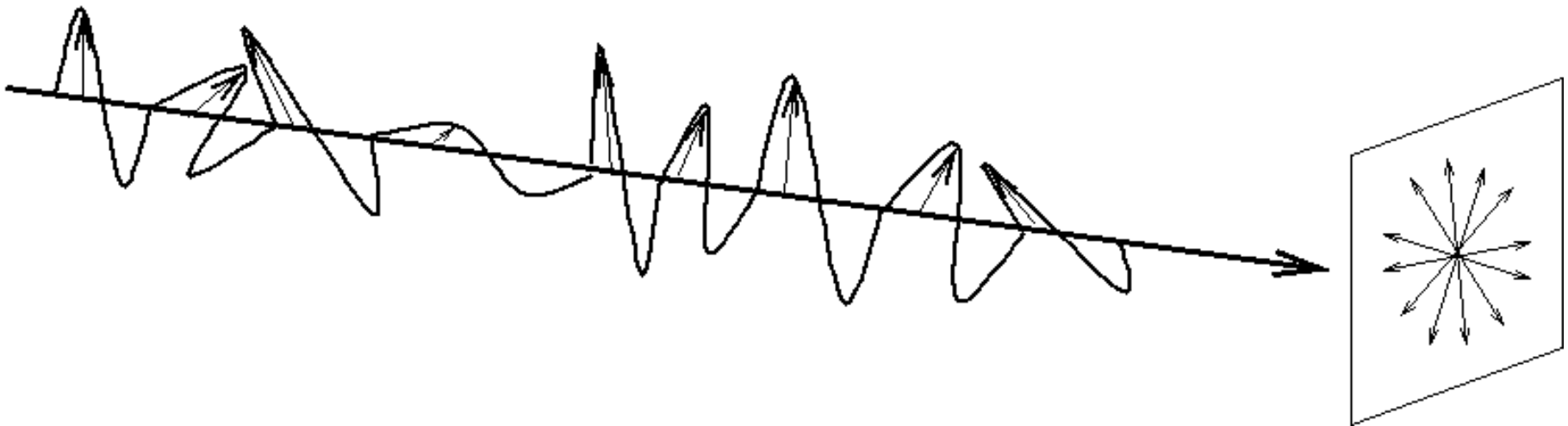


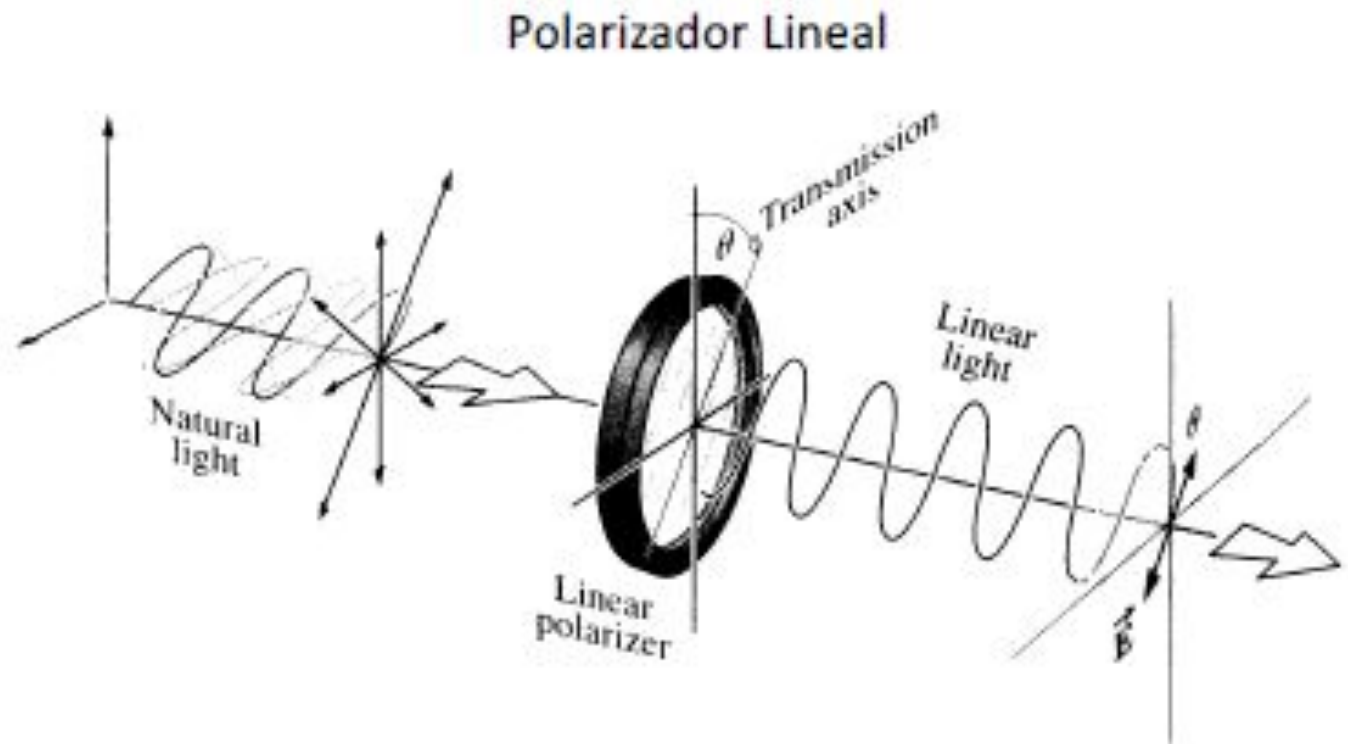
# Luz Natural o no polarizada

- Una fuente de luz natural consiste de un número muy grande de emisores atómicos orientados aleatoriamente.
- Cada átomo emite luz polarizada durante aproximadamente  $10^{-8}$  s.
- Todas las fuentes que emiten a la misma frecuencia se combinan para dar una resultante que mantiene su polarización por no más de  $10^{-8}$  s.
- Luego seguirán trenes con una polarización diferente e impredecible.
- En escalas temporales mayores se habrán observado todas las polarizaciones posibles.

