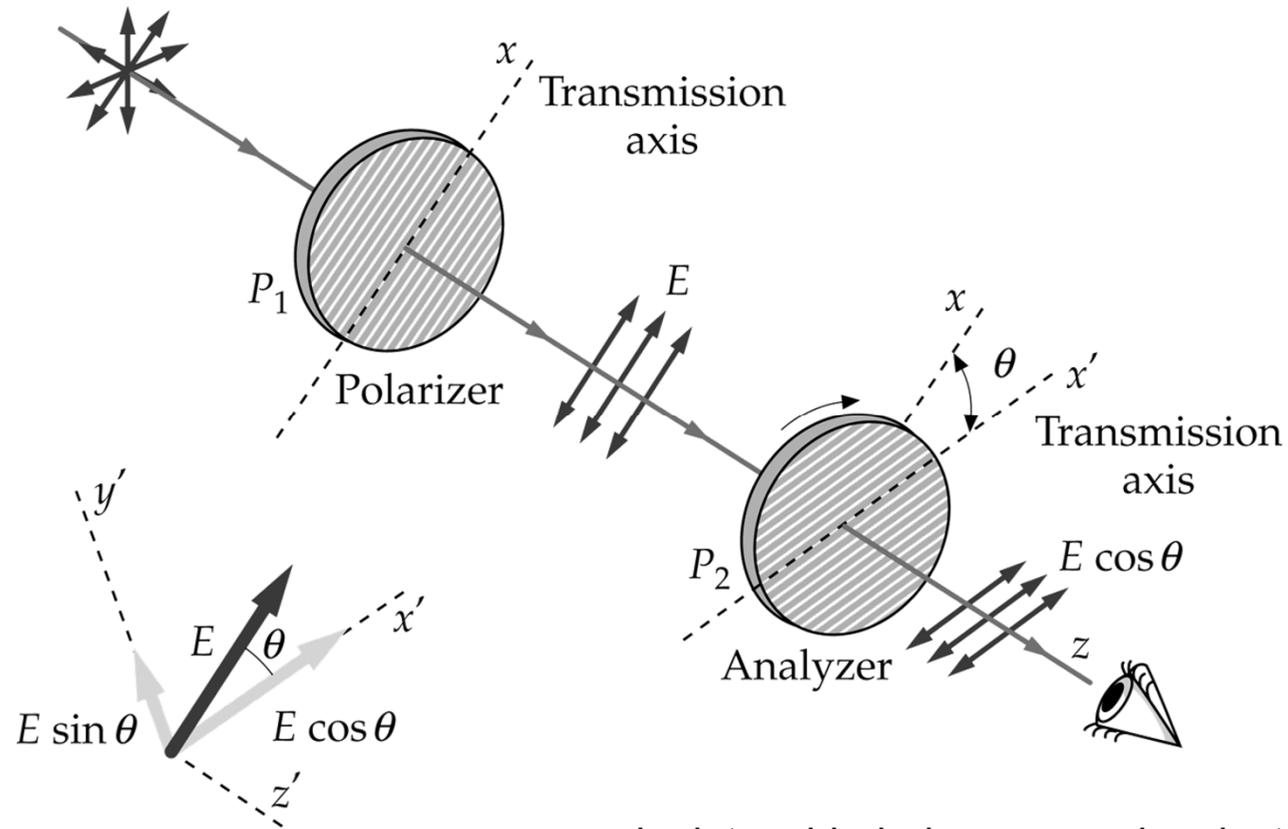
- algunos cristales absorben y transmiten luz de forma diferente dependiendo de la polarización de la luz
- se pueden usar para obtener luz linealmente polarizada
- filtro polarizador más común para la luz visible, **Polaroid** (1938, E. H Land)
- transmite el 80% o más de la intensidad de una onda que esté polarizada en forma paralela a cierto eje en el material, llamado *eje de polarización*, pero sólo el 1% o menos de las ondas polarizadas perpendiculares a ese eje.





Un analizador ideal transmite sólo la componente del campo eléctrico paralela a su dirección de transmisión.

¿Qué pasa cuando la luz linealmente polarizada que sale de un polarizador pasa a través de un segundo polarizador?



- la intensidad de una onda electromagnética es proporcional al *cuadrado* de la amplitud de la onda

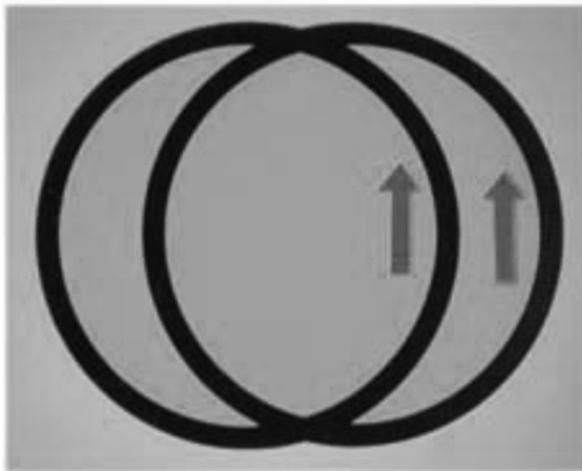
La ley de Malus sólo se aplica si la luz incidente que pasa a través del analizador ya está linealmente polarizada.

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

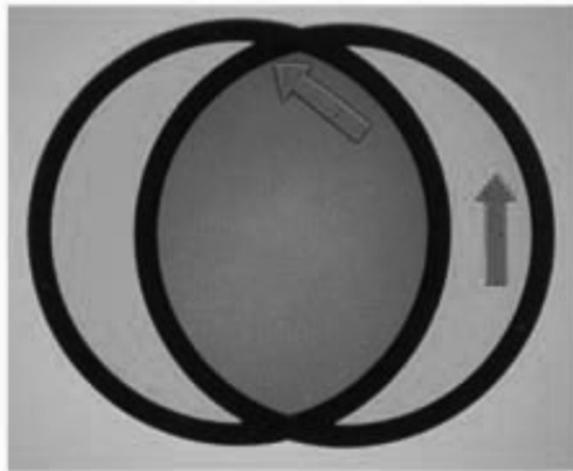
Ley de Malus

E. L. Malus (1775–1812)

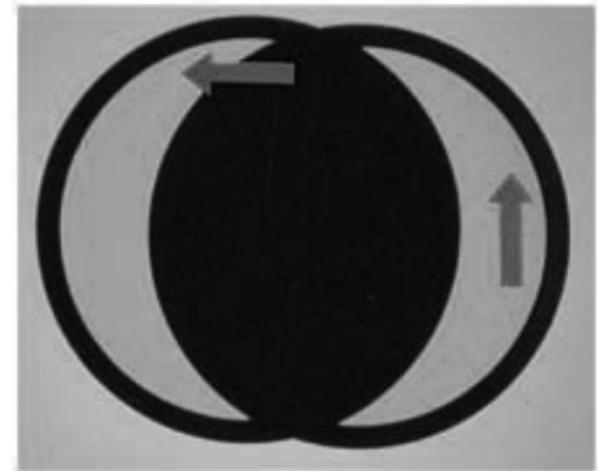
La intensidad de la luz transmitida a través de dos polarizadores depende de la orientación relativa de sus ejes de transmisión.



0°



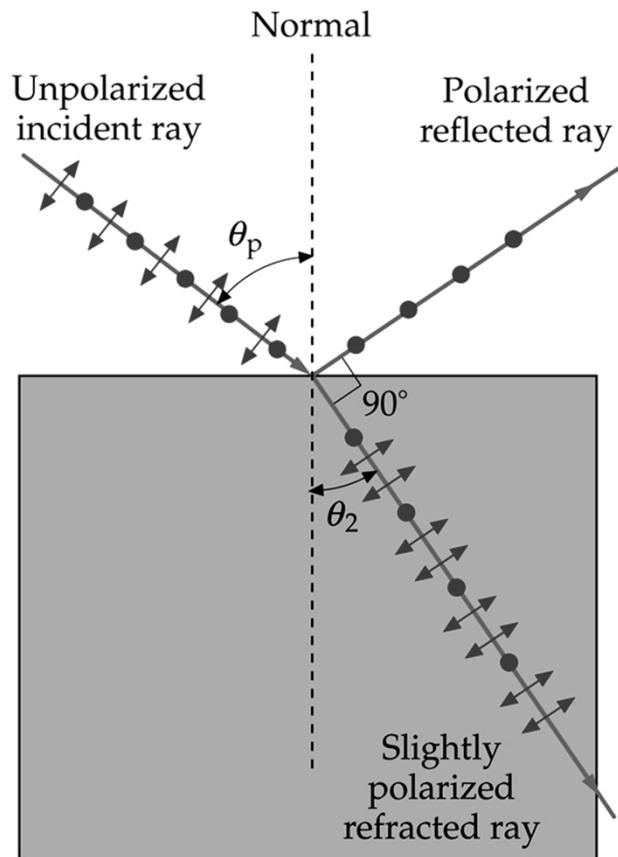
45°



90°

Polarización por reflexión

La luz no polarizada se puede polarizar, ya sea en forma parcial o total, por *reflexión*.



- la onda incidente no está polarizada
- tiene componentes del campo eléctrico paralelos al plano de incidencia (flechas)
- componentes perpendiculares (puntos) al plano de incidencia

Si la incidencia se realiza con el ángulo de polarización,

- la onda reflejada está completamente polarizada
- campo eléctrico perpendicular al p.i.

