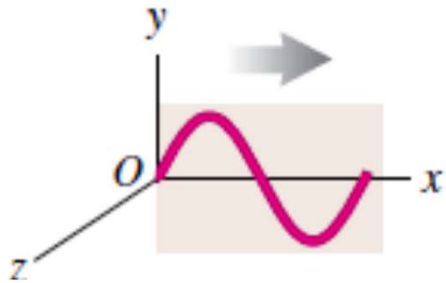


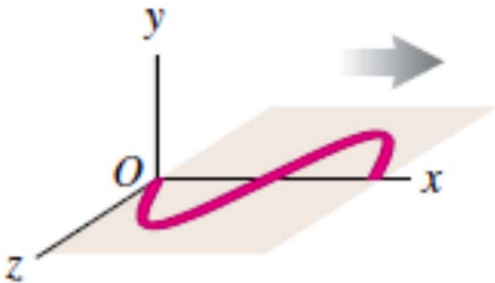
# RESUMEN\_POLARIZACIÓN

# Polarización

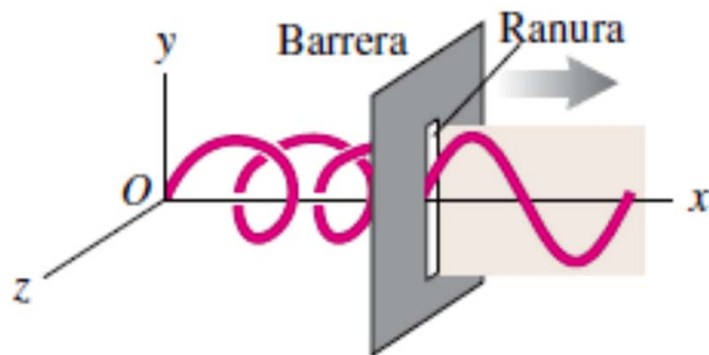
La *polarización* es una característica de todas las ondas transversales



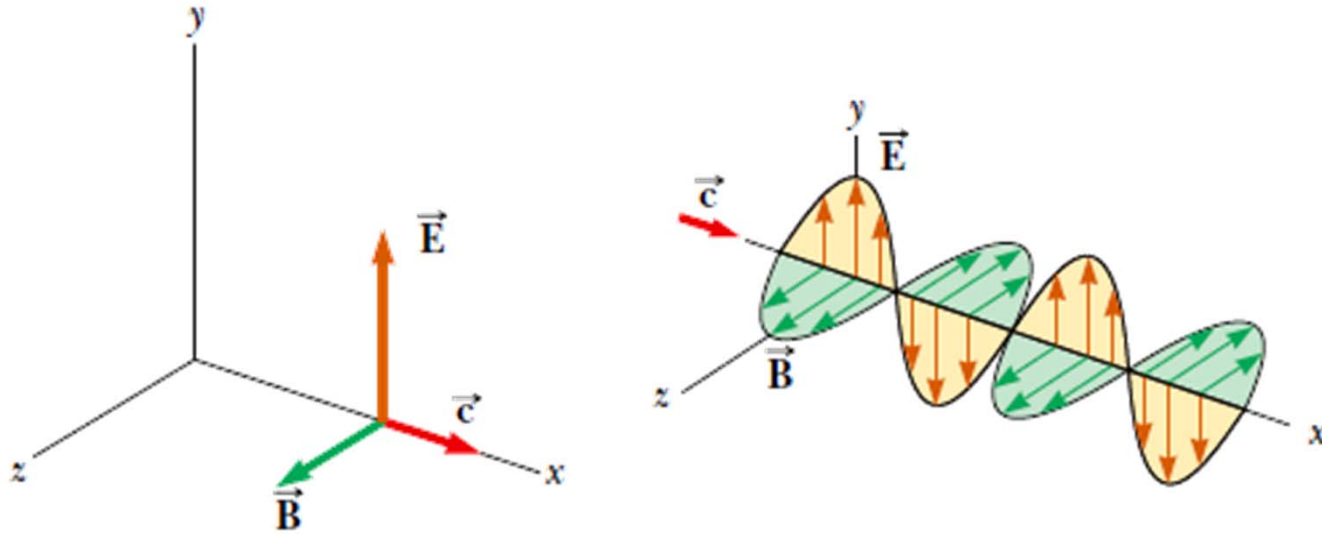
- onda transversal linealmente polarizada en la dirección y



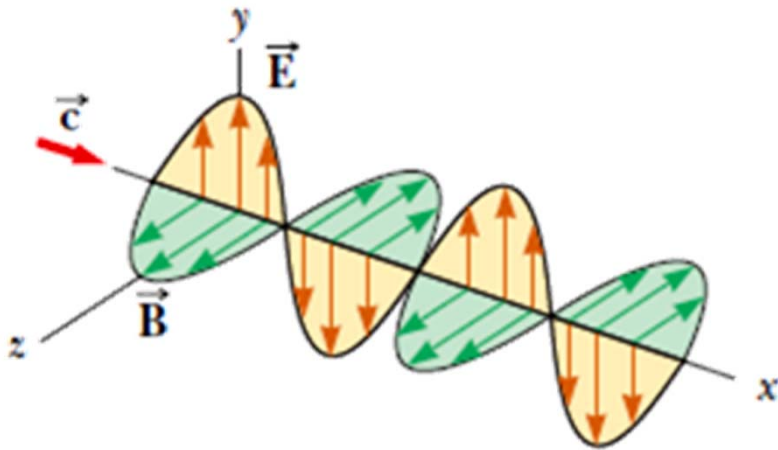
- onda transversal linealmente polarizada en la dirección z



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



- la onda es *transversal*; tanto como son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Los campos eléctrico y magnético también son perpendiculares entre sí. La *dirección de propagación es la dirección del producto vectorial*  $\vec{E} \times \vec{B}$ .
- hay una razón definida entre las magnitudes de  $\vec{E} \times \vec{B}$
- la onda viaja en el vacío con velocidad definida  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ :  $E = cB$ .
- Así, se dice que la onda electromagnética está polarizada en la dirección y porque el campo eléctrico sólo tiene componente y.



- $E_y(x, t)$  y  $B_z(x, t)$  representen los valores instantáneos de la componente y de  $\vec{E}$  y la componente z de  $\vec{B}$ , respectivamente

- $E_{\text{máx}}$  y  $B_{\text{máx}}$  representen los valores máximos, o *amplitudes*, de estos campos.

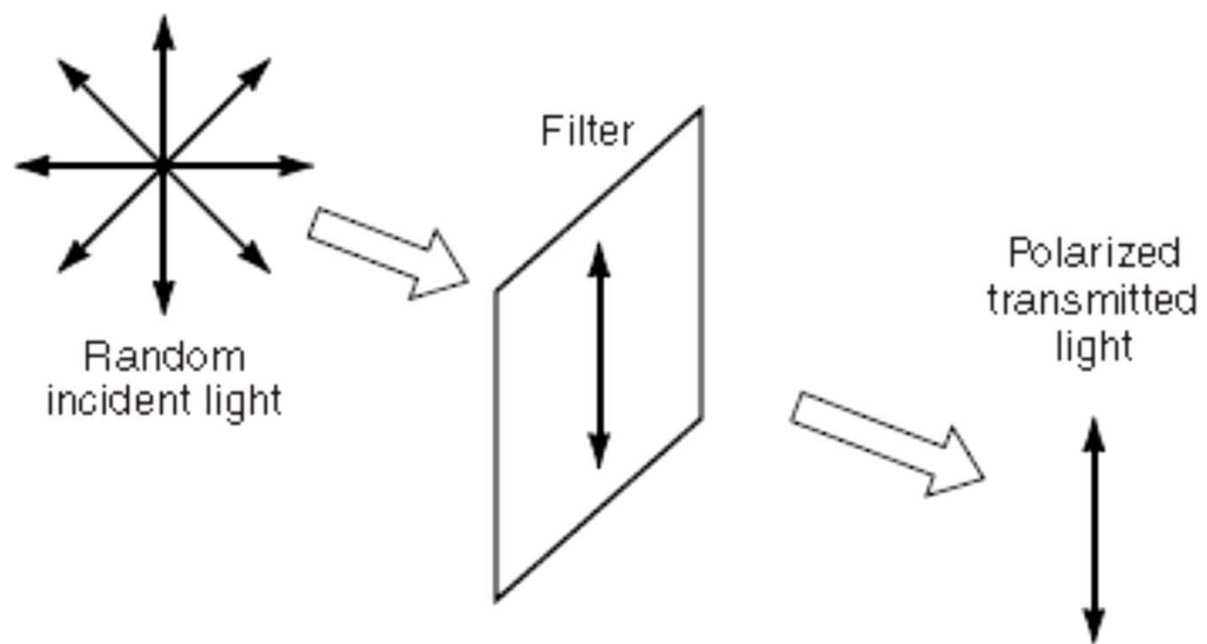
De esta forma, las funciones de onda para la onda son

$$E_y(x, t) = E_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t) \quad B_z(x, t) = B_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t)$$

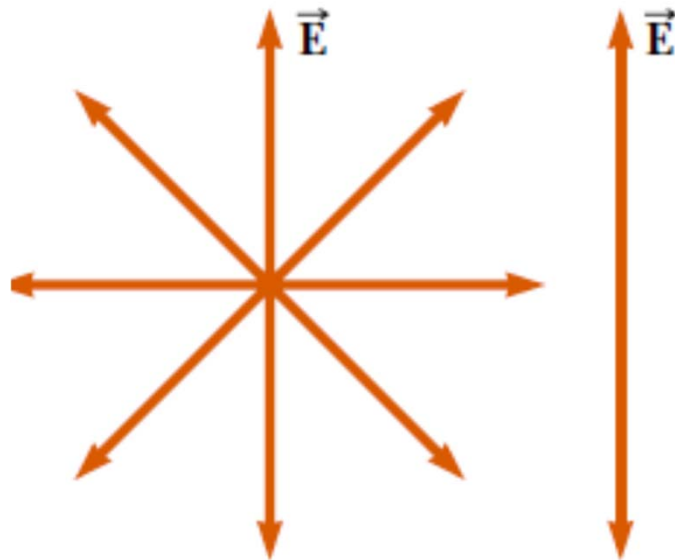
$$\vec{B}(x, t) = \hat{k} B_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t)$$

Así, se dice que la onda electromagnética está polarizada en la dirección y porque el campo eléctrico sólo tiene componente y.