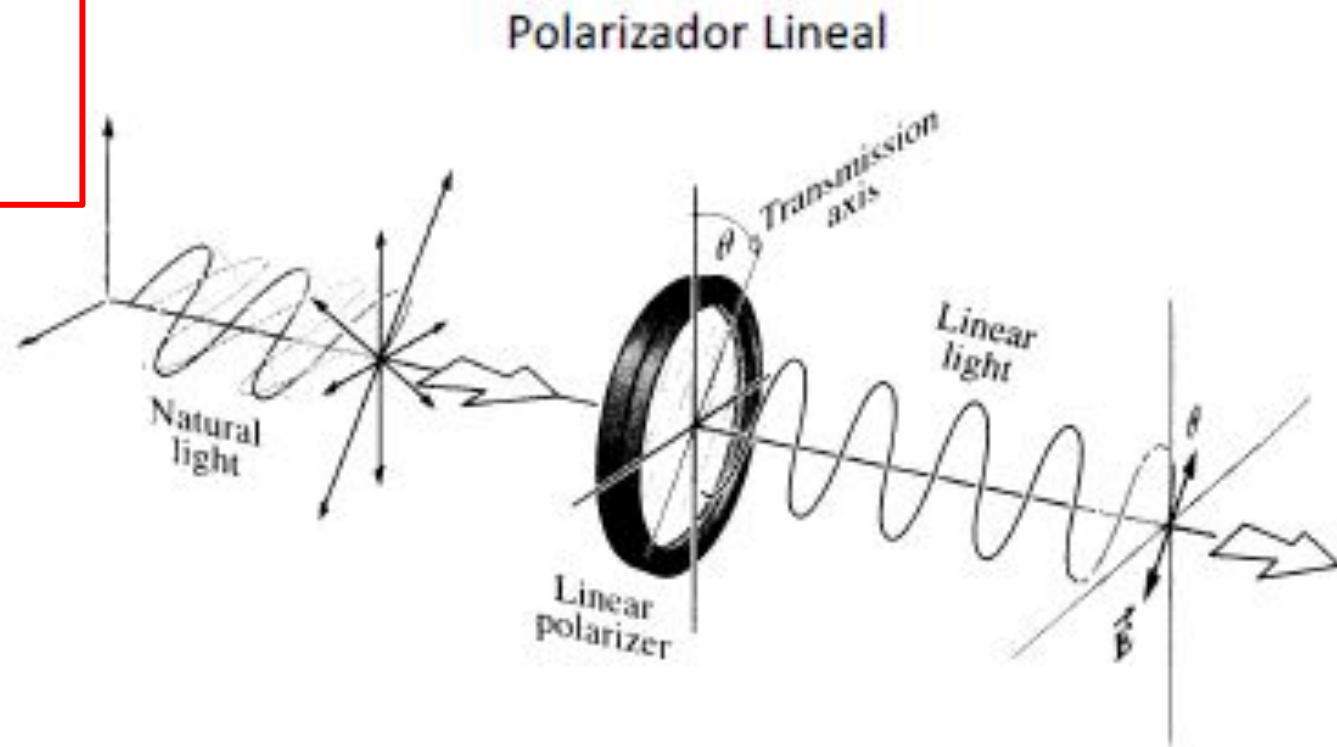


# Polarizadores

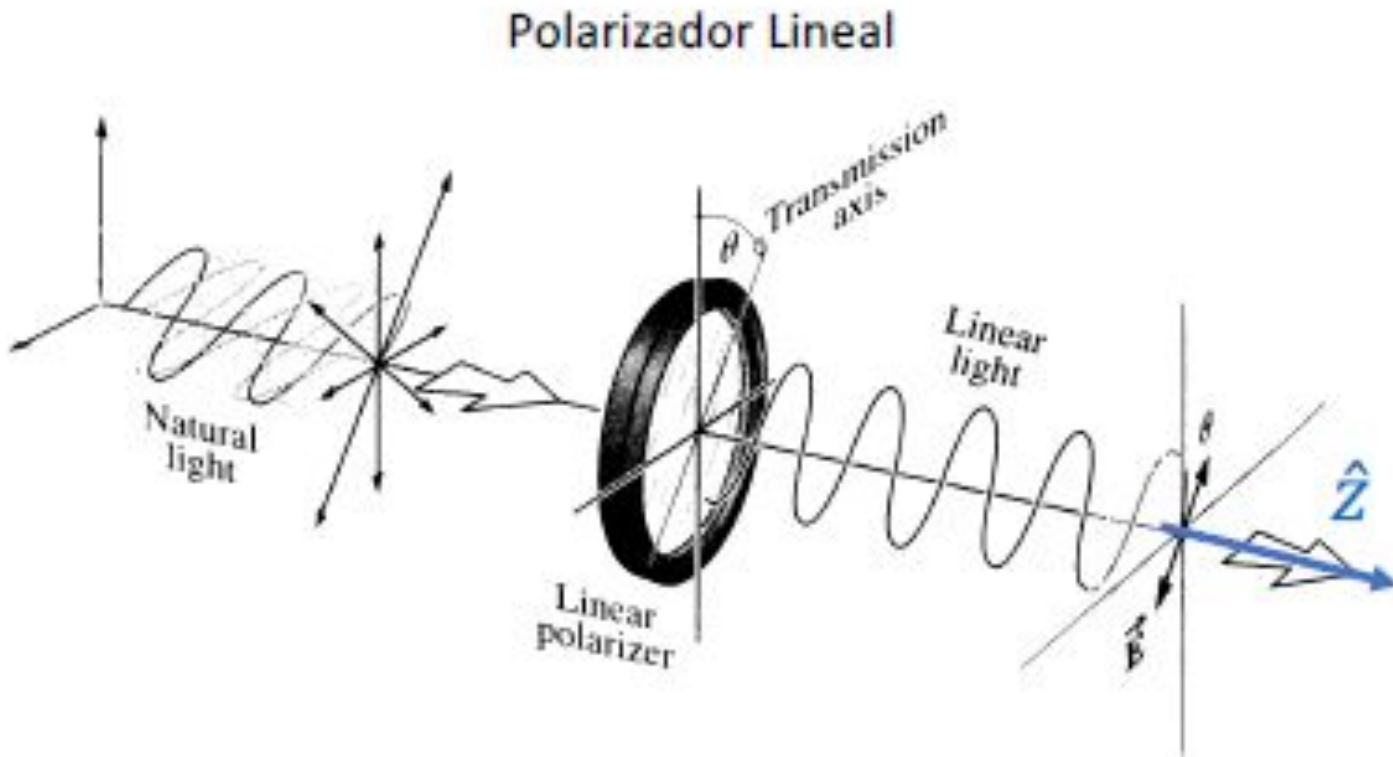
- Instrumento por el que ingresa luz no polarizada y del que sale luz polarizada.
- Se basan en efectos tales como
  - Dicroísmo
  - Reflexión
  - Dispersión
  - Birrefringencia