Ley de Snell,

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2$$

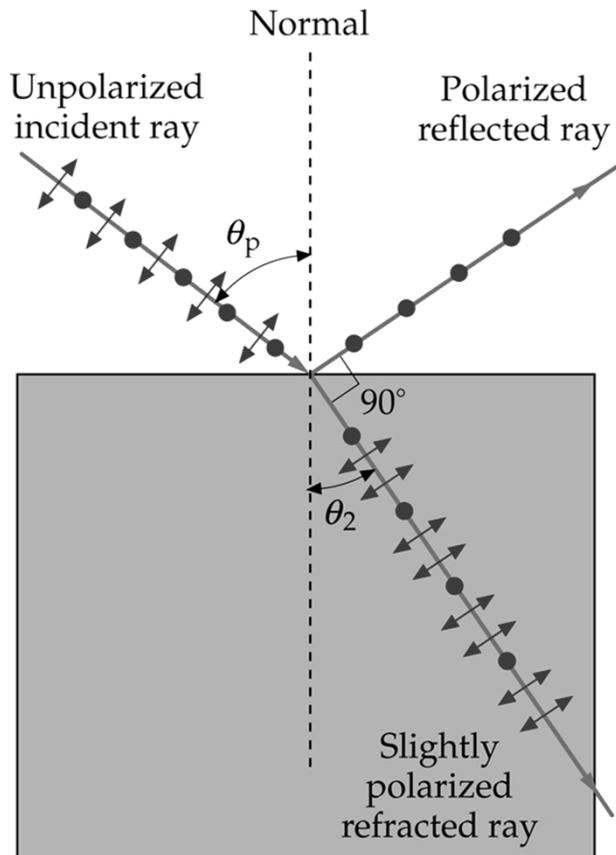
$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$$

Entonces,

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin(90^\circ - \theta_p) = n_2 \cos \theta_p$$

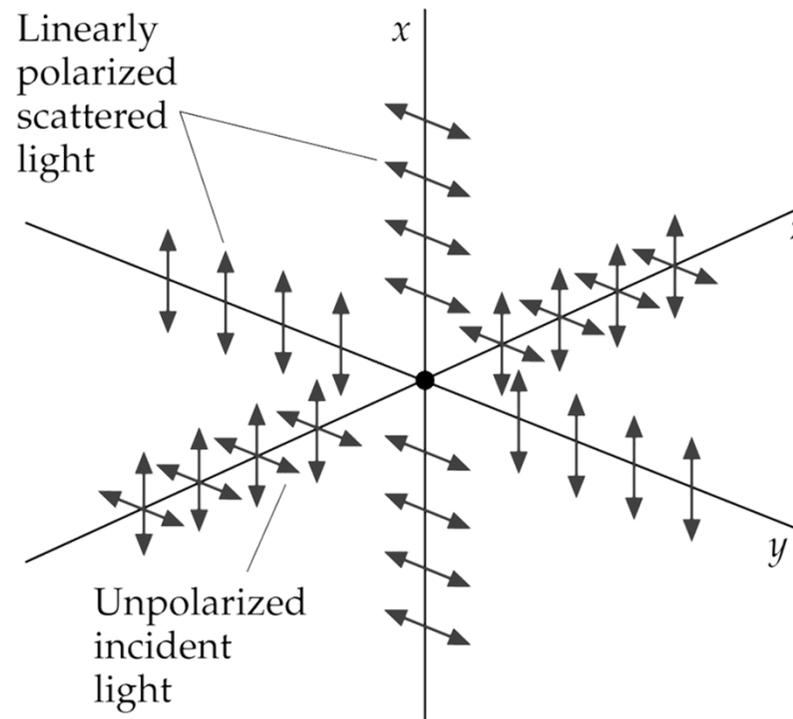
$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

ley de Brewster



Polarización por dispersión o *scattering*

El fenómeno de absorción e irradiación subsiguiente se denomina **dispersión** o *scattering*.

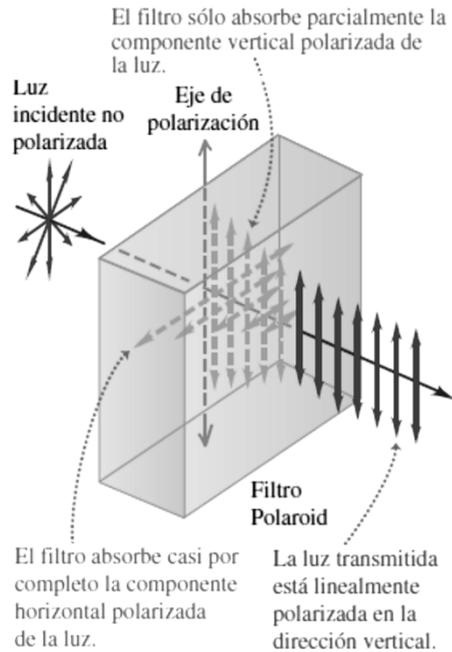


La luz no polarizada que se propaga en una dirección z incide sobre un centro de dispersión situado en el origen. La luz dispersada en el plano $z=0$ a lo largo de la dirección x está polarizada en la dirección y , mientras en la dispersada en la dirección y está polarizada en la dirección x .

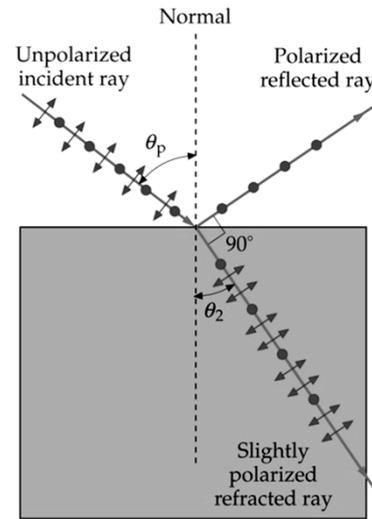


- conforme el haz original de luz solar pasa a través de la atmósfera, su intensidad disminuye a medida que su energía pasa a la luz dispersa.
- intensidad para los dos extremos del espectro visible es $(700 \text{ nm}/400 \text{ nm})^4 = 9.4$
- en términos generales, *la luz dispersada contiene nueve veces más luz azul que roja, y por eso el **cielo es azul**.*
- **las nubes son blancas** porque dispersan con mucha eficiencia la luz solar de todas las longitudes de onda.

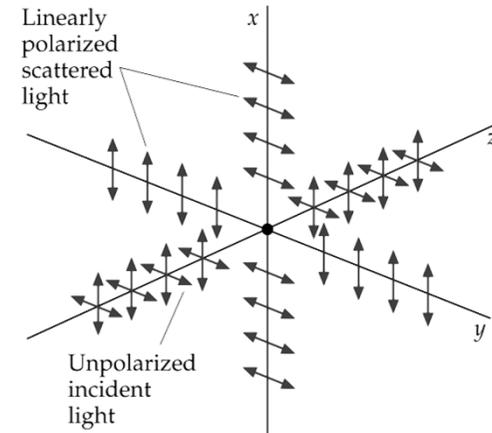
Polarización por absorción



por reflexión



por dispersión o scattering



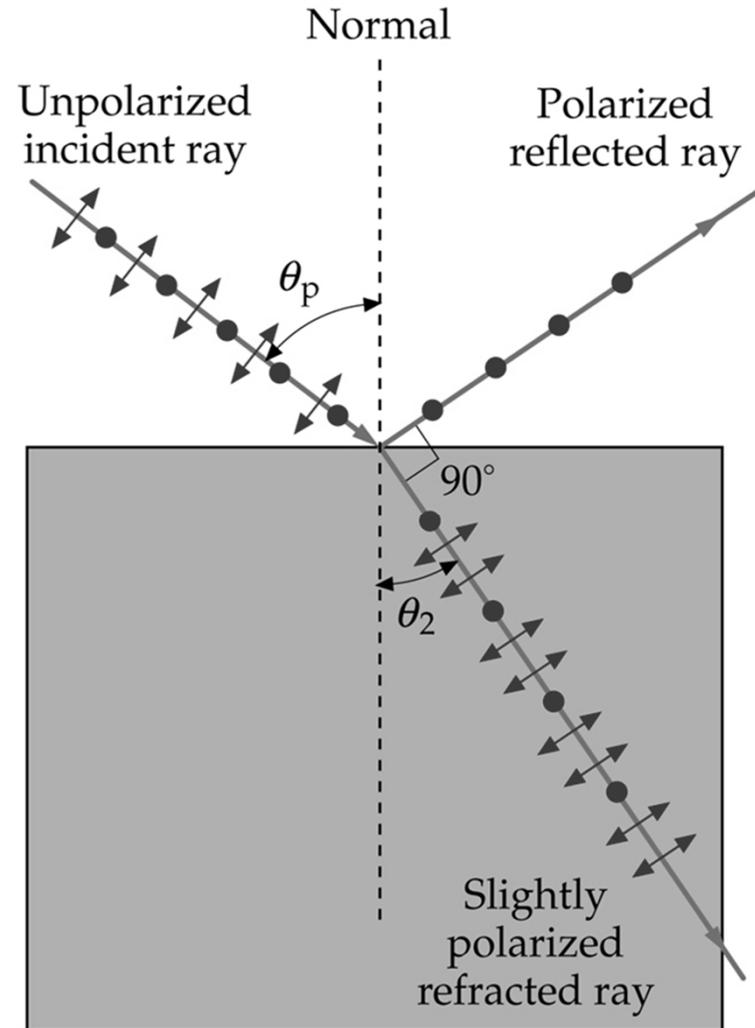
Polarización por reflexión

Cuando la luz no polarizada se refleja en una superficie plana entre dos medios transparentes, la luz reflejada está parcialmente polarizada. El grado de polarización depende del ángulo de incidencia y de los índices de refracción de ambos medios.