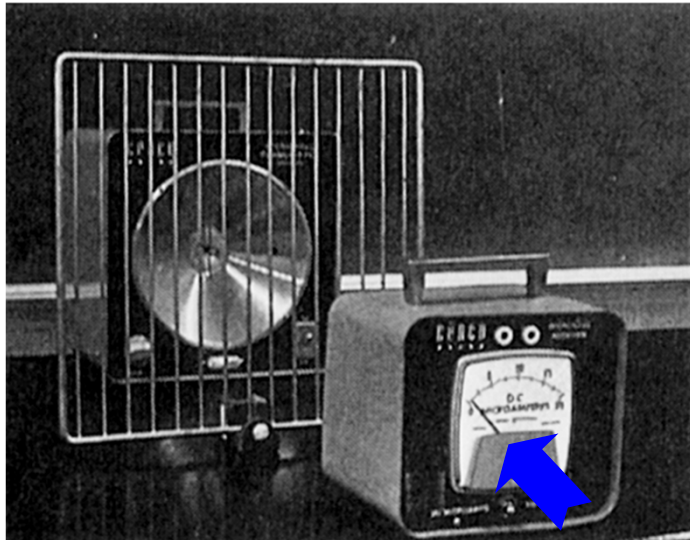


▪ las ondas emitidas por un transmisor de radio, por lo general, están linealmente polarizadas.

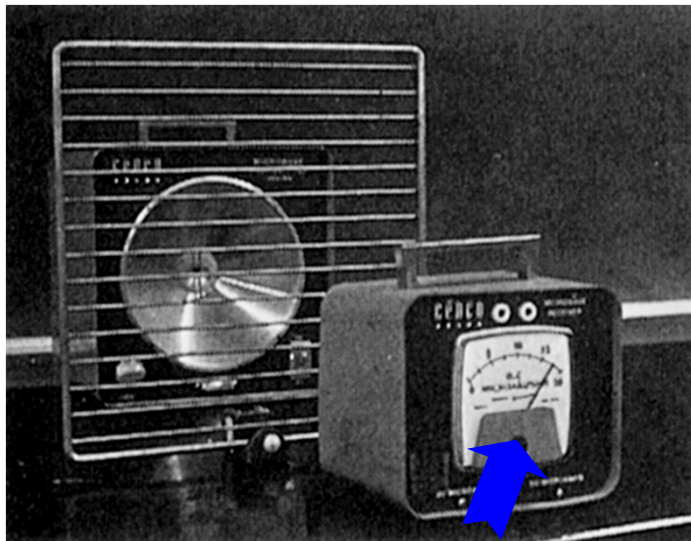


▪ **luz no polarizada** o *luz natural*, luz emitida es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles

## Demostración de la polarización de microondas.



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



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

1. absorción

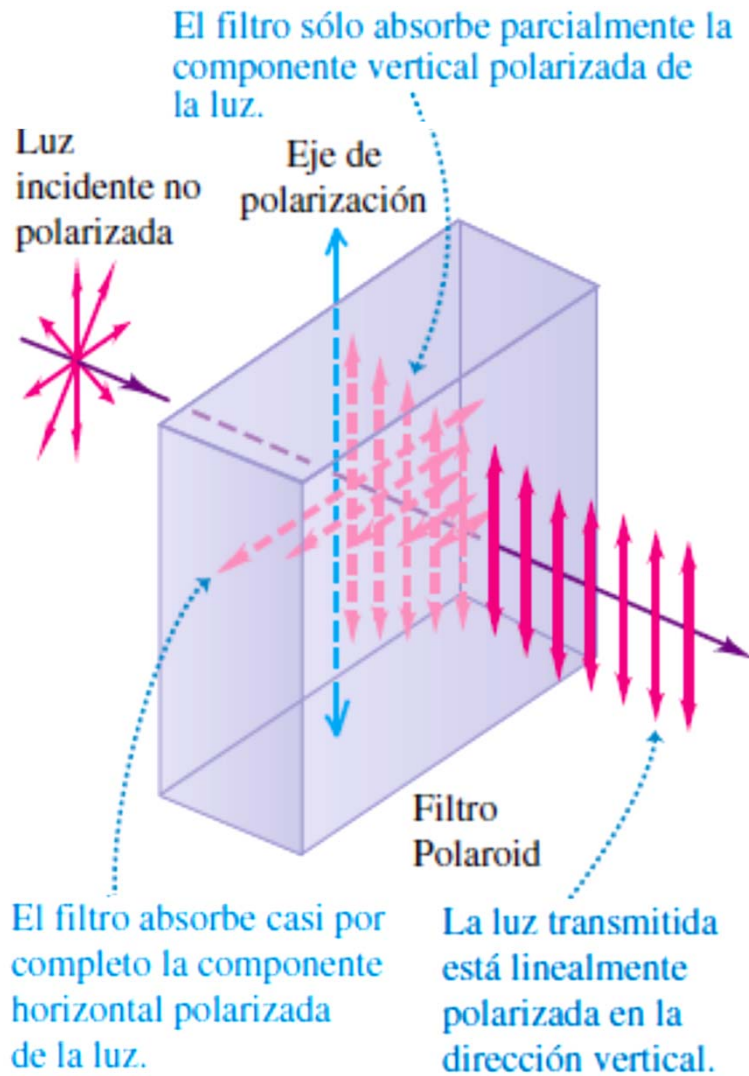
2. reflexión

3. dispersión o *scattering*

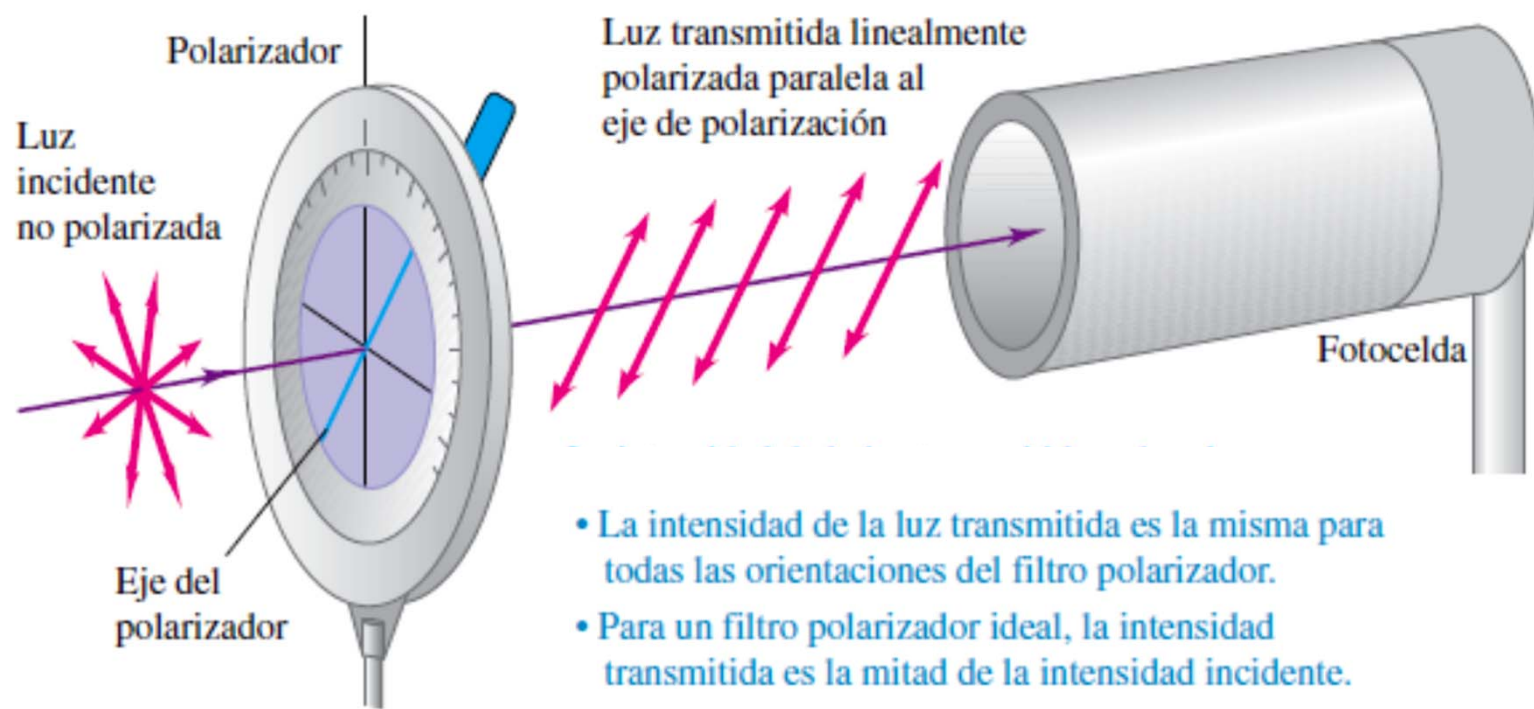
4. birrefringencia

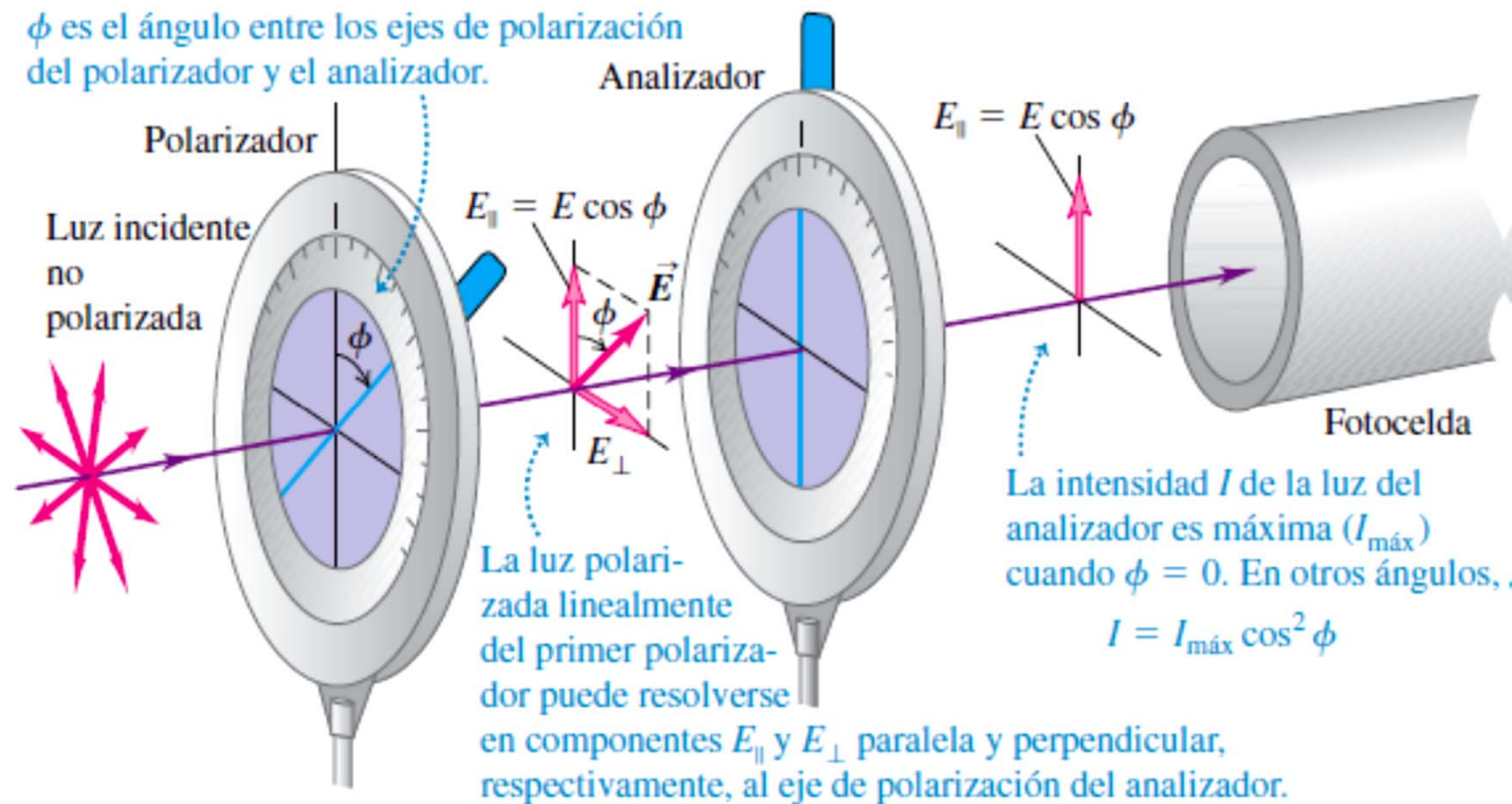


# Polarización por absorción



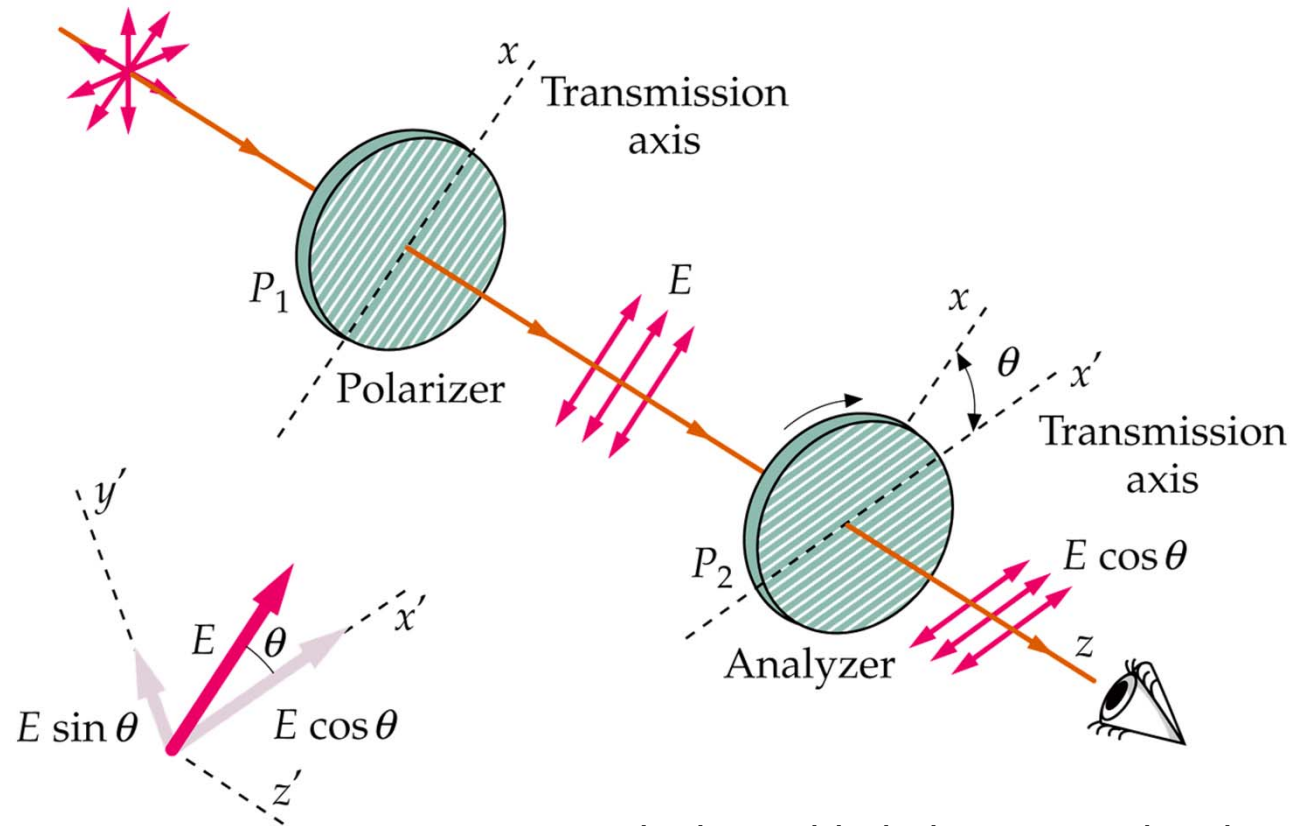
- algunos cristales absorben y transmiten luz de forma diferente dependiendo de la polarización de la luz
- se pueden usar para obtener luz linealmente polarizada
- filtro polarizador más común para la luz visible, **Polaroid** (1938, E. H Land)
- transmite el 80% o más de la intensidad de una onda que 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.

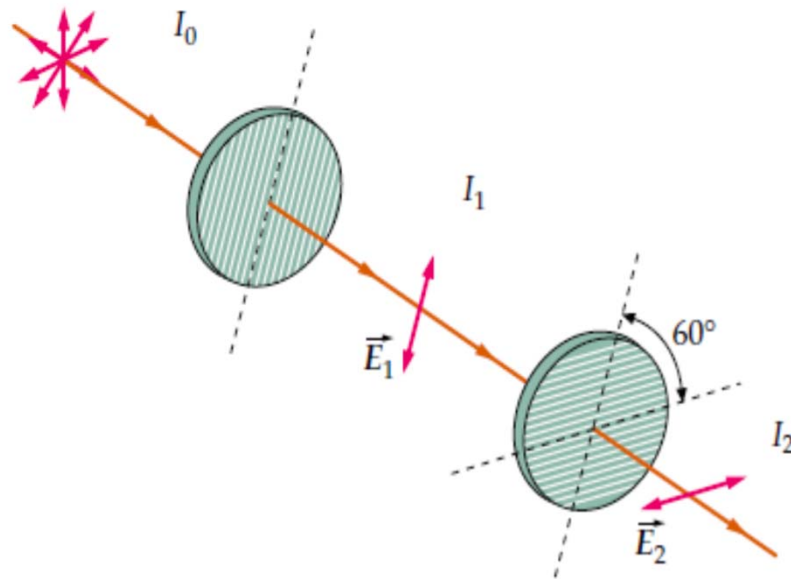
$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Ley de Malus

E. L. Malus (1775–1812)

## Pregunta

Luz no polarizada de intensidad  $3.0 \text{ W/m}^2$  incide sobre dos películas polarizadoras cuyos ejes de transmisión forman entre sí un ángulo de  $60^\circ$ . Cuál es la intensidad de la luz transmitida por la segunda película?