- Un **polarizador lineal** se caracteriza por **dejar pasar** sólo la componente del campo eléctrico en la dirección del **eje de transmisión**
- Esto equivale a decir que:  
**toda componente perpendicular al eje de transmisión será bloqueada.**

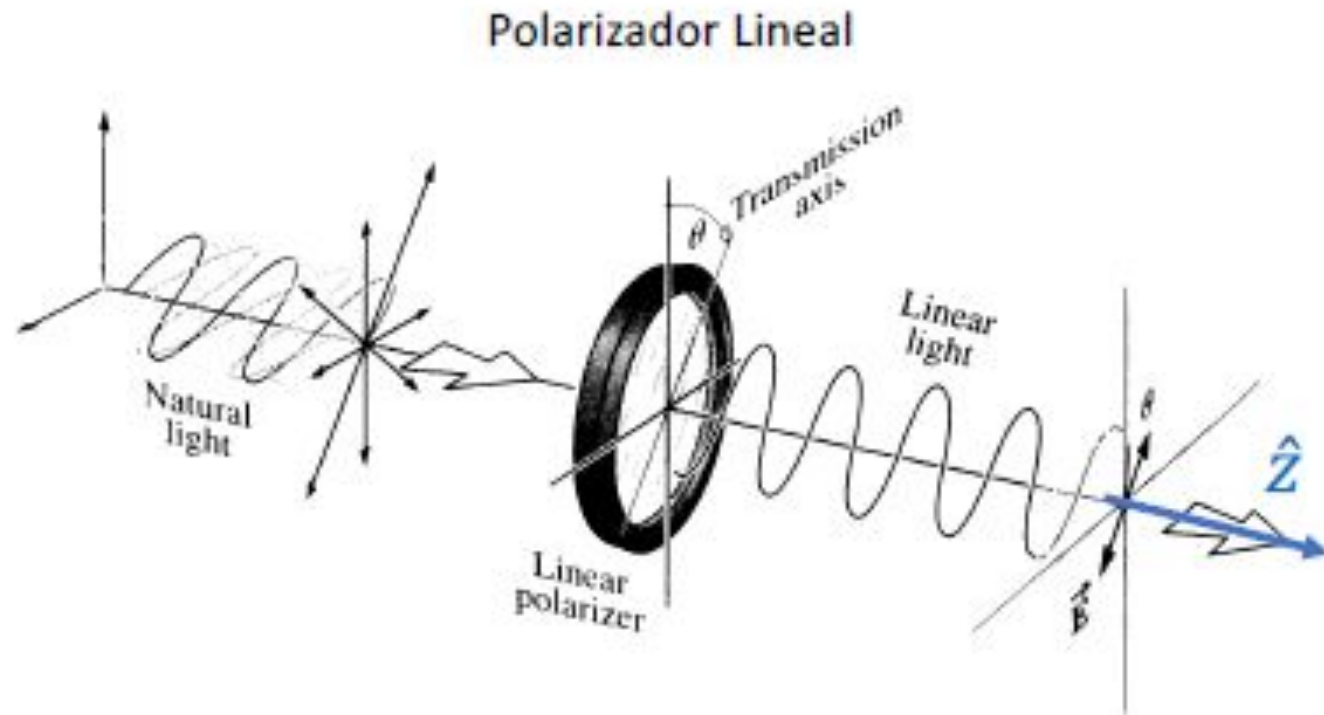


# Ley de Malus

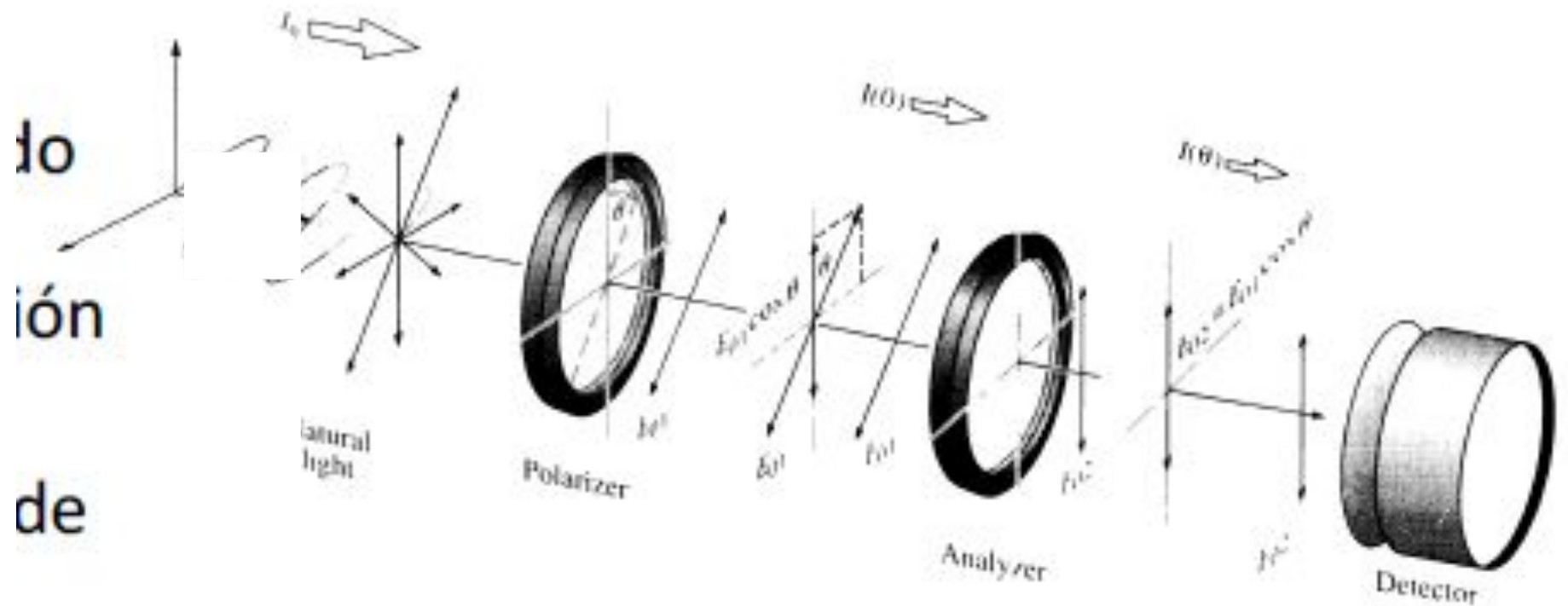


- ¿Cómo nos damos cuenta que un haz de luz es polarizado linealmente?
- La luz natural consta de trenes polarizados mas o menos equitativamente en todas las direcciones
- Si rotamos el polarizador lineal alrededor del eje  $\hat{z}$  el detector de irradiancia no va a detectar cambios.

- Experimento: La luz natural incide sobre un polarizador lineal.