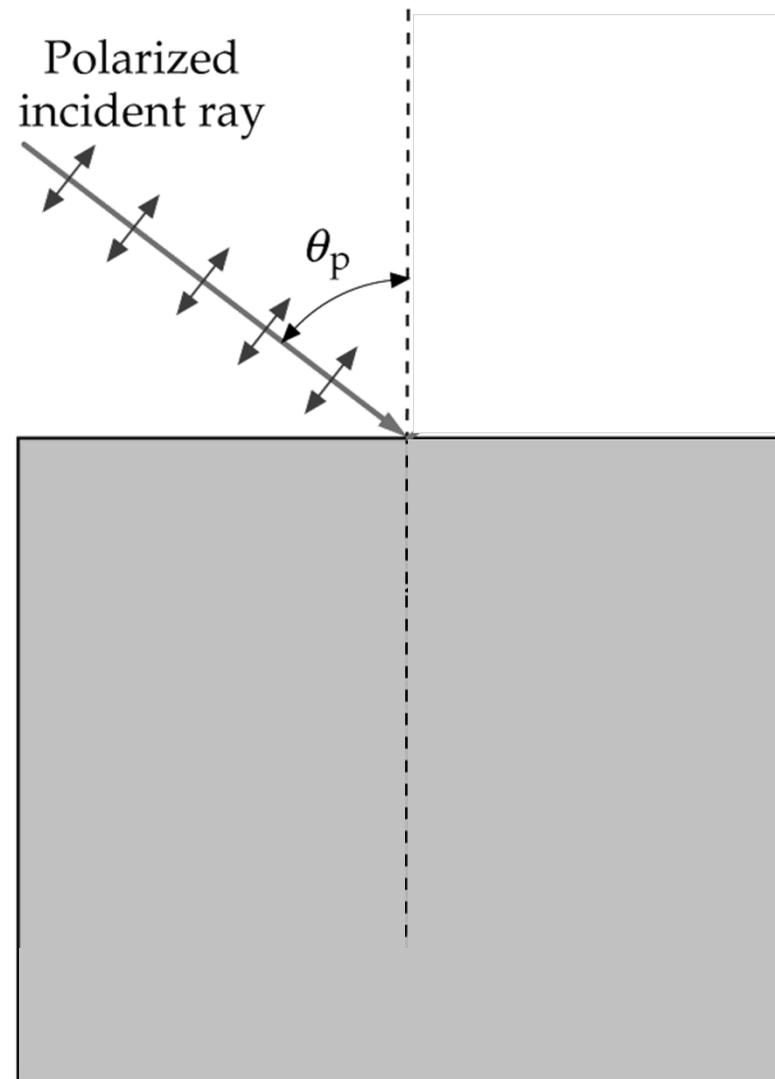
Si la incidencia se realiza con el ángulo de polarización, la luz reflejada está completamente polarizada (campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia).

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

Ángulo de polarización o de Brewster

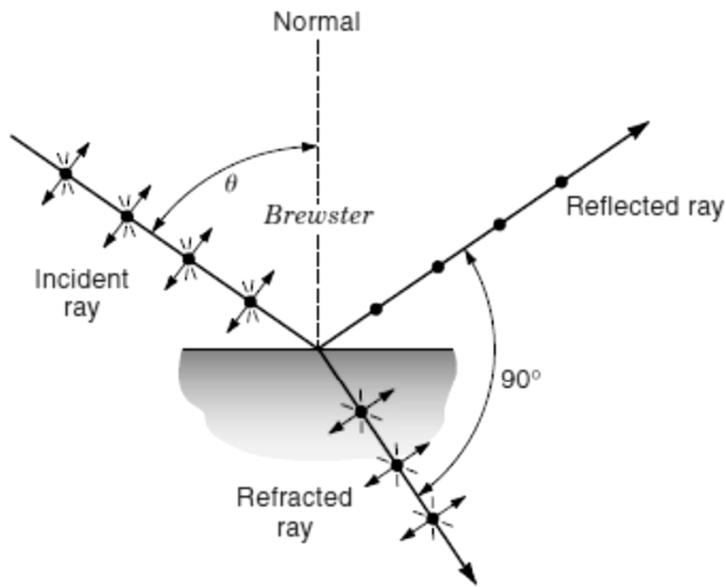


Pregunta

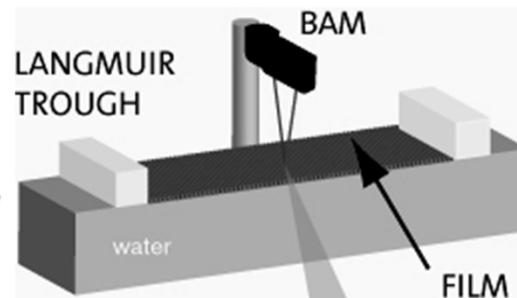


Microscopía de ángulo de Brewster

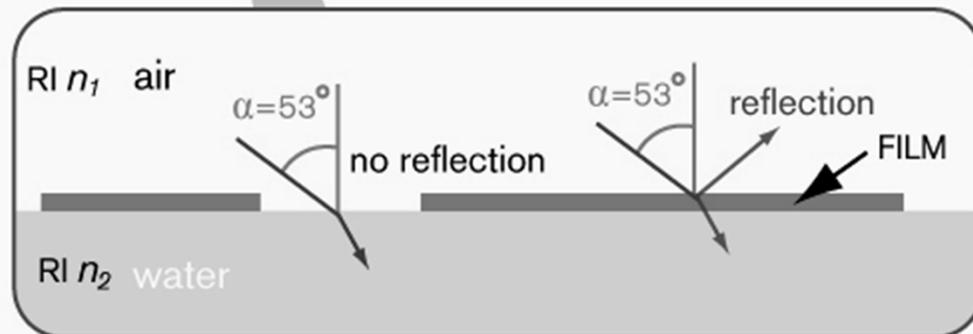
La microscopía de ángulo de Brewster (BAM, de las siglas inglesas) es una técnica óptica que permite la observación de películas formadas sobre la superficie de un líquido o de un sólido, aún siendo de dimensiones nanométricas. Su uso es frecuente en el estudio de las películas de Langmuir, formadas por la extensión de las moléculas de una sustancia orgánica sobre agua.



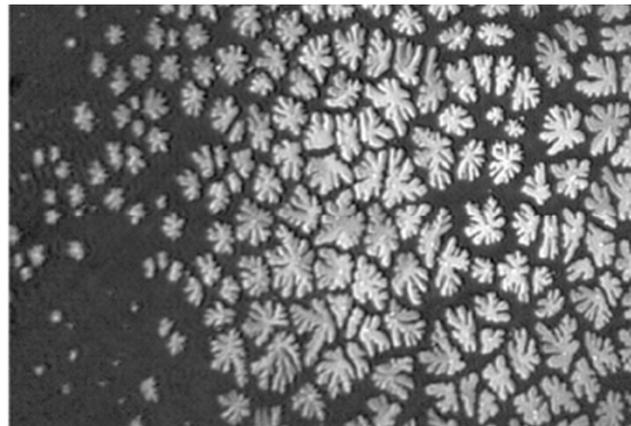
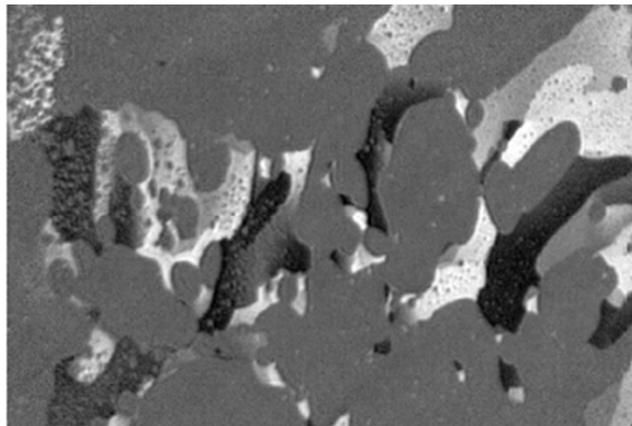
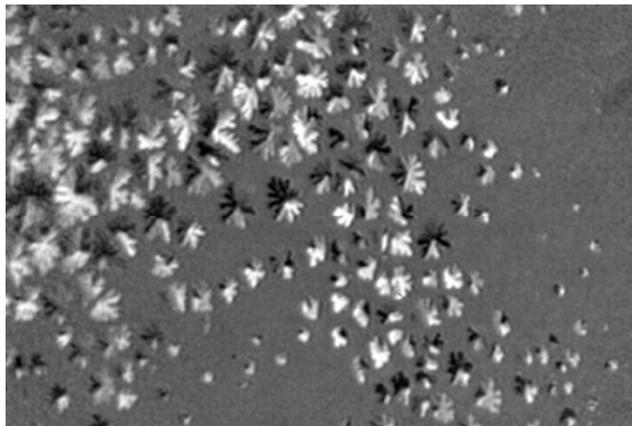
Monolayer experiment with NIMA BAM trough



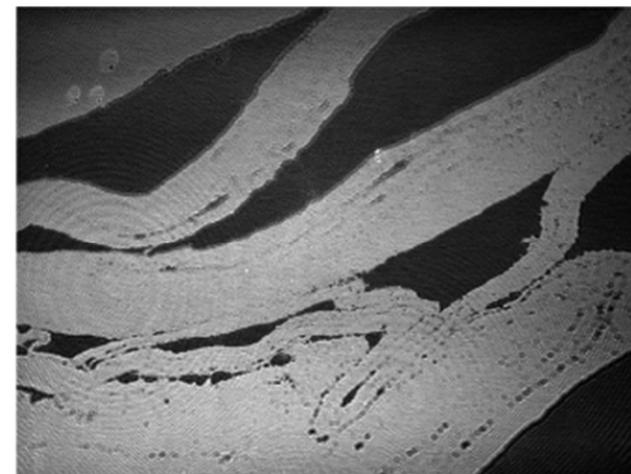
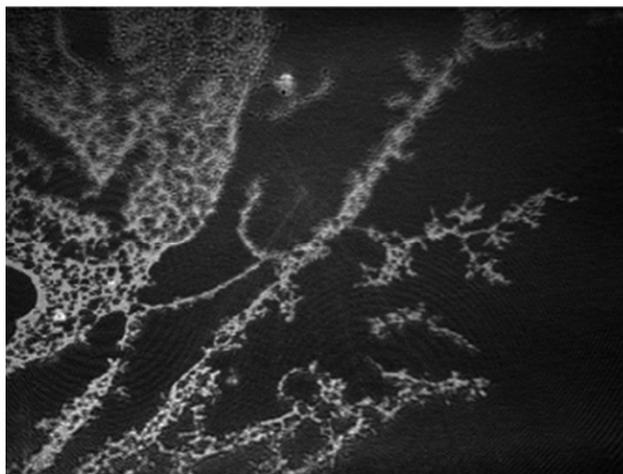
- Polarized light is introduced to a pure subphase surface
- At Brewster angle no reflection occurs
- When laser hits monolayer image is reflected to detector
- Changes in monolayer can be observed in real time during the measurement