$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

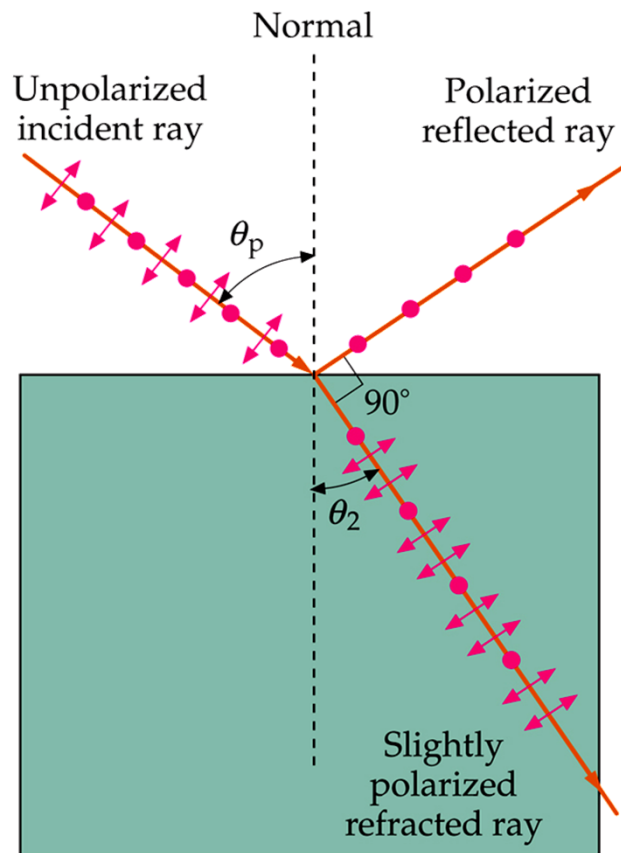
$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

$$I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 60^\circ = \frac{1}{2} (3.0 \text{ W/m}^2) (0.500)^2$$

$$= \boxed{0.38 \text{ W/m}^2}$$

# 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,

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

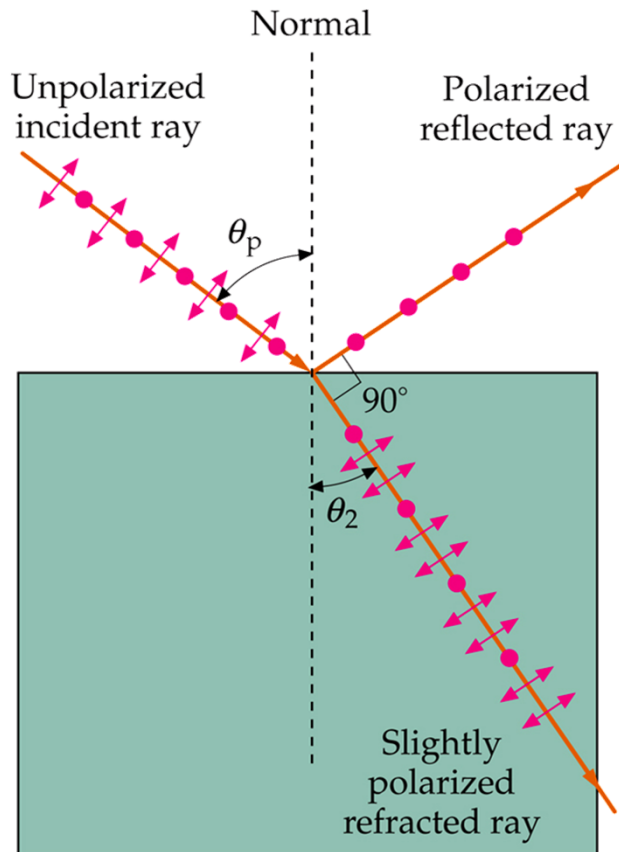
$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$$

Entonces,

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

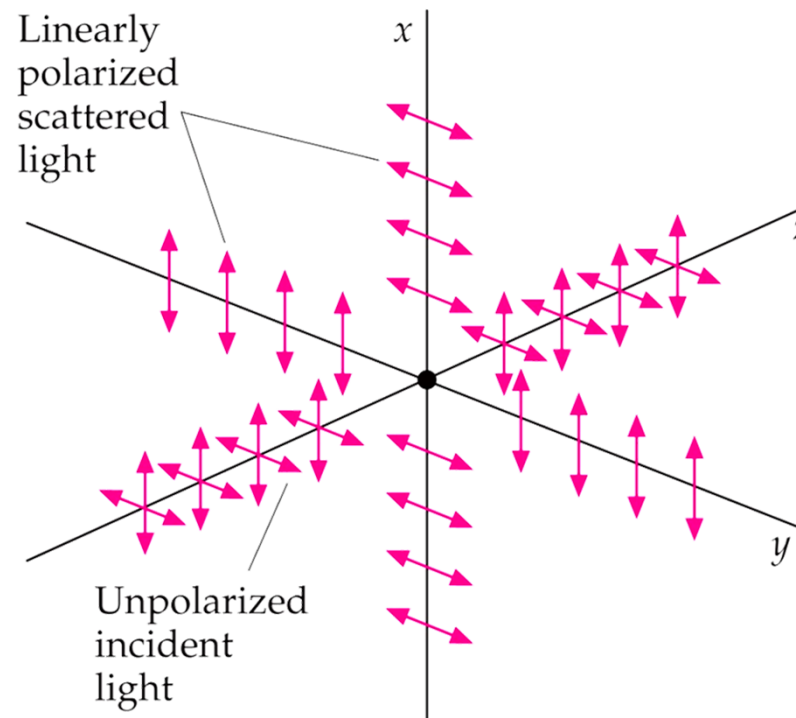
$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

***ley de Brewster***



# Polarización por dispersión o *scattering*

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



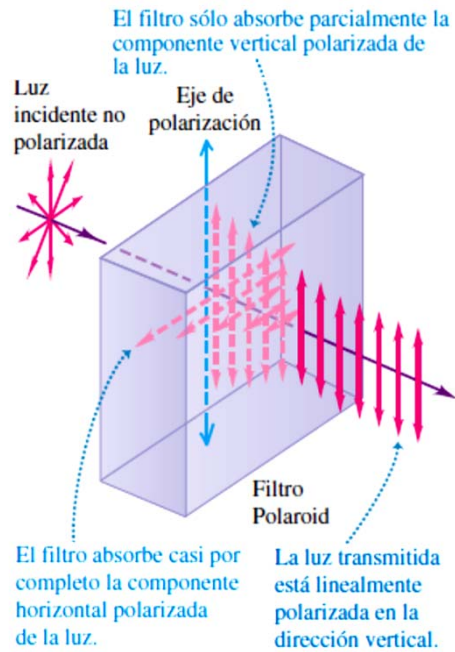
La luz no polarizada que se propaga en una dirección  $z$  incide sobre un centro de dispersión situado en el origen. La luz dispersada en el plano  $z=0$  a lo largo de la dirección  $x$  está polarizada en la dirección  $y$ , mientras en la dispersada en la dirección  $y$  está polarizada en la dirección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



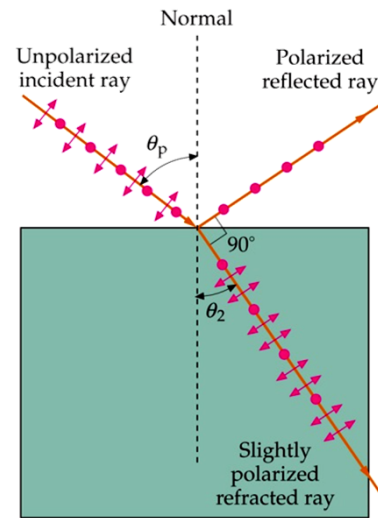


- conforme el haz original de luz solar pasa a través de la atmósfera, su intensidad disminuye a medida que su energía pasa a la luz dispersa.
- intensidad para los dos extremos del espectro visible es  $(700 \text{ nm}/400 \text{ nm})^4 = 9.4$
- en términos generales, *la luz dispersada contiene nueve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