- La luz natural consta de trenes polarizados mas o menos equitativamente en todas las direcciones.
- Si rotamos el polarizador lineal alrededor del eje  $\hat{z}$  el detector de irradiancia no va a detectar cambios.



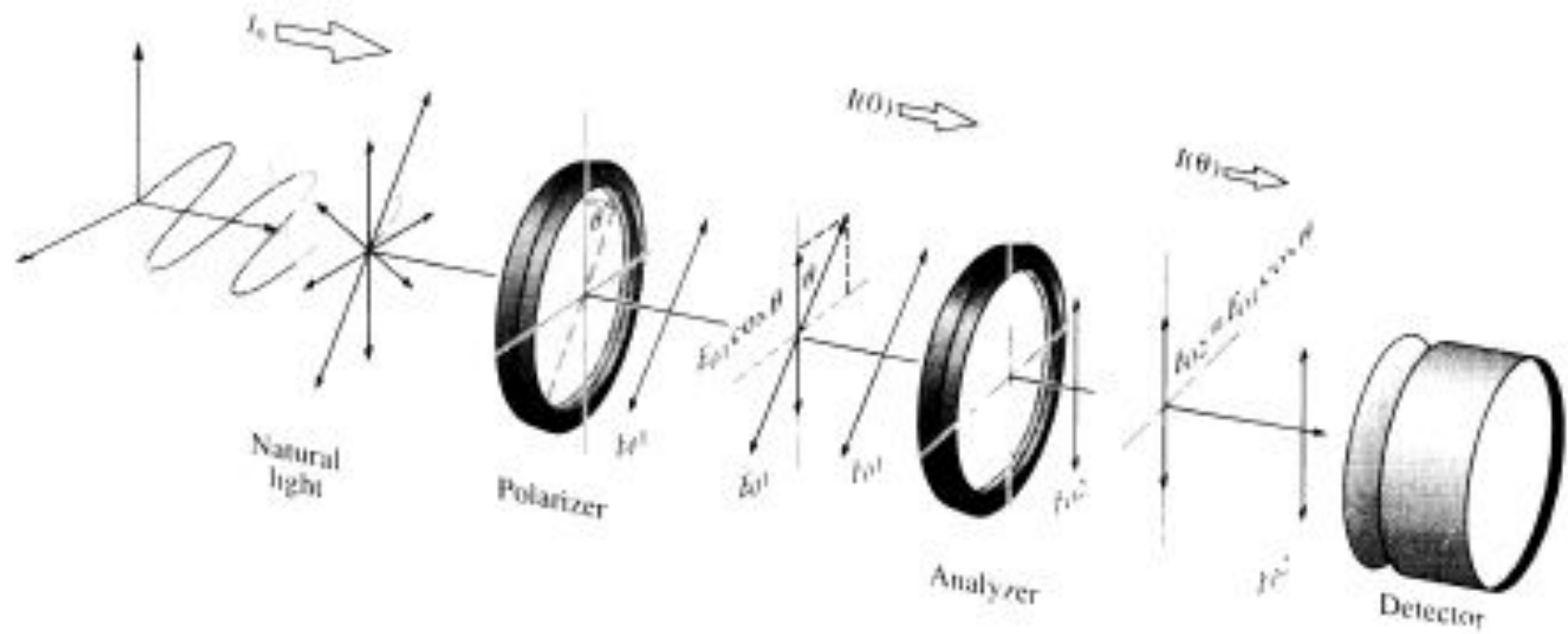
- Supongamos que agregamos otro polarizador lineal (ANALIZADOR) con su eje de transmisión en la dirección vertical.
- Supongamos que el eje de transmisión del primer polarizador forma un ángulo  $\theta$  con la vertical:



- Supongamos que la amplitud del campo eléctrico transmitido por el primer polarizador es  $E_{01}$ ,
- La componente a lo largo del analizador será:

$$E_{01} \cos \theta$$

- La irradiancia en el detector será entonces:



$$I(\theta) = \frac{c\epsilon_0}{2} E_{01}^2 \cos^2 \theta$$

# Ley de Malus: Resumen

- Entonces la irradiancia luego del analizador queda

$$I(\theta) = I(0) \cos^2 \theta$$


$$I(0) = c\epsilon_0 E_{01}^2 / 2$$

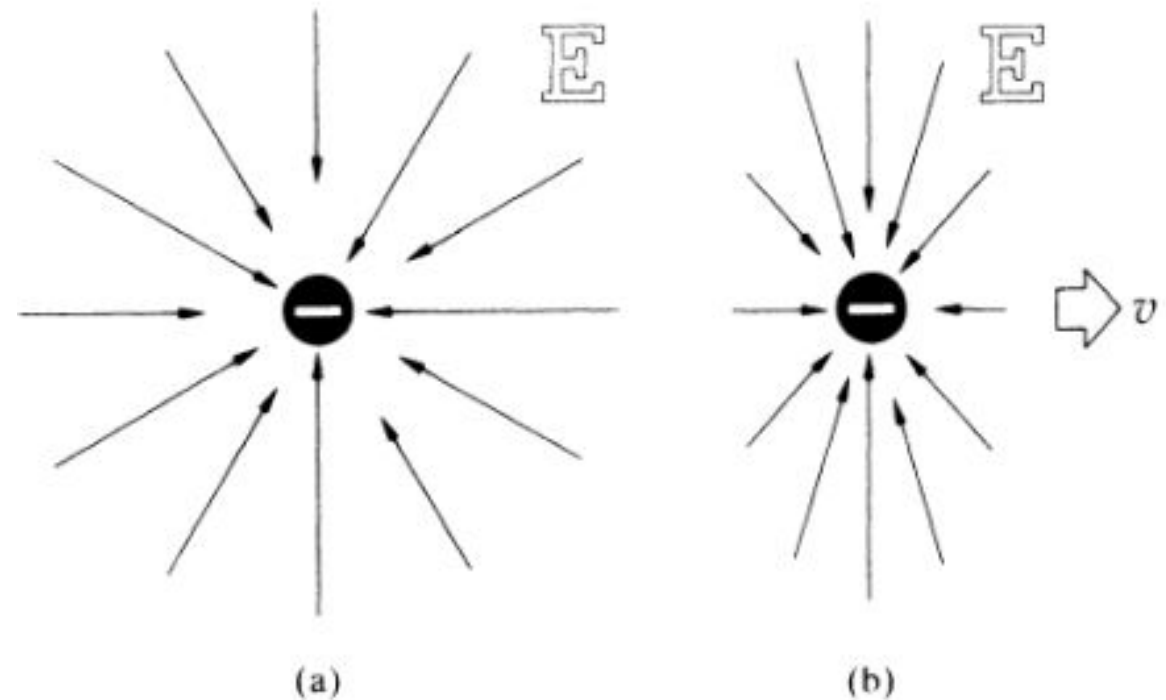


# Conceptos Básicos de Radiación

En la primer parte de la materia aprendimos:

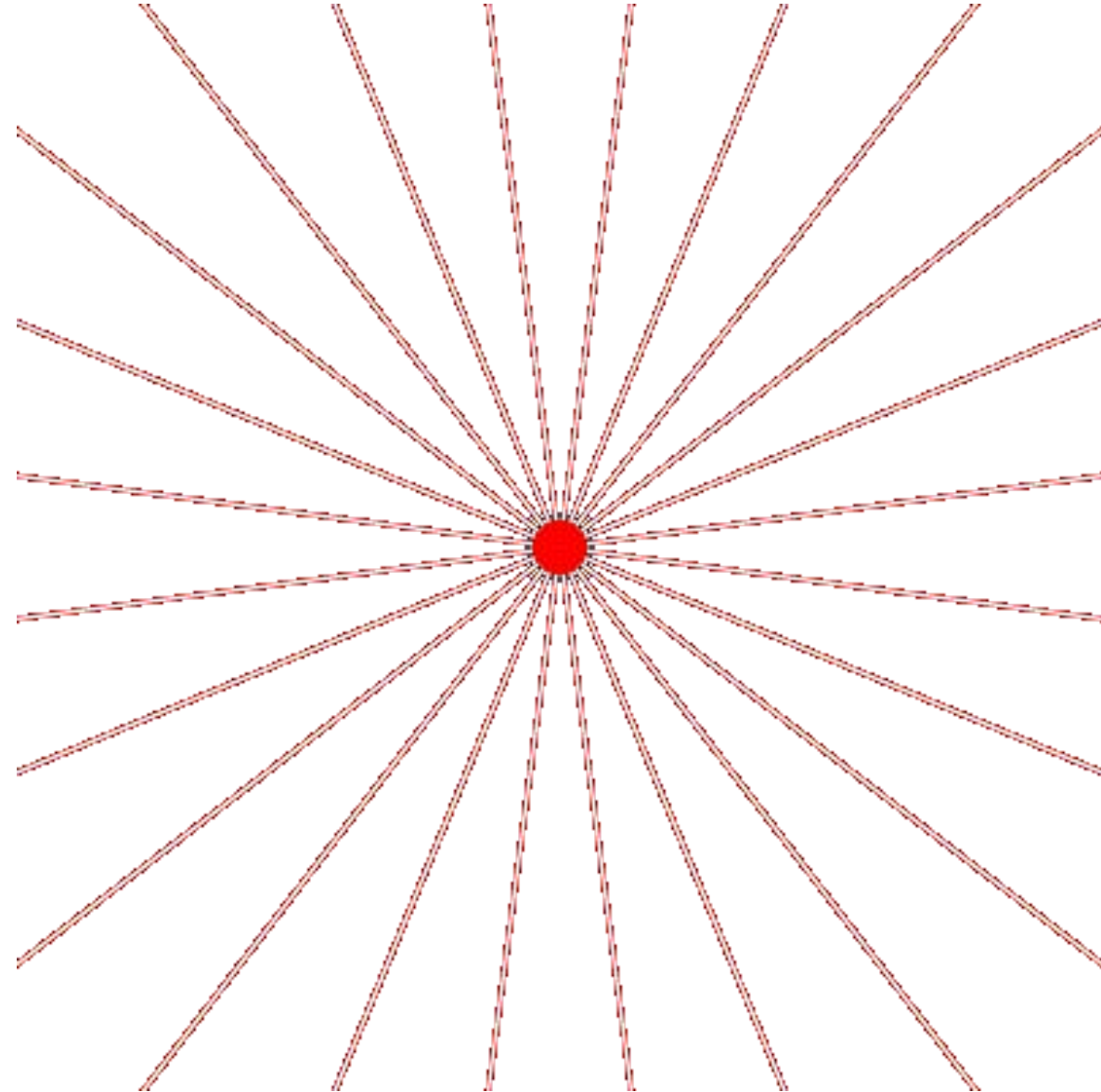
1) Las cargas en reposo generan campos eléctricos.