Microscopía de ángulo de Brewster



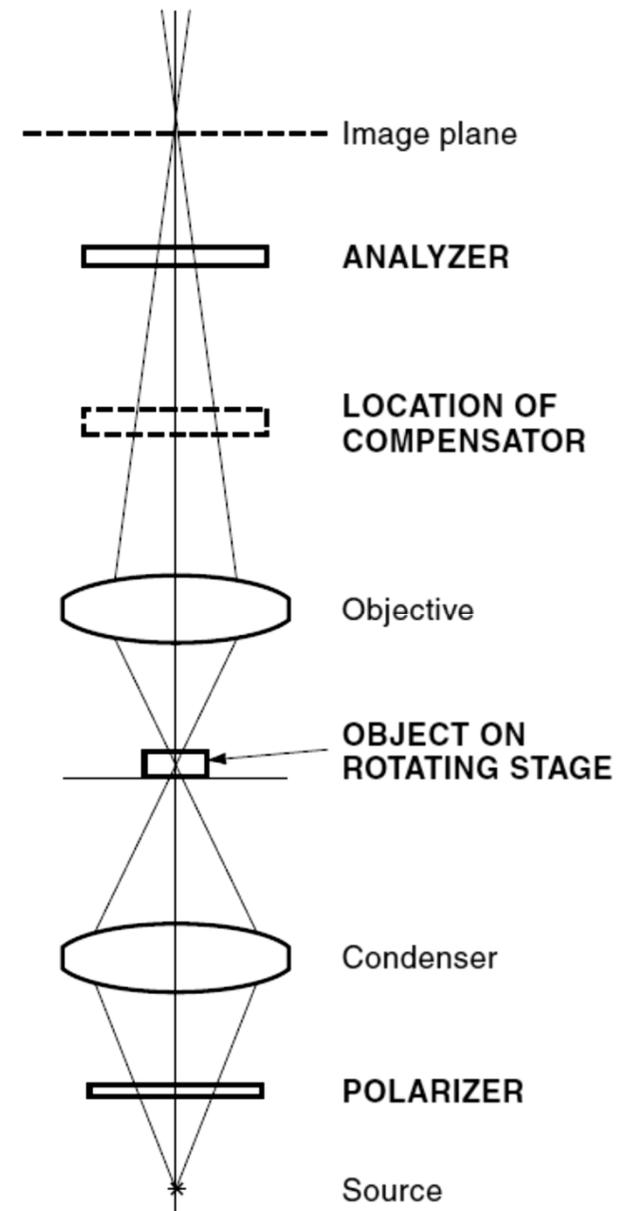
DMPE

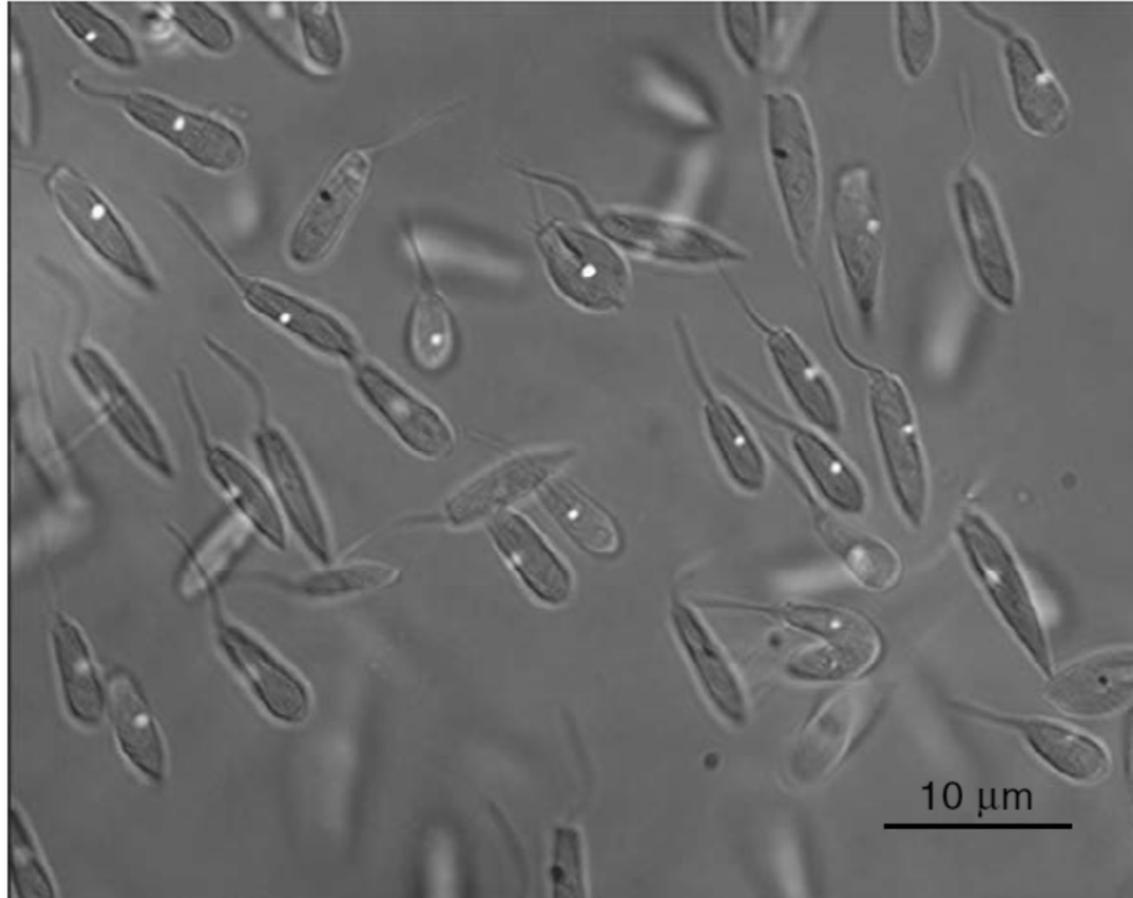


ácido esteárico

Microscopía de polarización

Image formation in the polarizing microscope is based on the unique ability of polarized light to interact with polarizable bonds of ordered molecules in a direction-sensitive manner. Thus, image formation is based not only on principles of diffraction and interference, but also on the existence of ordered molecular arrangements. The degree of order encountered in objects ranges from near perfect crystals to loosely ordered associations of asymmetric molecules or molecular assemblies.





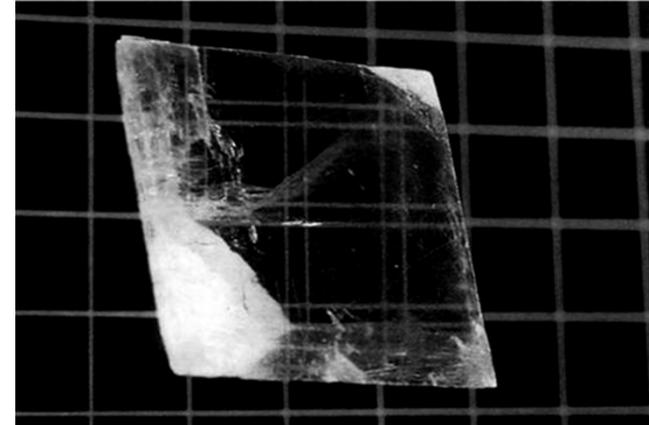
Polarized light image of DNA nucleoids in the trypanosomatid, *Crithidia fasciculata*. The discrete white and black bodies are kinetoplasts, highly condensed assemblies of mitochondrial DNA. The high degree of molecular order causes the bright and dark patterns of contrast in a polarizing microscope. (Image courtesy of Mark Drew, Johns Hopkins University.)

Polarización por birrefringencia o doble refracción

Sólidos



- cristalinos
- amorfos



isótropos



anisótropos

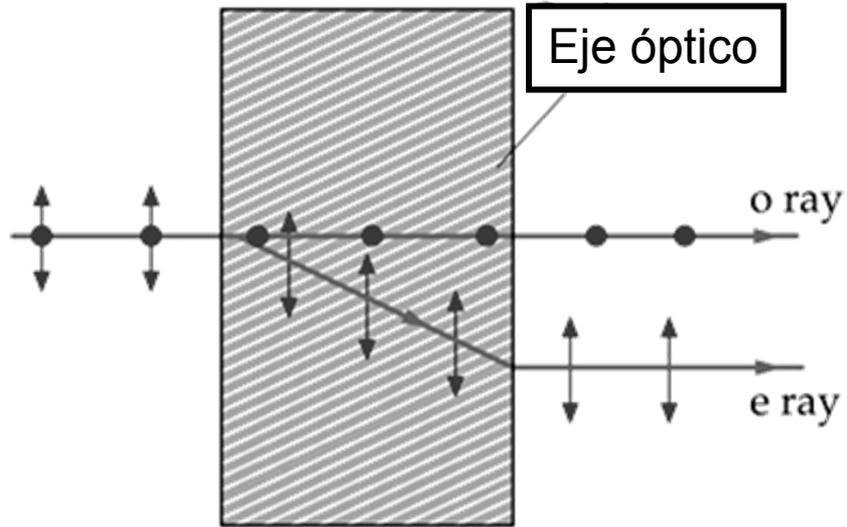


la velocidad de la luz depende del **plano de polarización** y de su **dirección de propagación** a través del material