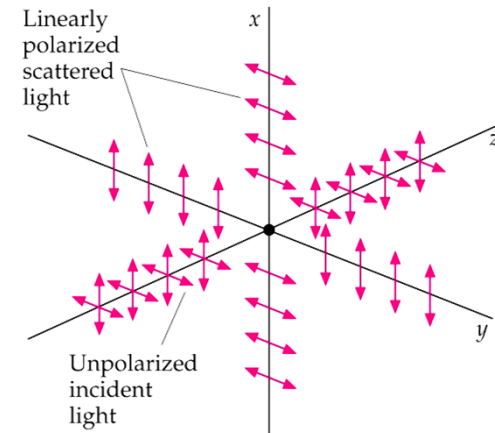
## Polarización por absorción



## por reflexión



## por dispersión o scattering



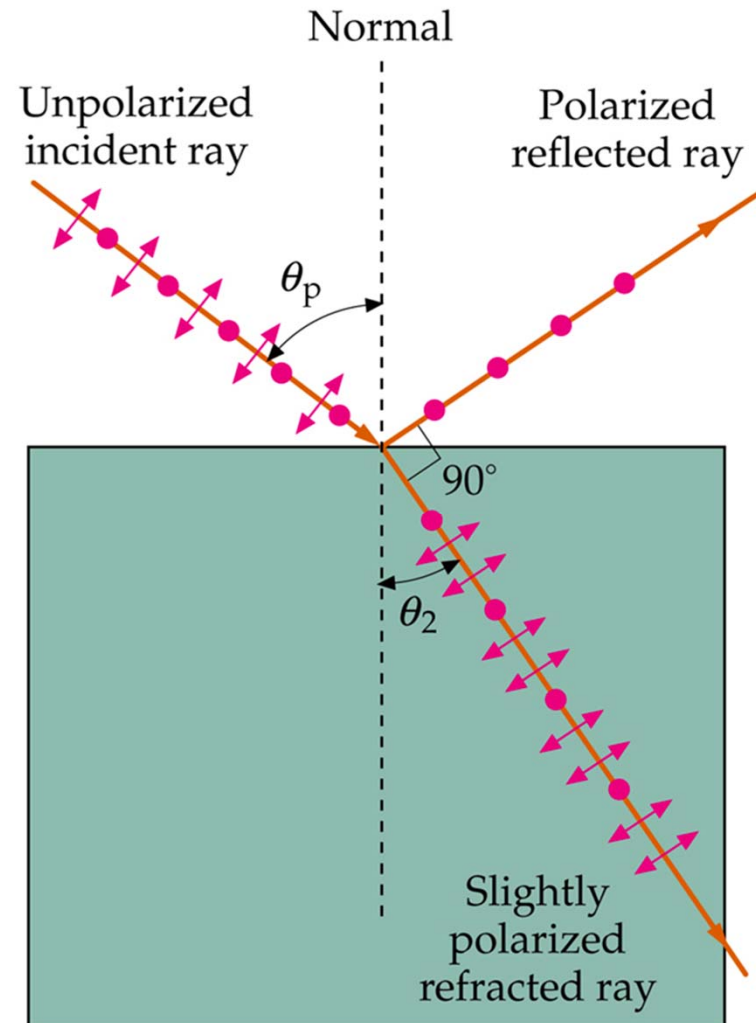
# Polarización por reflexión

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.

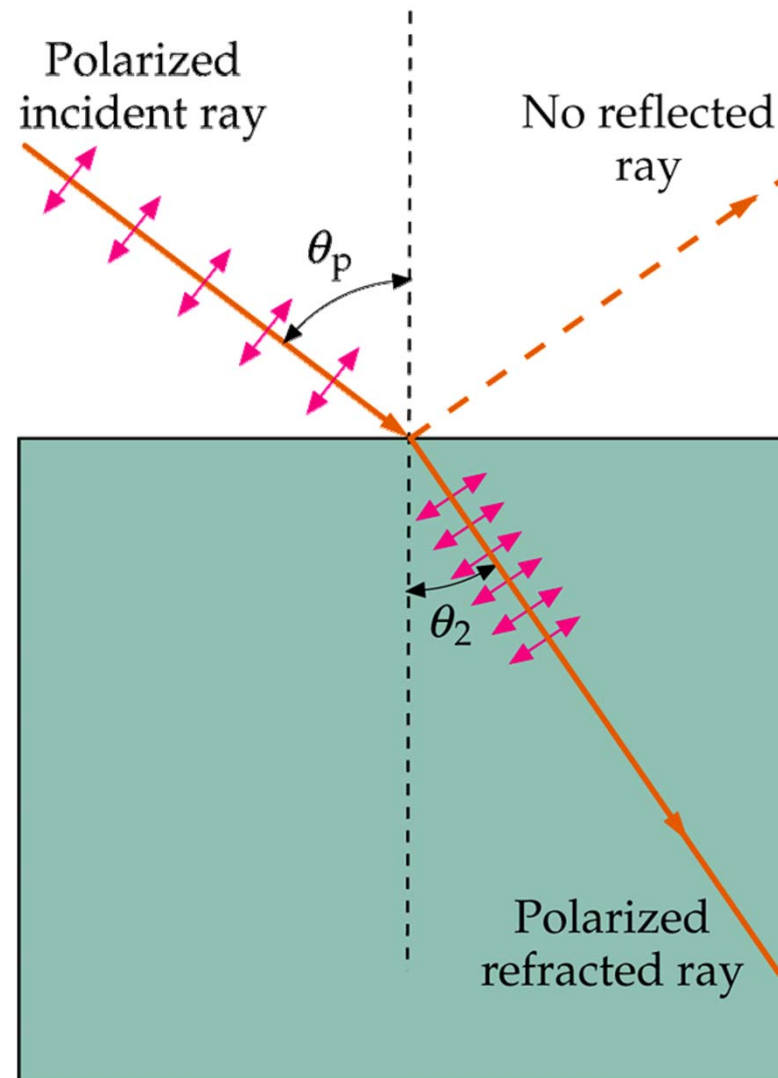
Si la incidencia se realiza con el ángulo de polarización, la luz reflejada está completamente polarizada (campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia).

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

**Ángulo de polarización o de Brewster**



# Pregunta



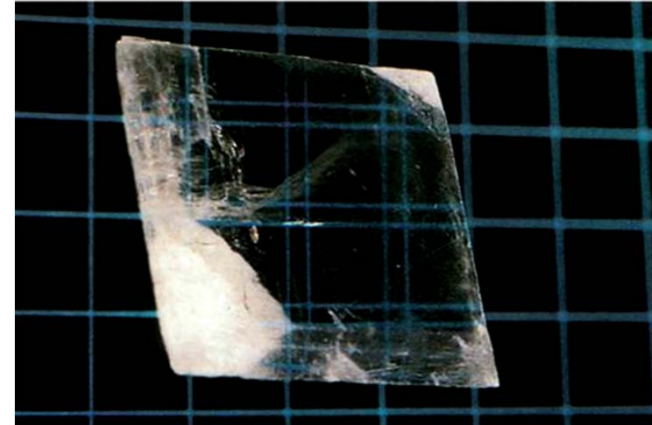
Cuando la luz incidente está polarizada en la misma dirección que el plano de incidencia, no hay rayo reflejado.

# Polarización por birrefringencia o doble refracción

Sólidos



- cristalinos
- amorfos



isótropos



anisótropos

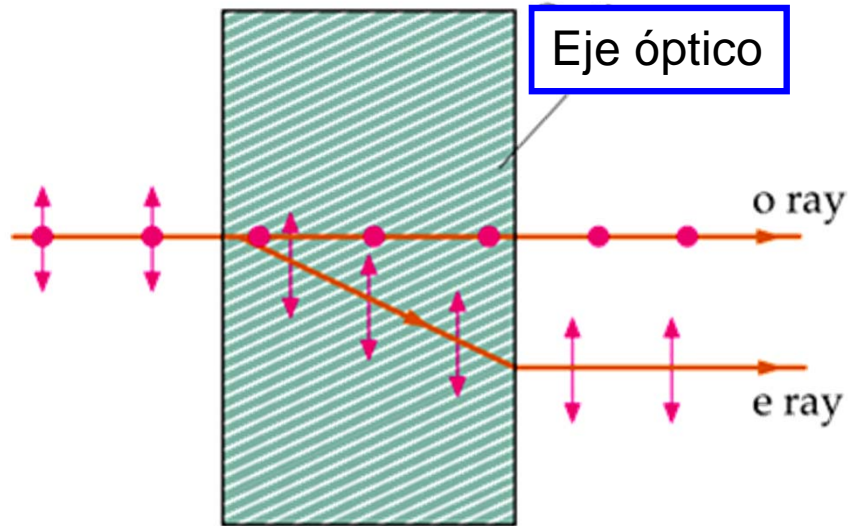


la velocidad de la luz depende del **plano de polarización** y de su **dirección de propagación** a través del material

- calcita
- cristales no cúbicos
- celofán

**birrefringencia o doble refracción**

Cuando un rayo de luz incide en un material birrefringente,



- rayo ordinario
- rayo extraordinario

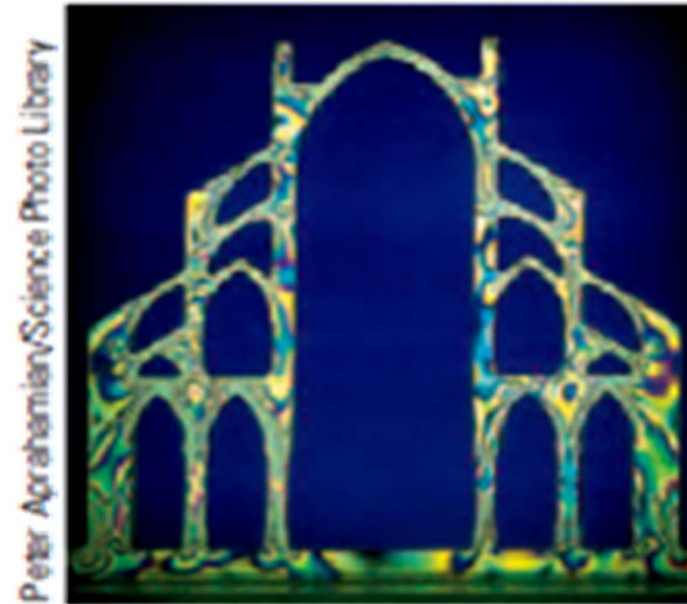
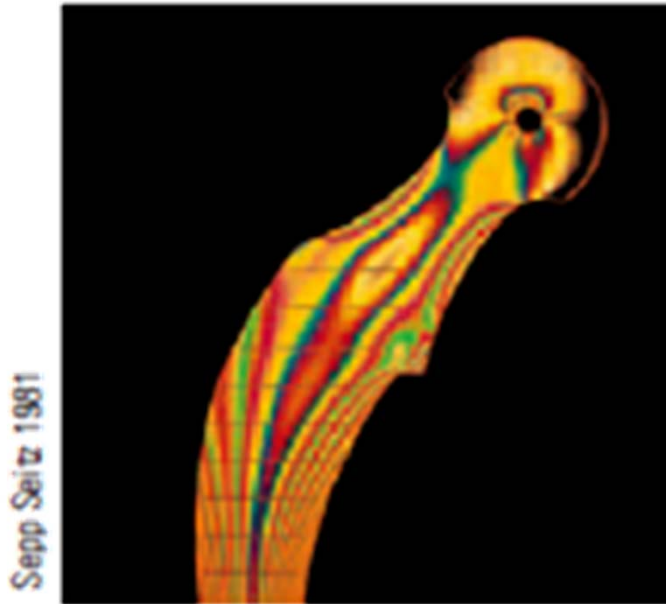