2) Las cargas en movimiento uniforme generan campos magnéticos estacionarios

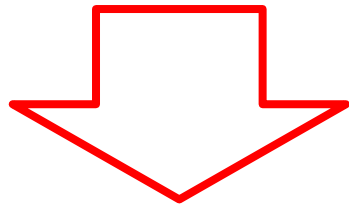


# ¿Y si además de moverse se acelera?

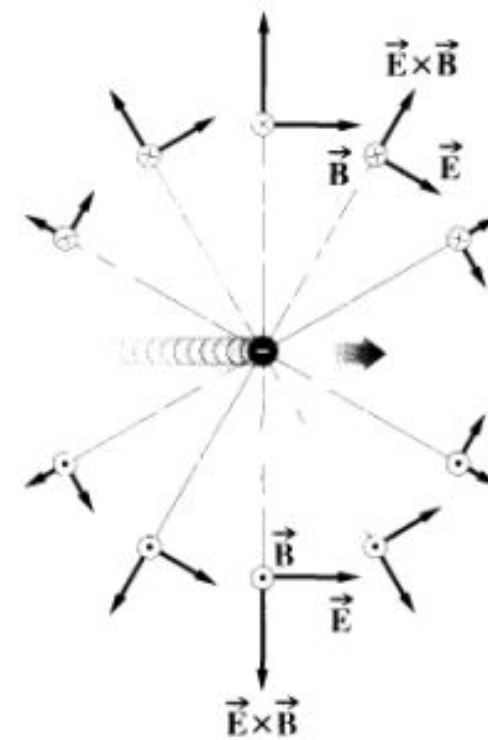
- Cuando una carga se acelera se genera un pulso eléctrico y magnético que se propaga llevando la información sobre la aceleración de la carga.



Cuando una carga se acelera se genera un pulso eléctrico y magnético que se propaga llevando la información sobre la aceleración de la carga.

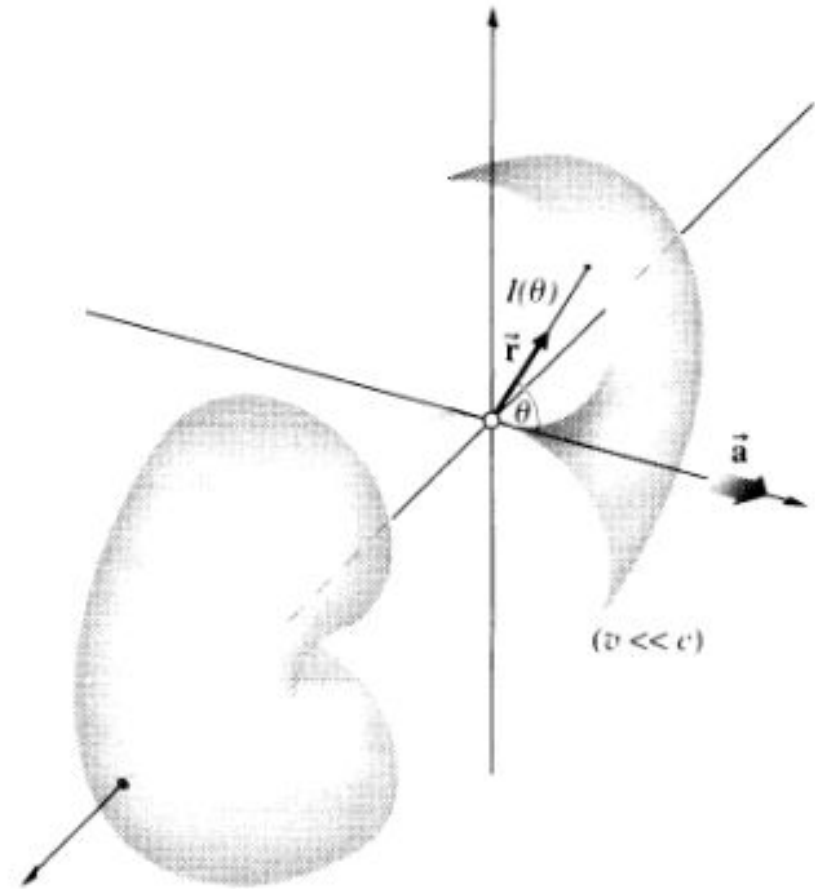


Los campos variables viajeros así generados conforman **la radiación**.



# Conceptos Básicos de Radiación

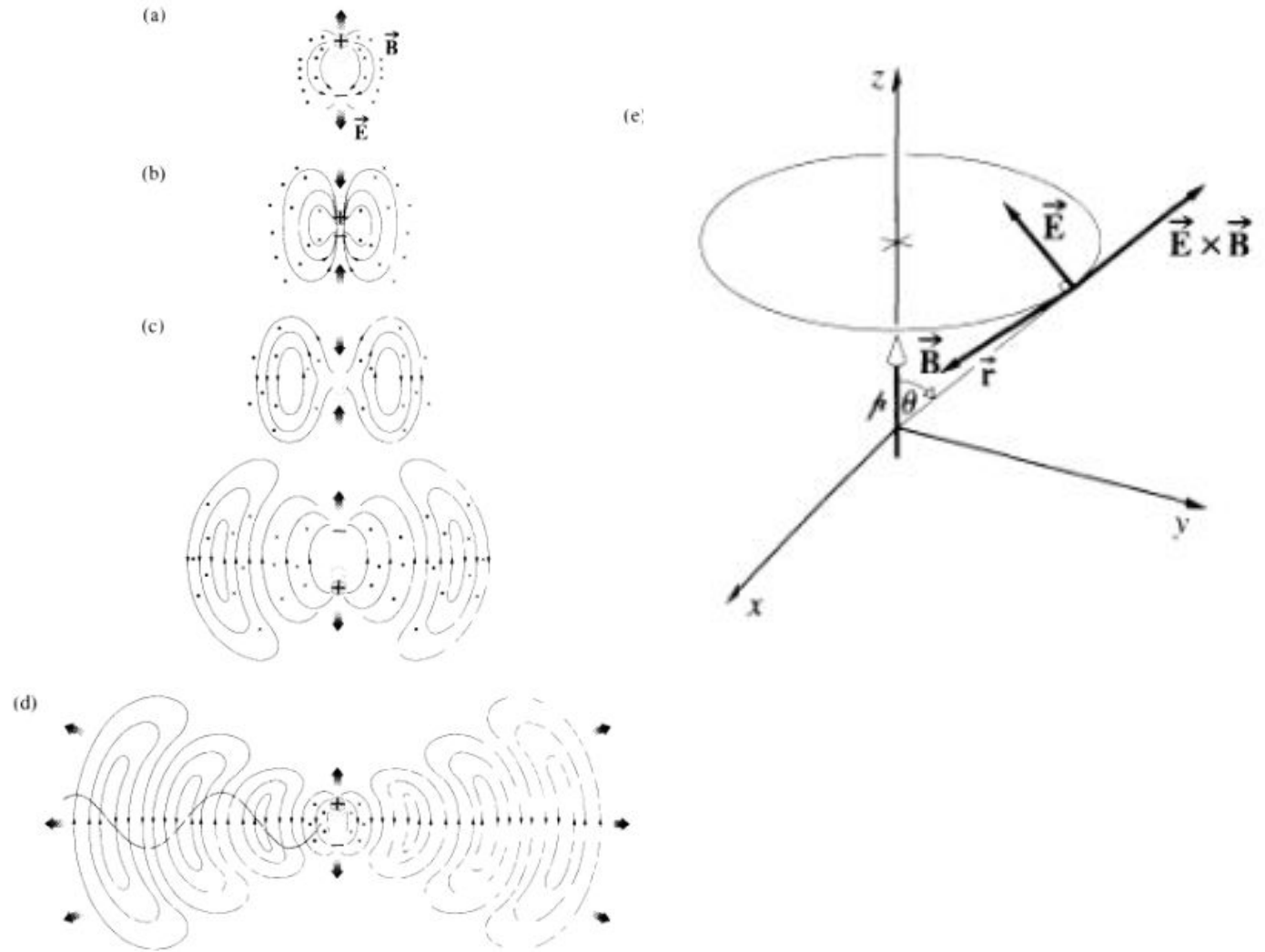
- Cuando una carga se acelera se genera un pulso eléctrico y magnético que se propaga llevando la información sobre la aceleración de la carga.
- Los campos variables así generados conforman la radiación.
- Lejos de la carga es posible demostrar que la radiación se emite mayormente en la dirección perpendicular a la aceleración.