- calcita
- cristales no cúbicos
- celofán

birrefringencia o doble refracción

Cuando un rayo de luz incide en un material birrefringente,



- rayo ordinario
- rayo extraordinario

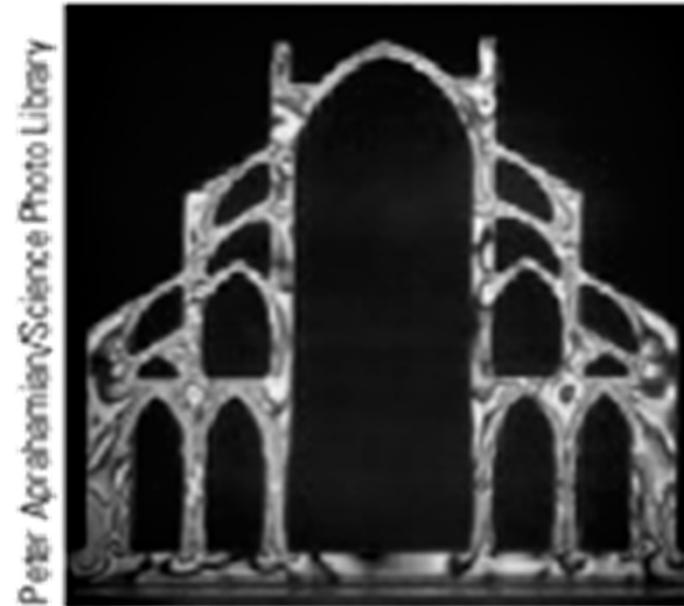
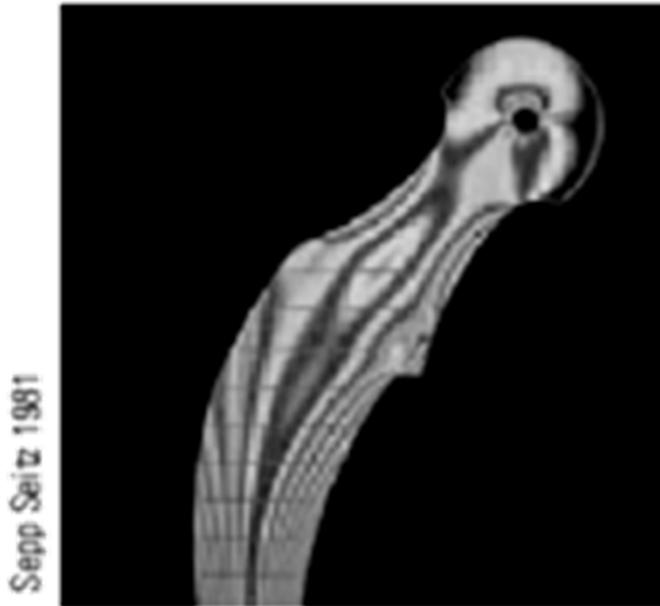


eje óptico, dirección en la cual ambos rayos se propagan con la misma velocidad

Fotoelasticidad: diagrama de tensiones

Algunos materiales ópticos que normalmente no tienen birrefringencia, adquieren esta propiedad cuando se someten a esfuerzo mecánico.

polarizador, plástico, analizador



La cantidad de birrefringencia es distinta para longitudes de onda diferentes; de ahí los distintos colores de luz. El color que aparece en cada punto es aquél para el que la luz transmitida está más cerca de estar polarizada a lo largo del eje de polarización del analizador.

Calcita

Fórmula química: CaCO_3 .

Clase: Carbonatos.

Sistema cristalográfico: Trigonal.

Hábito: Romboédrico, escalenoédrico, prismático, rosetas, etc.

Propiedades Físicas

Color: Incoloro, blanco o coloreado en tonos claros.

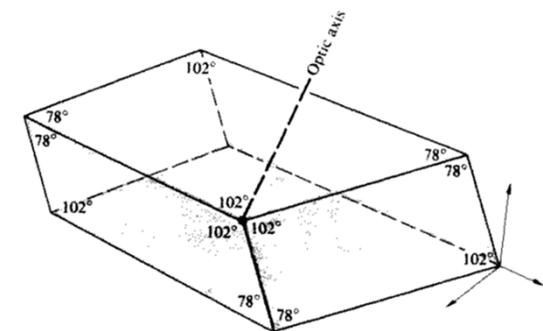
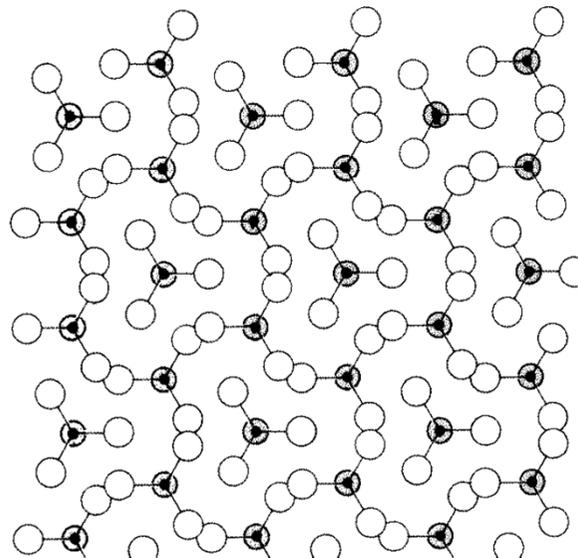
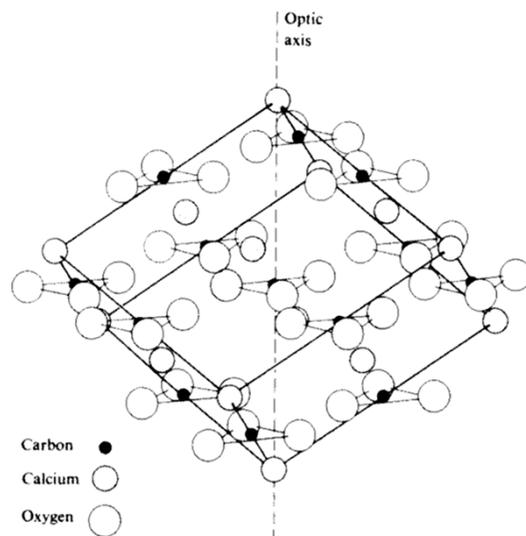
Color de la raya: Blanco

Brillo: Vítreo, nacarado o mate en variedades cristalinas.

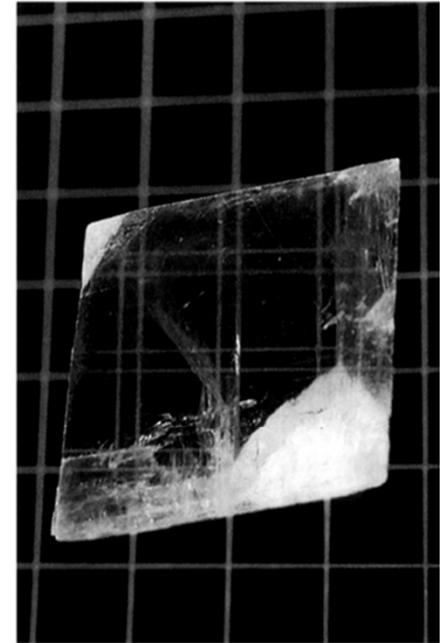
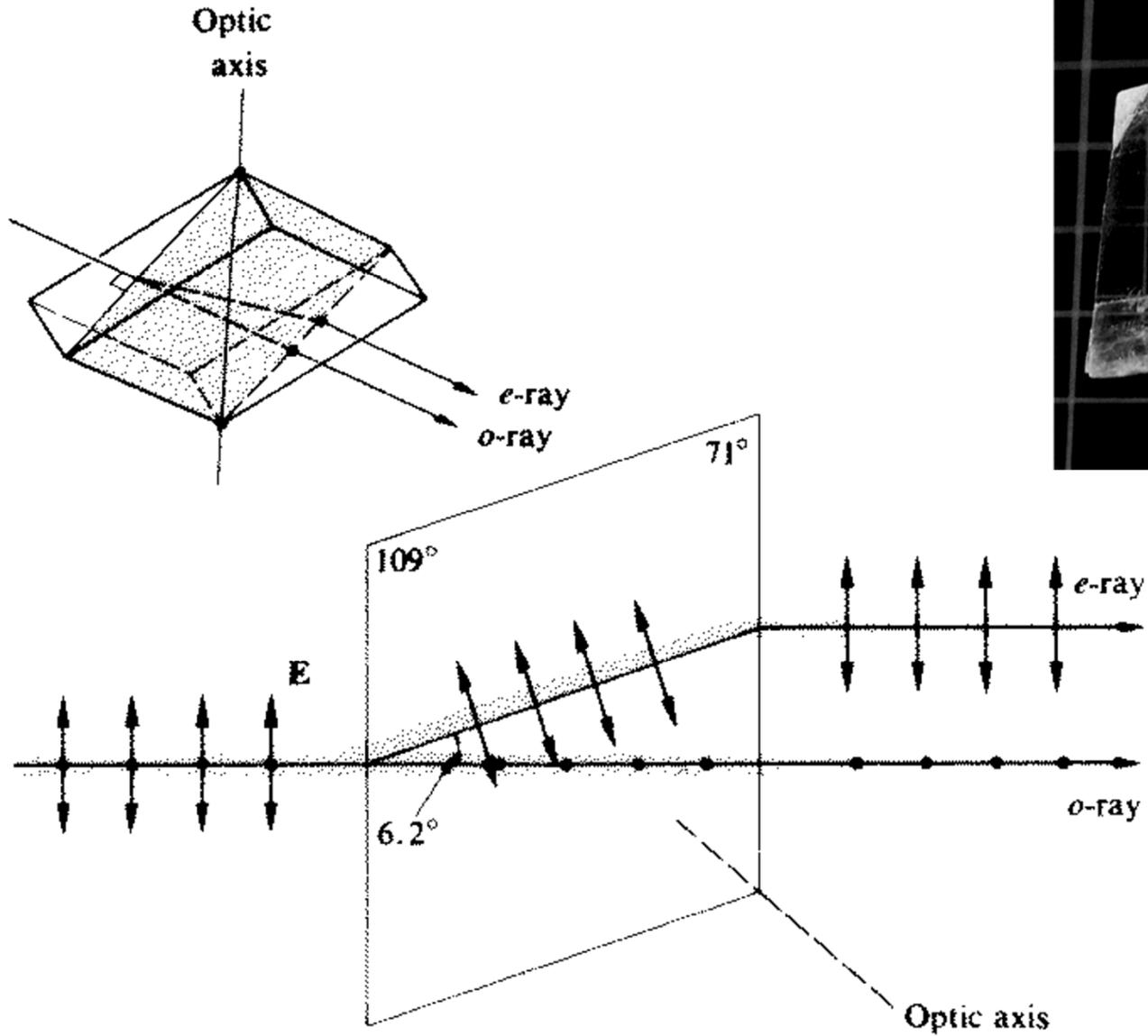
Dureza: 3 (Semiduro, se raya con púa de acero fácilmente).