**eje óptico**, dirección en la cual ambos rayos se propagan con la misma velocidad

## 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:**  $\text{CaCO}_3$ .

**Clase:** Carbonatos.

**Sistema cristalográfico:** Trigonal.

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

## Propiedades Físicas

**Color:** Incoloro, blanco o coloreado en tonos claros.

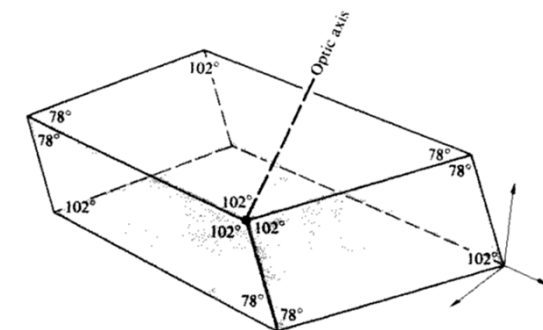
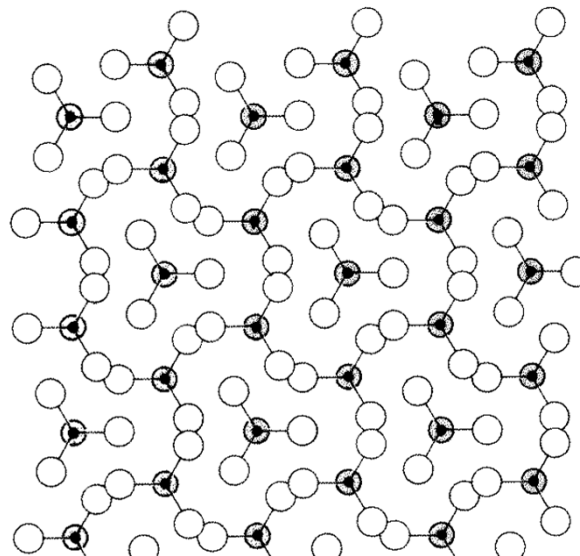
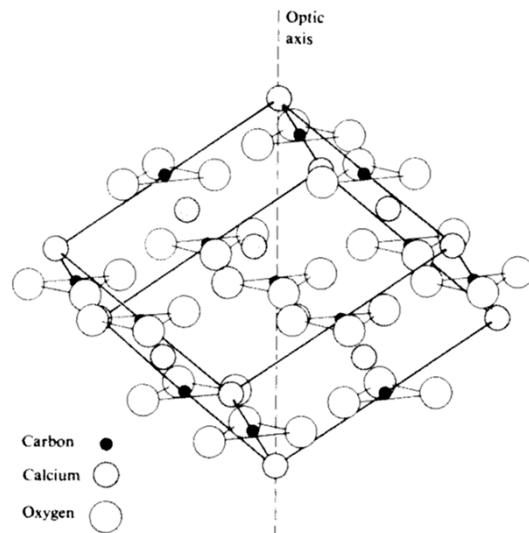
**Color de la raya:** Blanco

**Brillo:** Vítreo, nacarado o mate en variedades cristalinas.

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

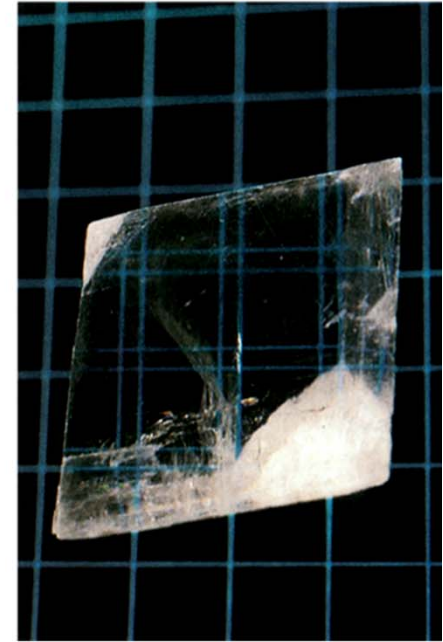
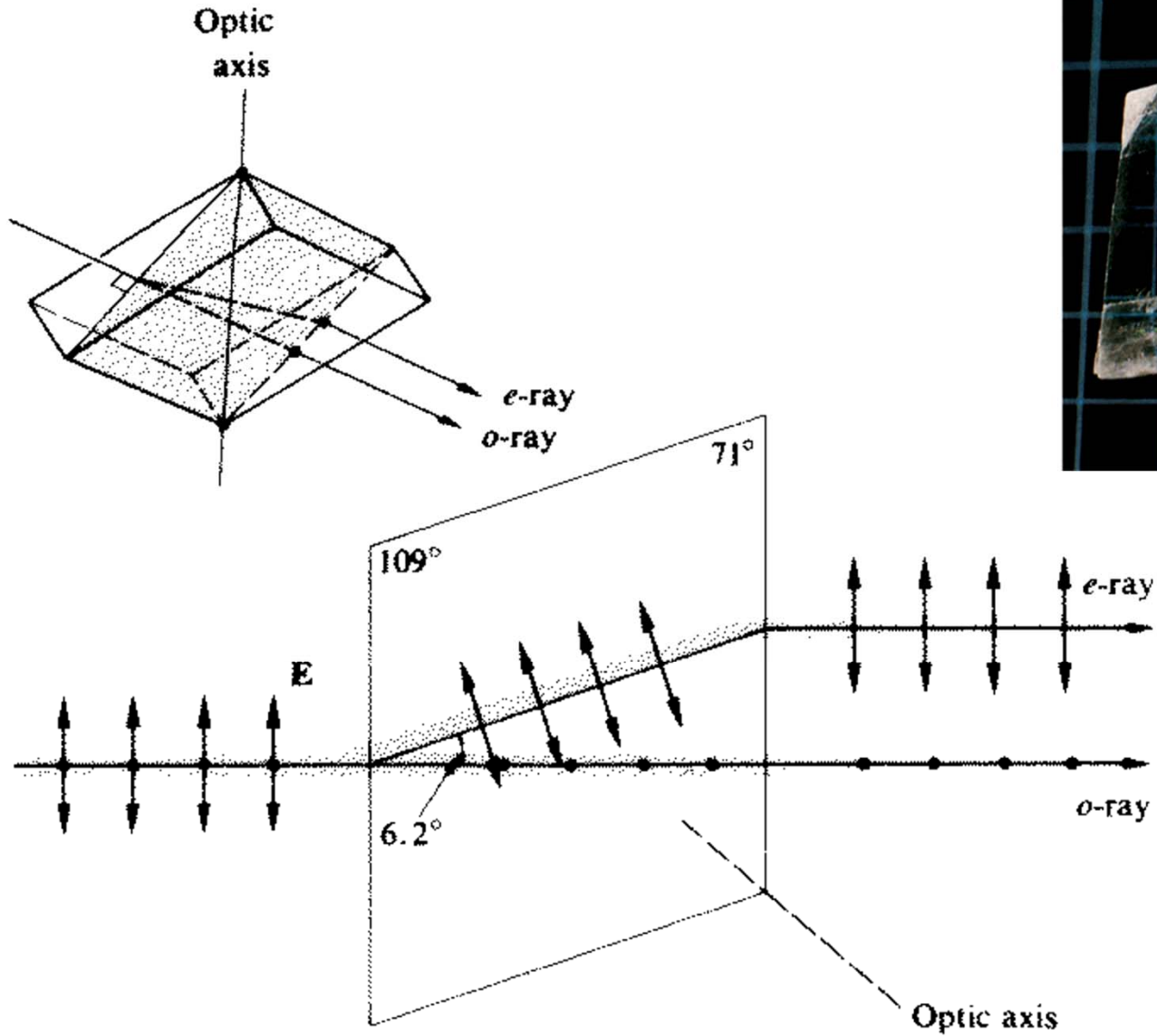
**Densidad:**  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (Entre ligero y poco pesado).