Densidad: $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Entre ligero y poco pesado).

Lugar: India, México, Sudáfrica.



Cuando la luz atraviesa un cristal de calcita



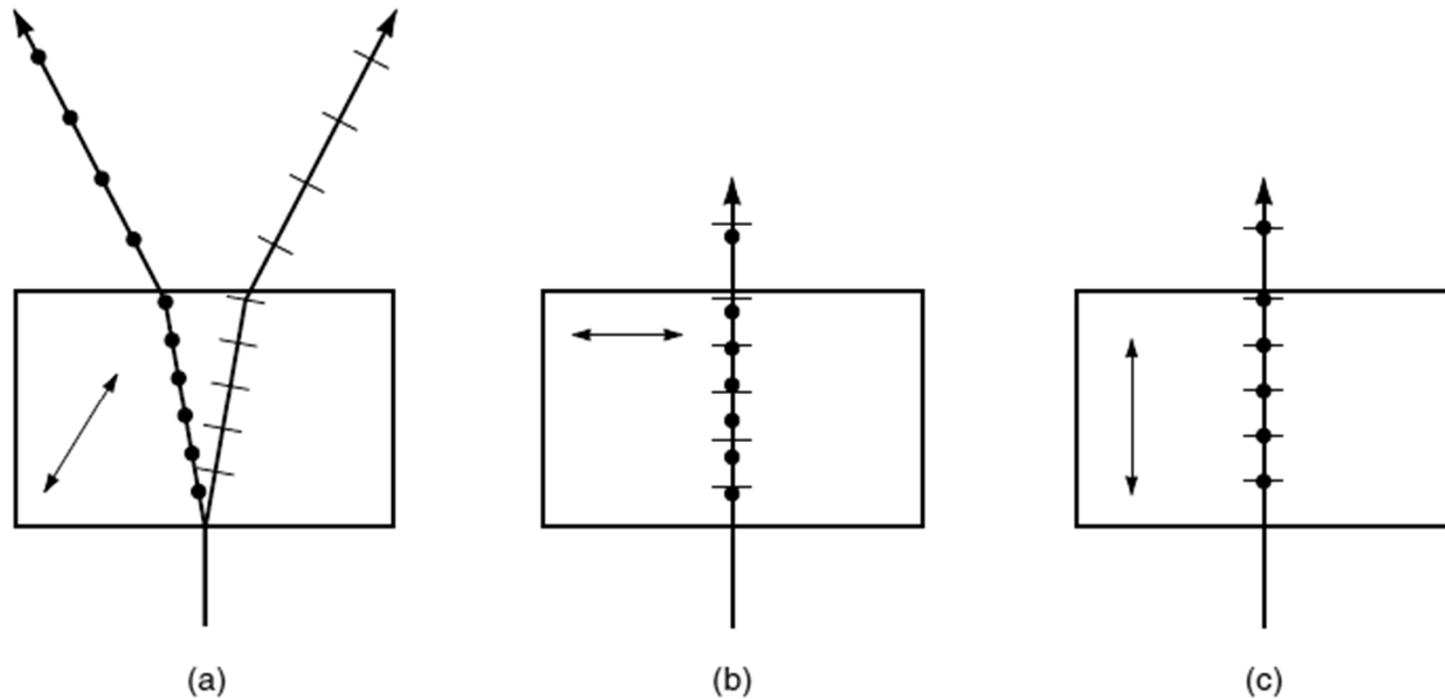
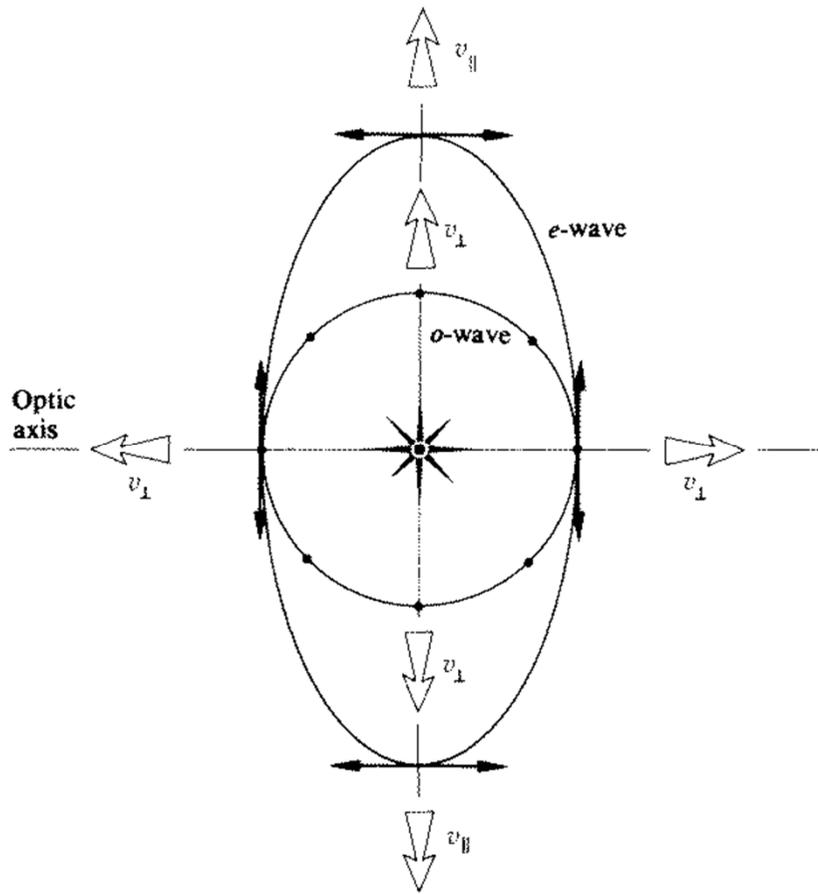


Figure 8-7

Splitting of an incident ray into O- and E-ray components by a birefringent crystal. The rectangular slabs shown in a, b, and c have been cut from parent crystals in such a way that the optic axes are oriented differently. Incident light is linearly polarized. Dots and dashes indicate the planes of vibration of linearly polarized O and E rays. Dots indicate the vibrations of E vectors that are perpendicular to the plane of the page, while the space between the dots represents one wavelength; dashes indicate vibrations parallel to the plane of the page. (a) A ray incident on a crystal at an angle oblique to the optic axis of the crystal is split into O and E rays that traverse different physical paths through the crystal. The emergent O and E rays are linearly polarized, vibrate in mutually perpendicular planes, and exhibit an optical path difference. (b) An incident ray whose propagation axis is perpendicular to the optic axis is split into O and E rays, but the two rays follow the same trajectory through the crystal and do not diverge. Emergent rays can exhibit an optical path difference. This is the usual case for birefringent biological specimens. (c) An incident ray whose propagation axis is parallel to the optic axis is not split and behaves as an ordinary ray. The optical path lengths of the emergent rays are the same.



$$n_o \equiv c/v_{\perp}$$

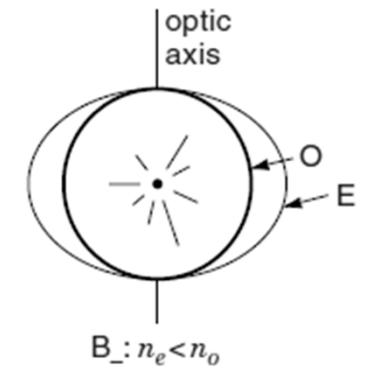
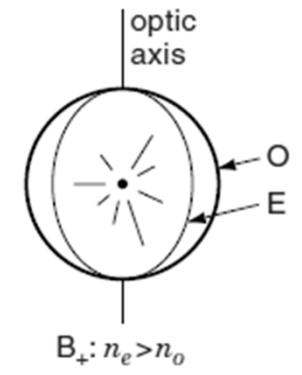
$$n_e \equiv c/v_{\parallel}$$

$$\Delta n = (n_e - n_o)$$

$$v_{\parallel} > v_{\perp}, n_o > n_e$$

Indices of Refraction for Some Double-Refracting Crystals at a Wavelength of 589.3 nm

| Crystal | n_o | n_e | n_o/n_e |
|------------------------------------|-------|-------|-----------|
| Calcite (CaCO_3) | 1.658 | 1.486 | 1.116 |
| Quartz (SiO_2) | 1.544 | 1.553 | 0.994 |
| Sodium nitrate (NaNO_3) | 1.587 | 1.336 | 1.188 |
| Sodium sulfite (NaSO_3) | 1.565 | 1.515 | 1.033 |
| Zinc chloride (ZnCl_2) | 1.687 | 1.713 | 0.985 |
| Zinc sulfide (ZnS) | 2.356 | 2.378 | 0.991 |



Láminas de onda o retardador

Elementos ópticos que sirven para cambiar la polarización de la onda incidente.

Si la luz está incidiendo sobre una lámina birrefringente de forma perpendicular a su cara cristalina y perpendicular al eje óptico,

- *los rayos se propagan en la misma dirección*
- *con velocidades diferentes*
- *diferencia de fase que depende del espesor de la lámina y de la longitud de onda de la luz incidente*

$$v_{\parallel} > v_{\perp}, n_o > n_e$$

$$\Lambda = d(|n_o - n_e|)$$

$$\Delta\varphi = k_0\Lambda$$

✓ **lámina de cuarto de onda**, $\Delta\varphi = \pi/2$



$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} d(|n_o - n_e|)$$

$$d(|n_o - n_e|) = (4m + 1)\lambda_0/4$$

$$d = 140 \text{ nm}, \lambda = 560 \text{ nm}$$

✓ **lámina de media onda**, $\Delta\varphi = \pi$,

Supongamos que la luz incidente está polarizada linealmente, $\theta = 45^\circ$

los rayos ordinario y extraordinario

- en fase
- amplitudes iguales

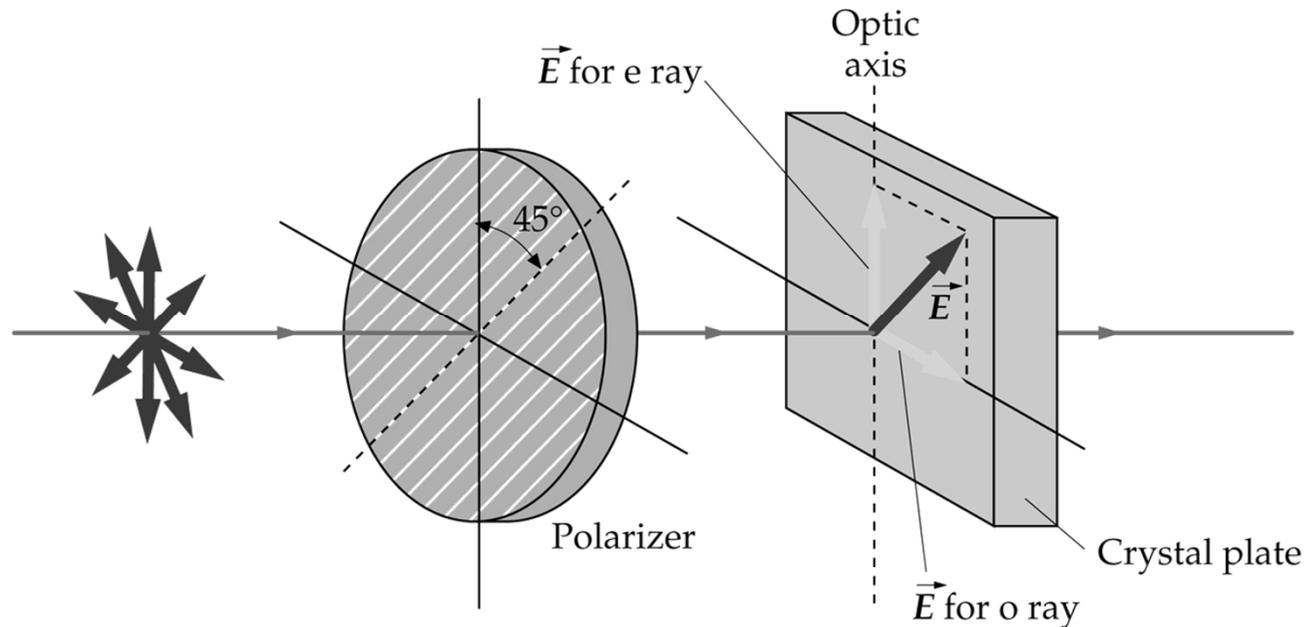


lámina de cuarto de onda

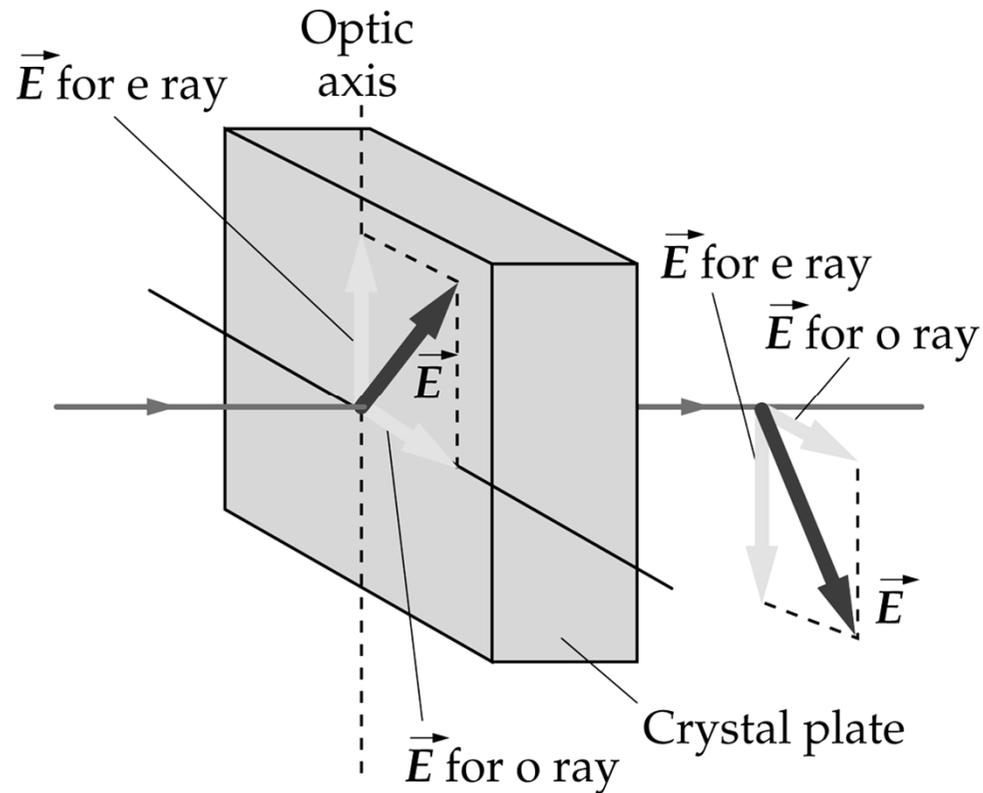
$$\Delta\varphi = \pi/2$$

$$E_x = E_0 \sin \omega t$$

$$E_y = E_0 \sin(\omega t + 90^\circ) = E_0 \cos \omega t$$

onda polarizada circularmente

Si el cristal birrefringente es una lámina de media onda, $\theta = 90^\circ$



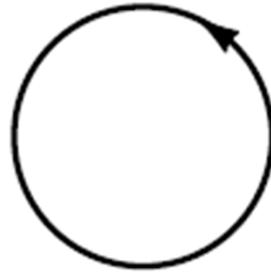
$$\Delta\varphi = \pi,$$

$$E_x = E_0 \sin \omega t$$

$$E_y = E_0 \sin(\omega t + 180^\circ) = -E_0 \sin \omega t$$

la dirección de polarización de la onda ha girado 90°

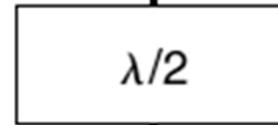
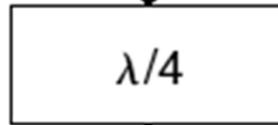
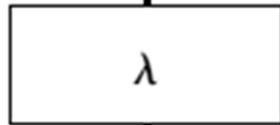
Resultant waveform