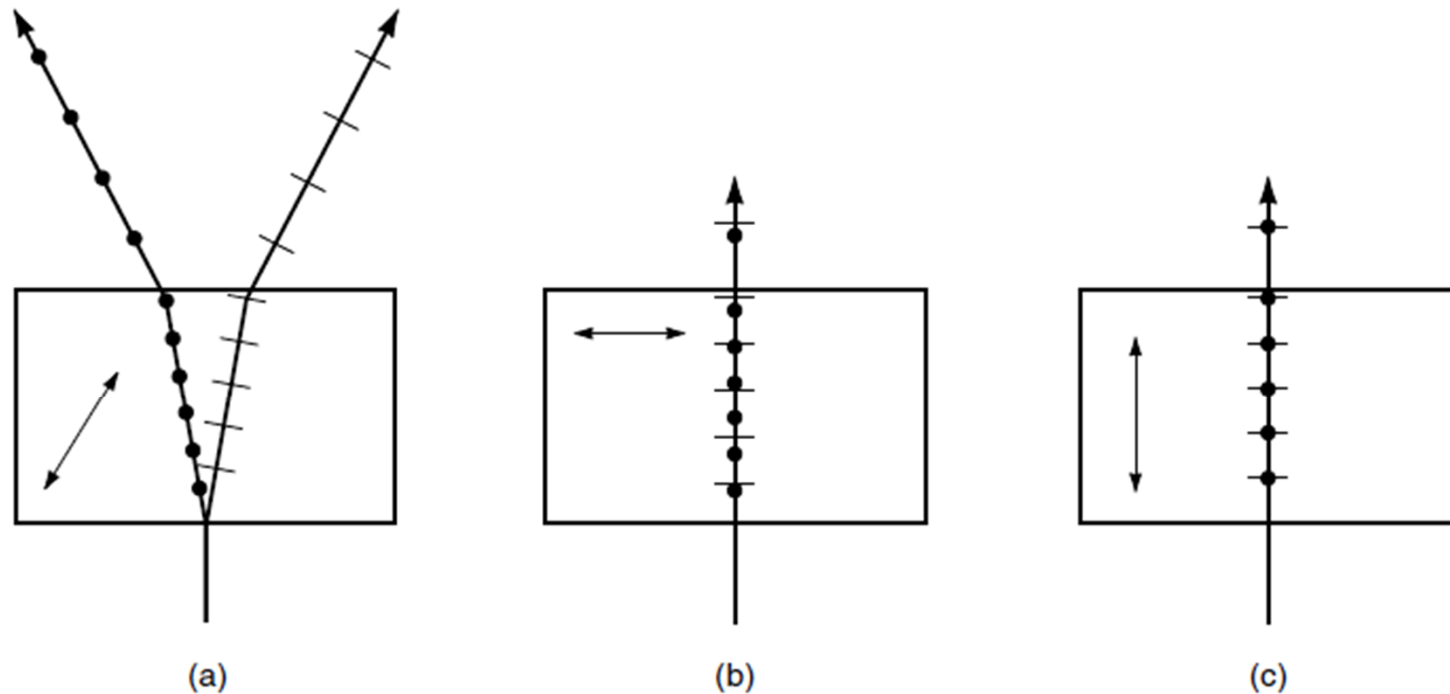
**Lugar:** India, México, Sudáfrica.





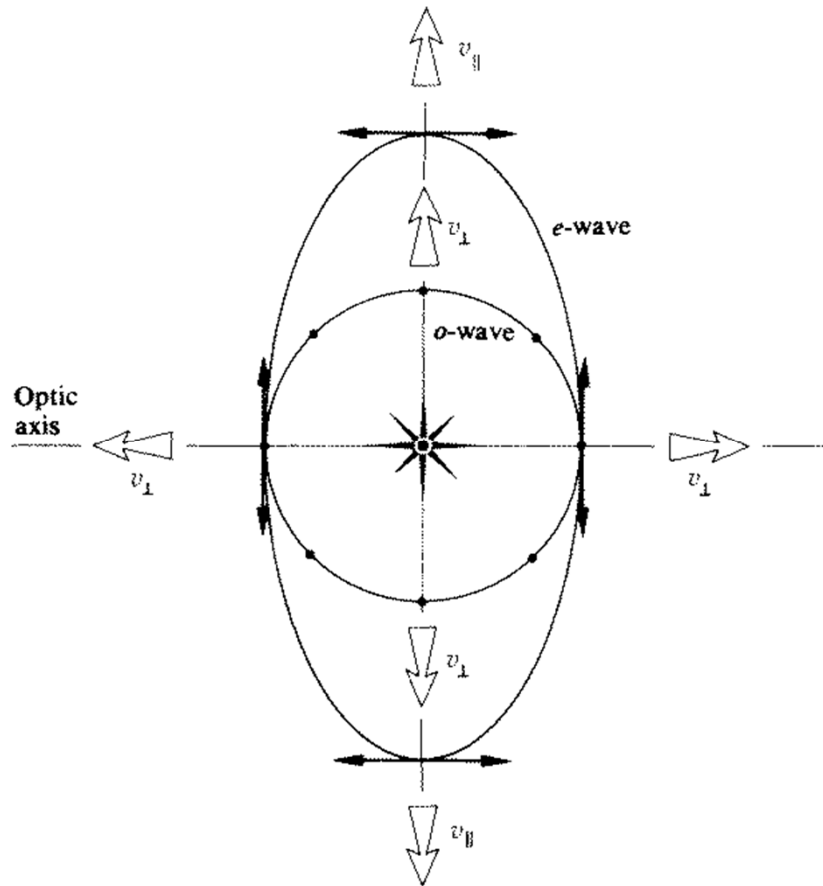
Cuando la luz atraviesa un cristal de calcita





**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.



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

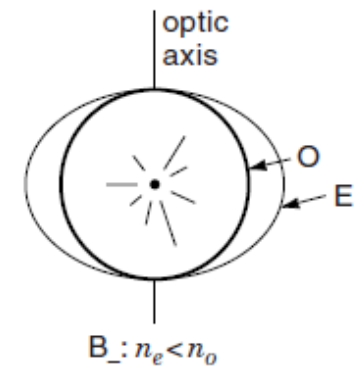
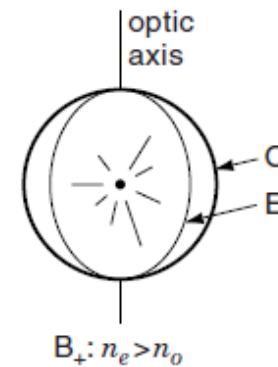
$$n_e \equiv c/v_{\parallel}$$

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

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

**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 ( $\text{CaCO}_3$ )	1.658	1.486	1.116
Quartz ( $\text{SiO}_2$ )	1.544	1.553	0.994
Sodium nitrate ( $\text{NaNO}_3$ )	1.587	1.336	1.188
Sodium sulfite ( $\text{NaSO}_3$ )	1.565	1.515	1.033
Zinc chloride ( $\text{ZnCl}_2$ )	1.687	1.713	0.985
Zinc sulfide ( $\text{ZnS}$ )	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**,  $\Delta\varphi = \pi/2$



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

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

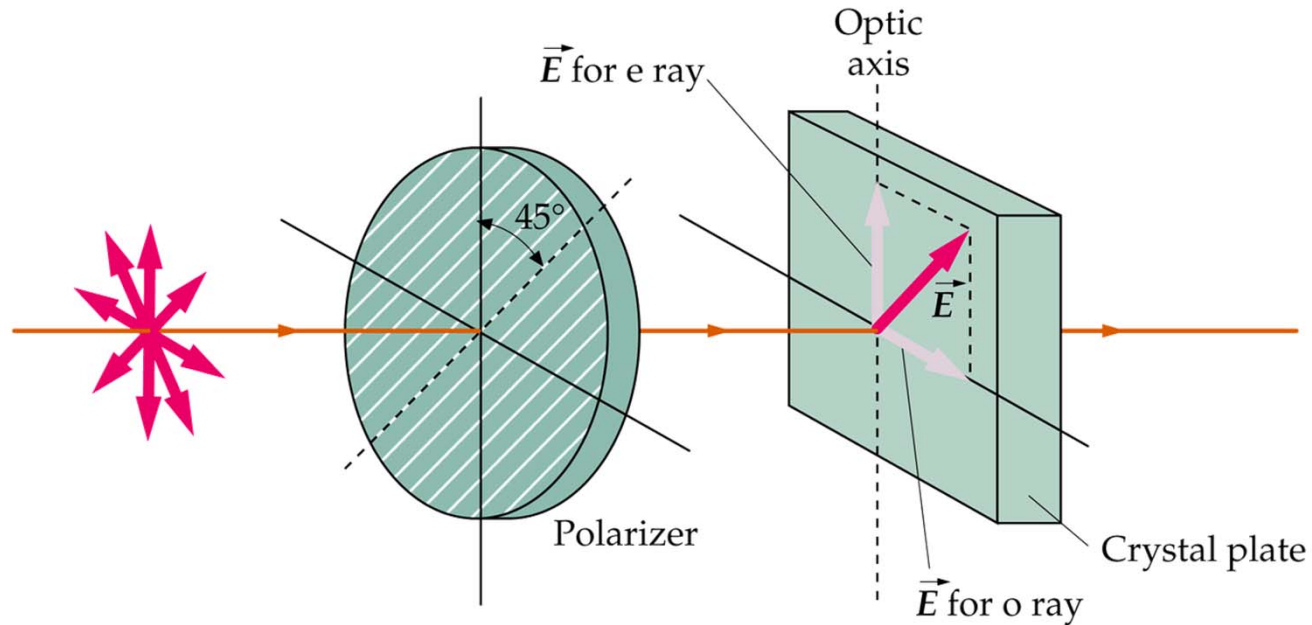
$$d = 140 \text{ nm}, \lambda = 560 \text{ nm}$$