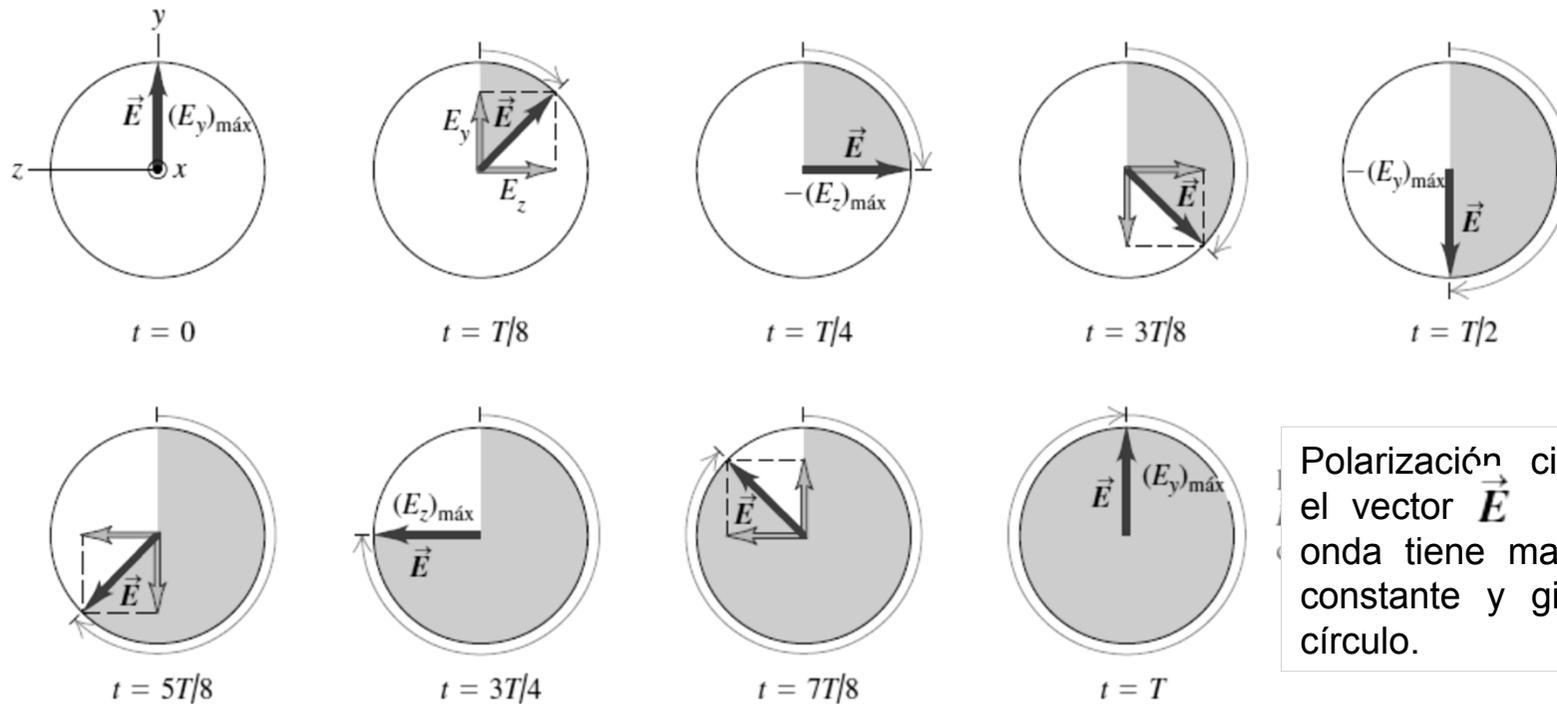
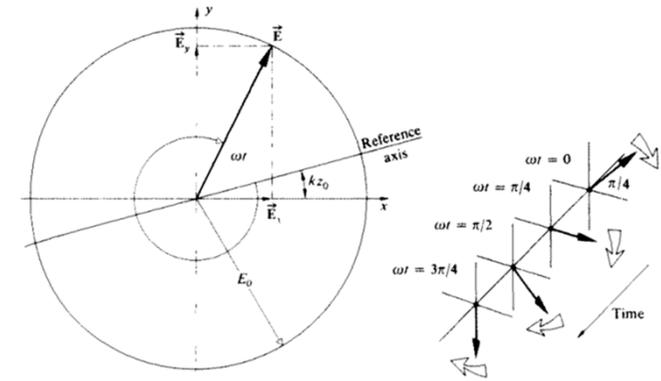
O and E rays



Retarder plate

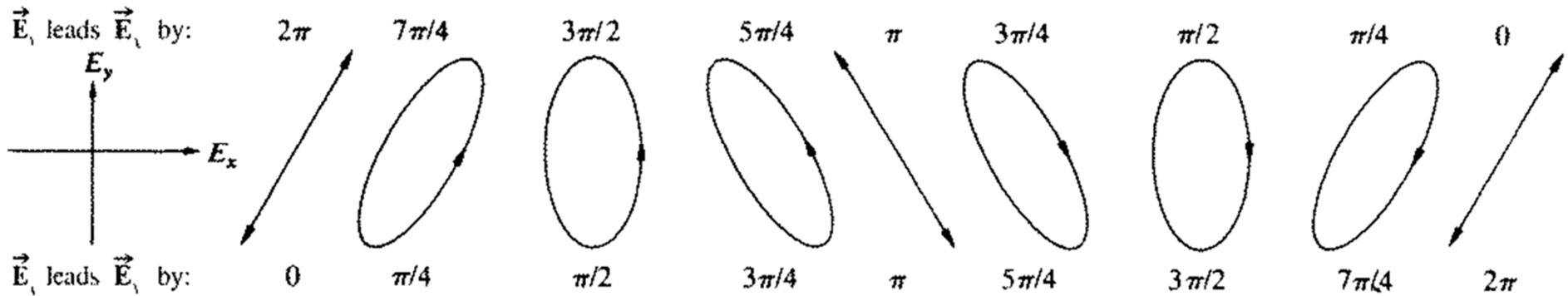
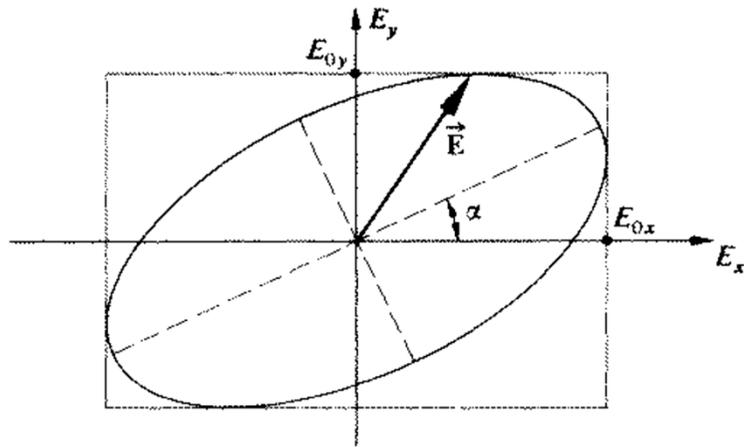


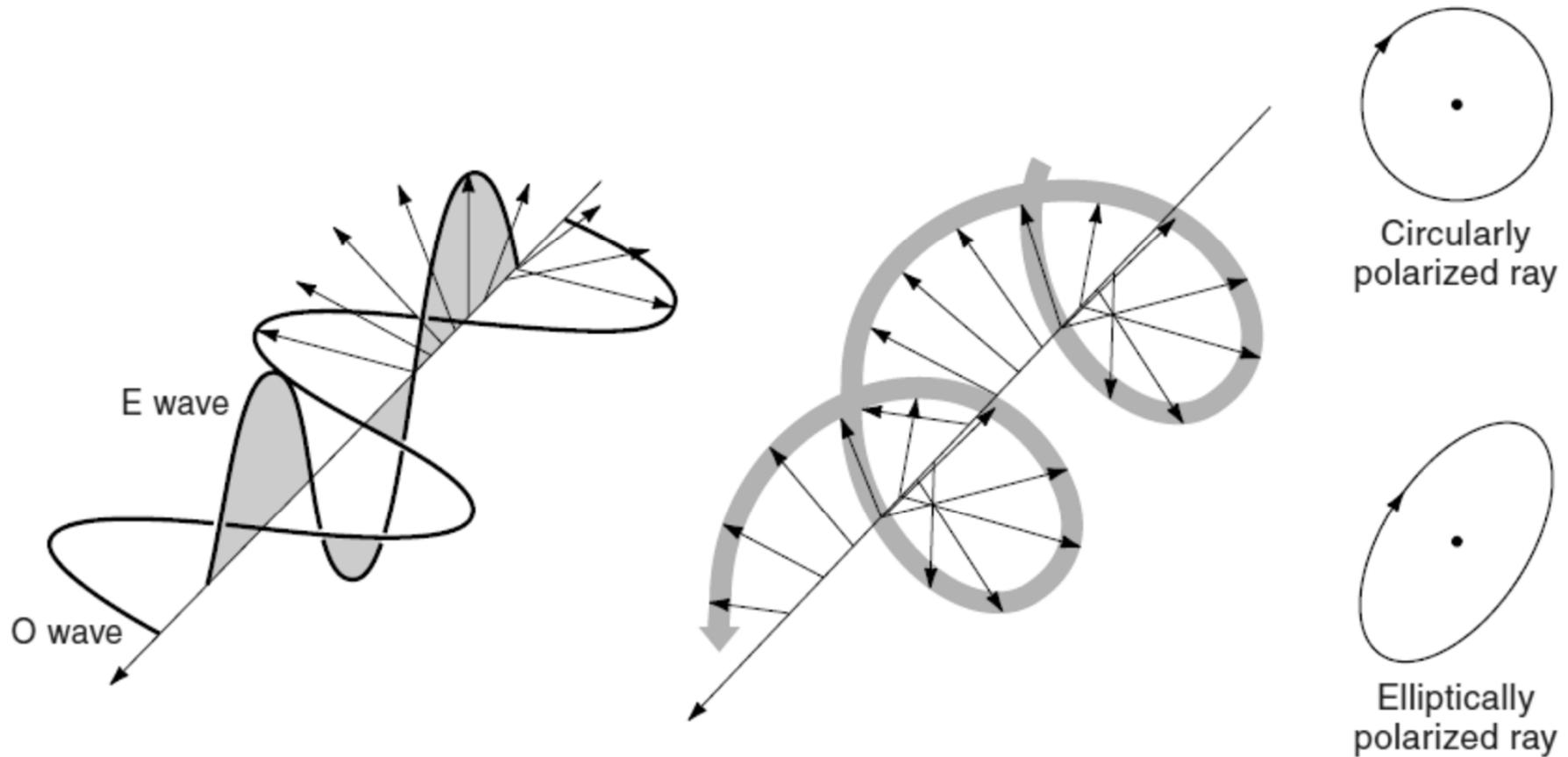
Polarización circular de una onda electromagnética que se desplaza paralelamente al eje x . La componente y de \vec{E} se retrasa un cuarto de ciclo con respecto a la componente z . Esta diferencia de fase da por resultado una polarización circular por la derecha.



Polarización circular: el vector \vec{E} de la onda tiene magnitud constante y gira en círculo.

Si la diferencia de fase entre las dos ondas componentes es distinta de un cuarto de ciclo, o si las dos ondas componentes tienen amplitudes diferentes, entonces cada punto de la cuerda traza no un círculo, sino una *elipse*. En este caso, se dice que la onda está **elípticamente polarizada**.





The waveforms of elliptically and circularly polarized light. O and E rays following the same propagation axis but vibrating in mutually perpendicular planes cannot interfere, but can be combined by vector addition. Depending on the relative phase difference between the two rays, the resultant wave may be linear or take on the form of a spiraling ellipse or circle. With a phase displacement of $\pi/4$, the waveform is a circle.