✓ **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**

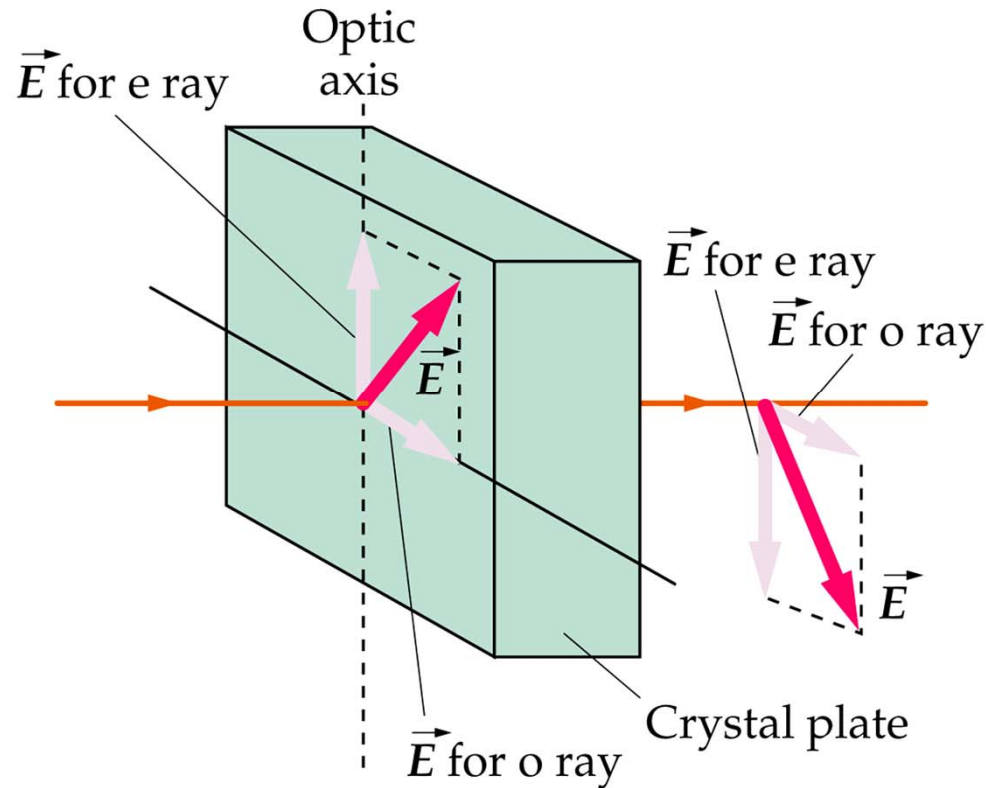
$$\Delta\varphi = \pi/2$$

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

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

*onda polarizada circularmente*

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



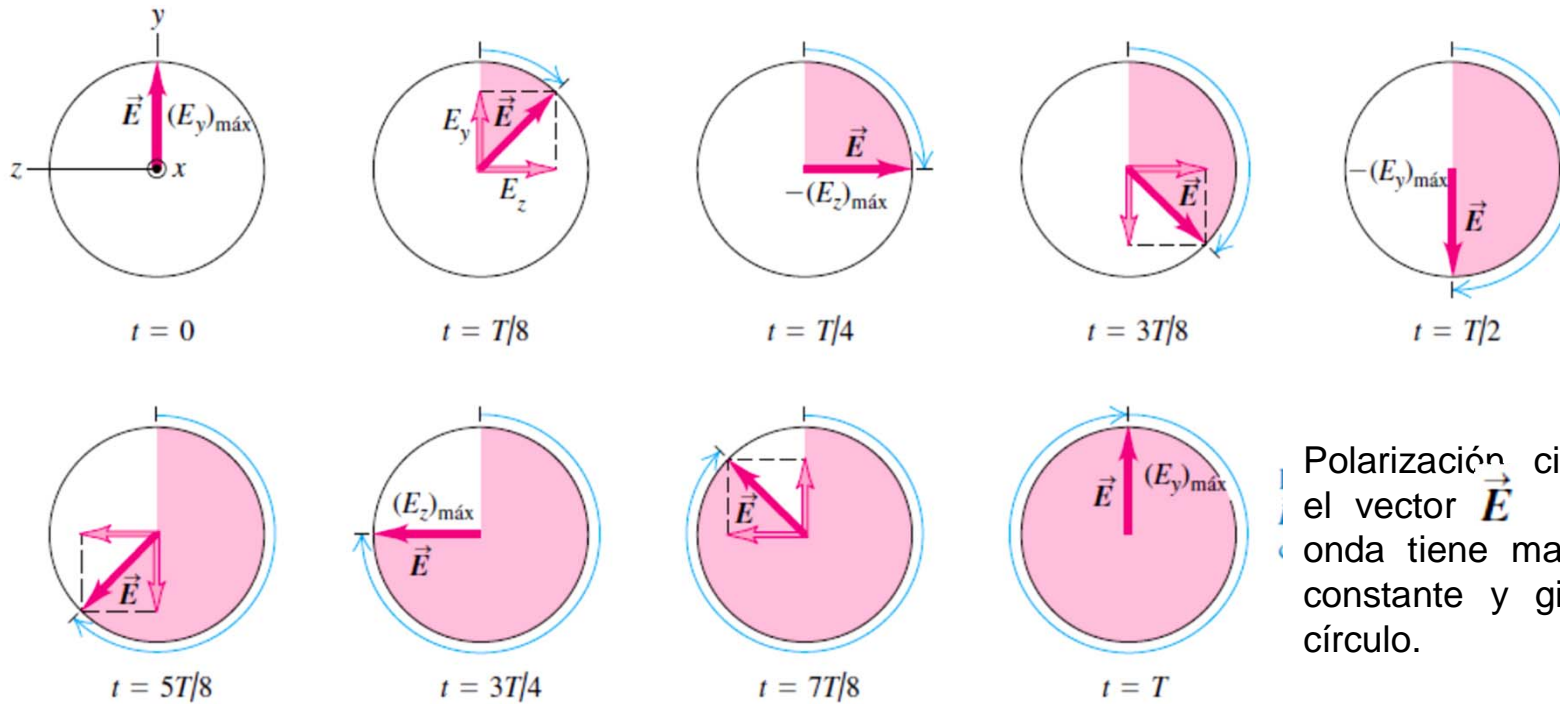
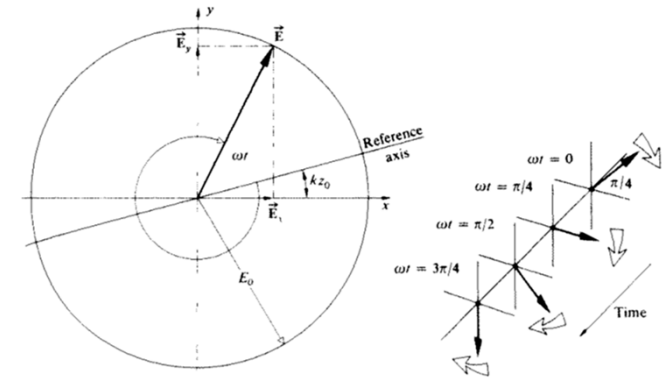
$$\Delta\varphi = \pi,$$

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

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

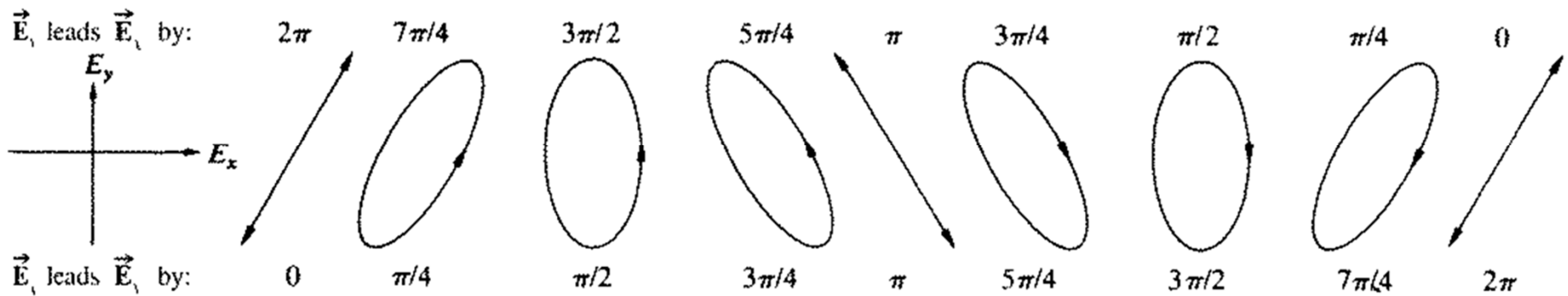
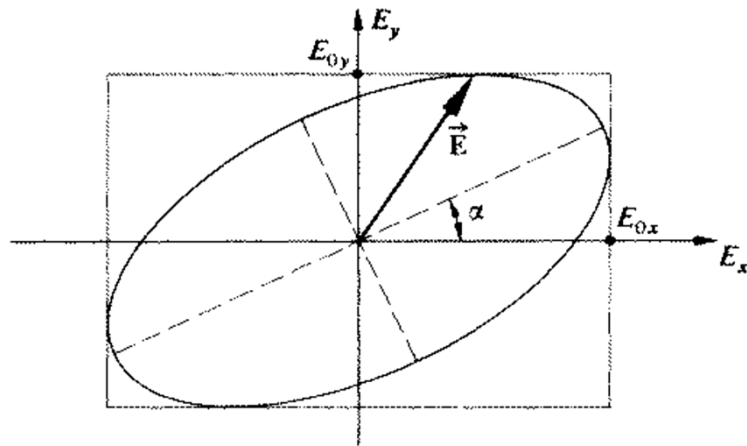
**la dirección de polarización de la onda ha girado  $90^\circ$**

**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**.





## **TEMAS RELACIONADOS A MICROSCOPIAS**

**BREWSTER  
POLARIZACIÓN**