# Radiación dipolar eléctrica (antena)

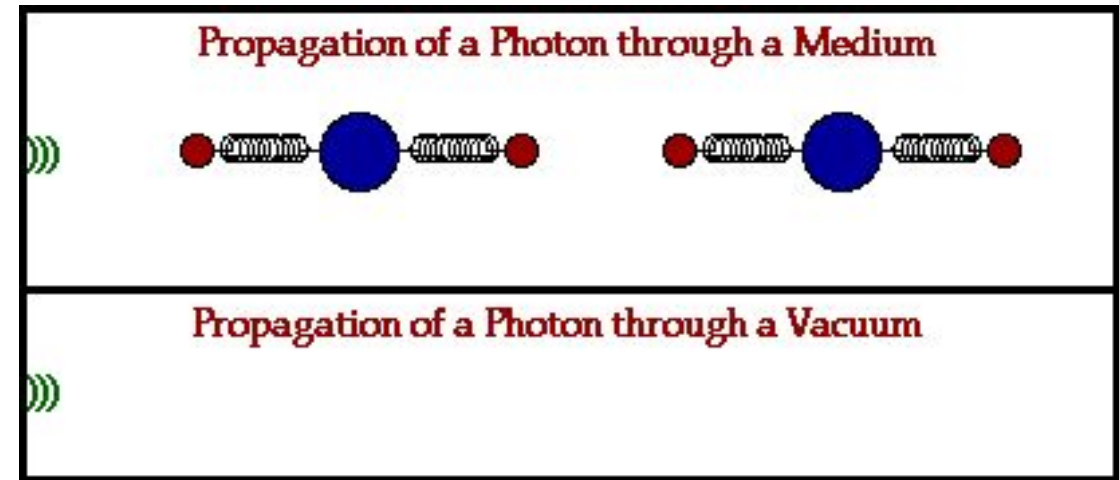
- La forma más simple de radiación proviene de la oscilación a frecuencia  $\omega$  de dipolos eléctricos.
- Los electrones se mueven más rápido que los núcleos.
- Lejos del dipolo el campo eléctrico se aproxima por:

$$E = \frac{\mu_0 k^2 \sin \theta \cos (kr - \omega t)}{4\pi\epsilon_0 r}$$

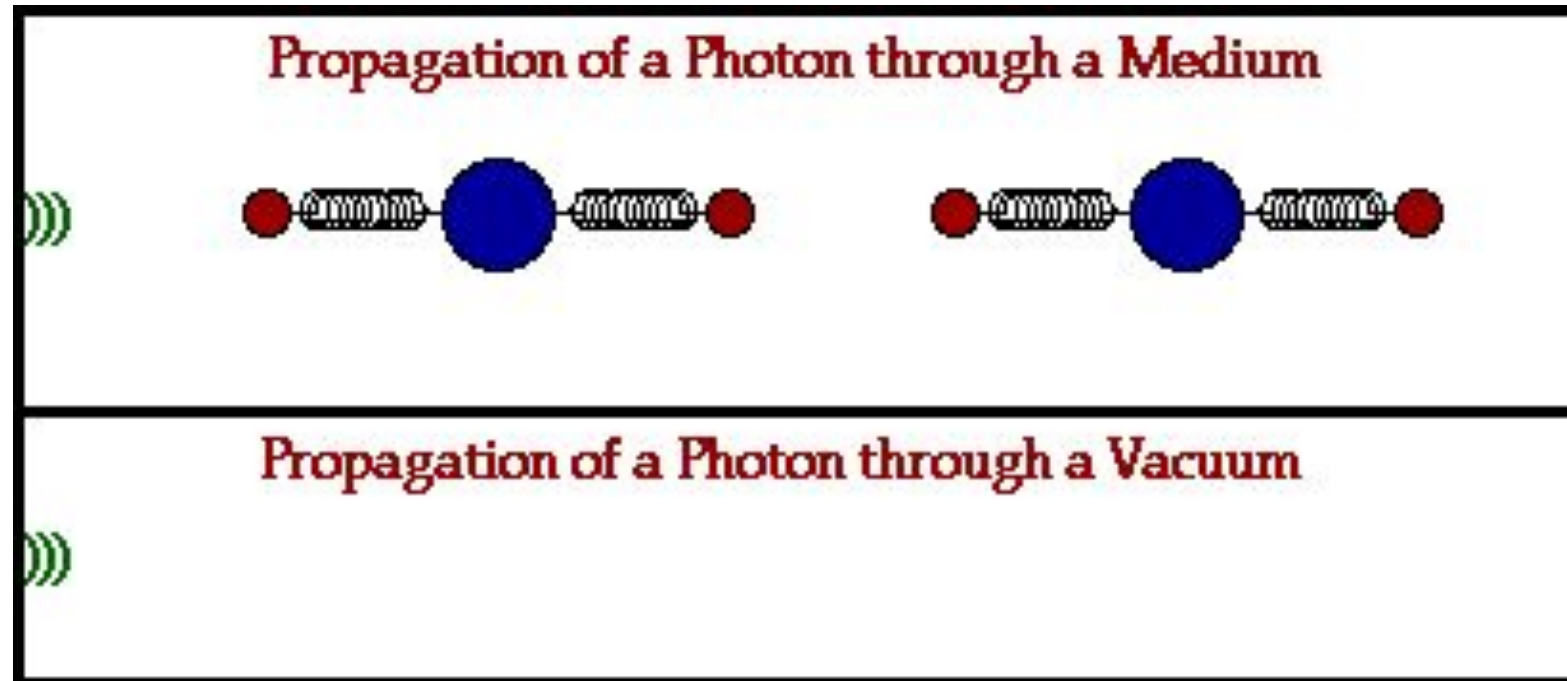


# Propagación de la luz en medios transparentes

- Muchas sustancias transparentes cristalinas son ópticamente anisotrópicas.
- Esta anisotropía resulta en diferentes propiedades ópticas para distintas direcciones del campo eléctrico de una onda luminosa.
- Esto sucede por la manera en la que se propaga la luz en un medio transparente.

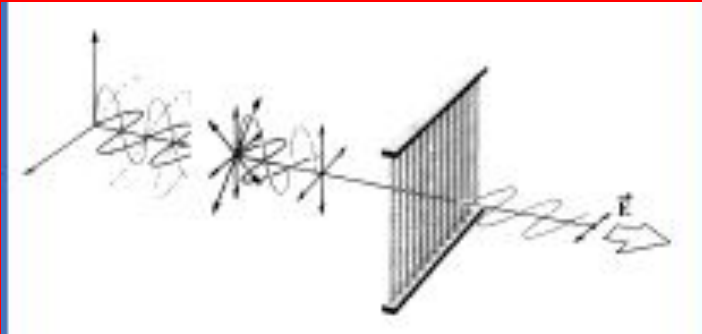


- El campo eléctrico de la onda de luz acelera los electrones de los átomos.
- Estos, se moverán aceleradamente en respuesta al campo eléctrico de la onda y a las fuerzas eléctricas que lo unen al átomo
- Al estar acelerados, los electrones emiten radiación, la cual a su vez acelera electrones vecinos.



# Polarización por Dicroísmo:

Absorción selectiva de una componente de un haz incidente a lo largo de una sola dirección



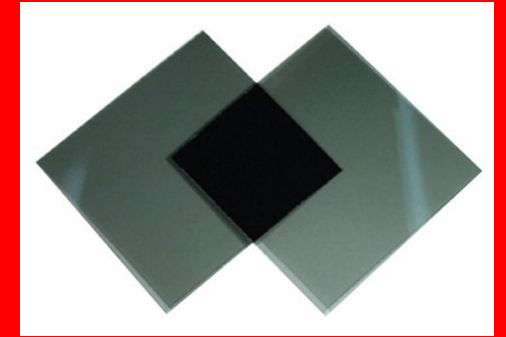
## **Polarizador de rejilla**

Conjunto de alambres en una misma dirección. Eje de transmisión es perpendicular a los alambres



## **Cristales dicroicos**

Compuestos anisótropos en su estructura cristalina. Ejemplo: turmalina (silicatos)



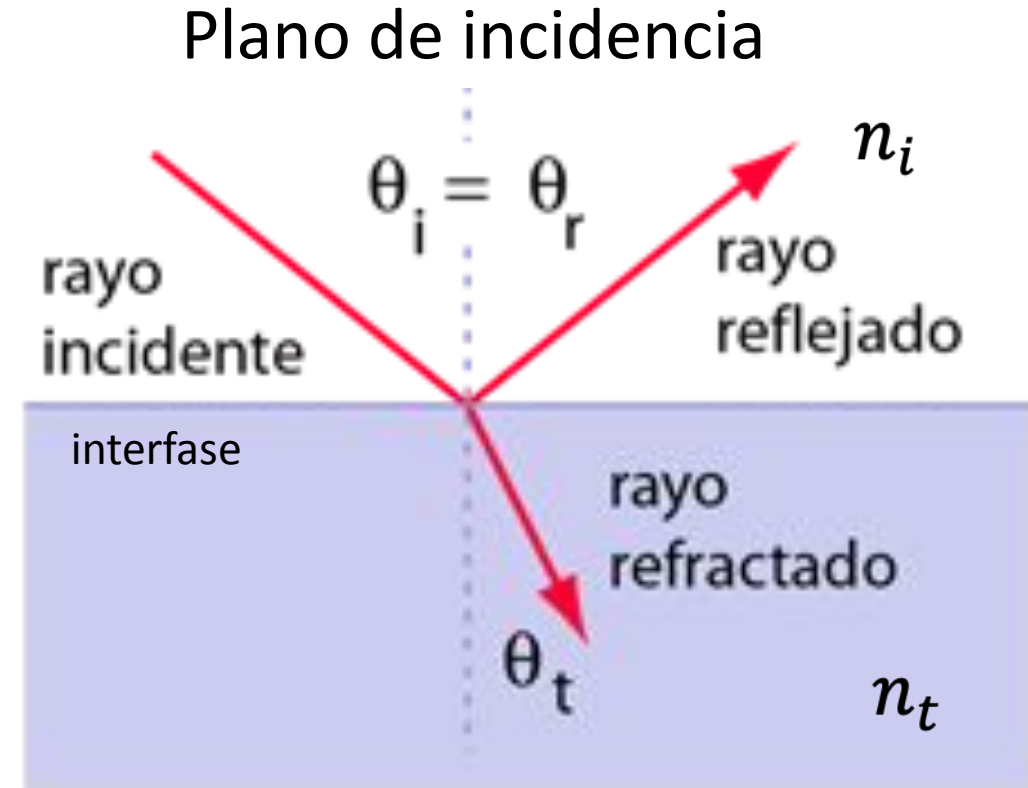
## **Polaroid**

Láminas de material dicroico desarrollado artificialmente. Opera en banda óptica principalmente

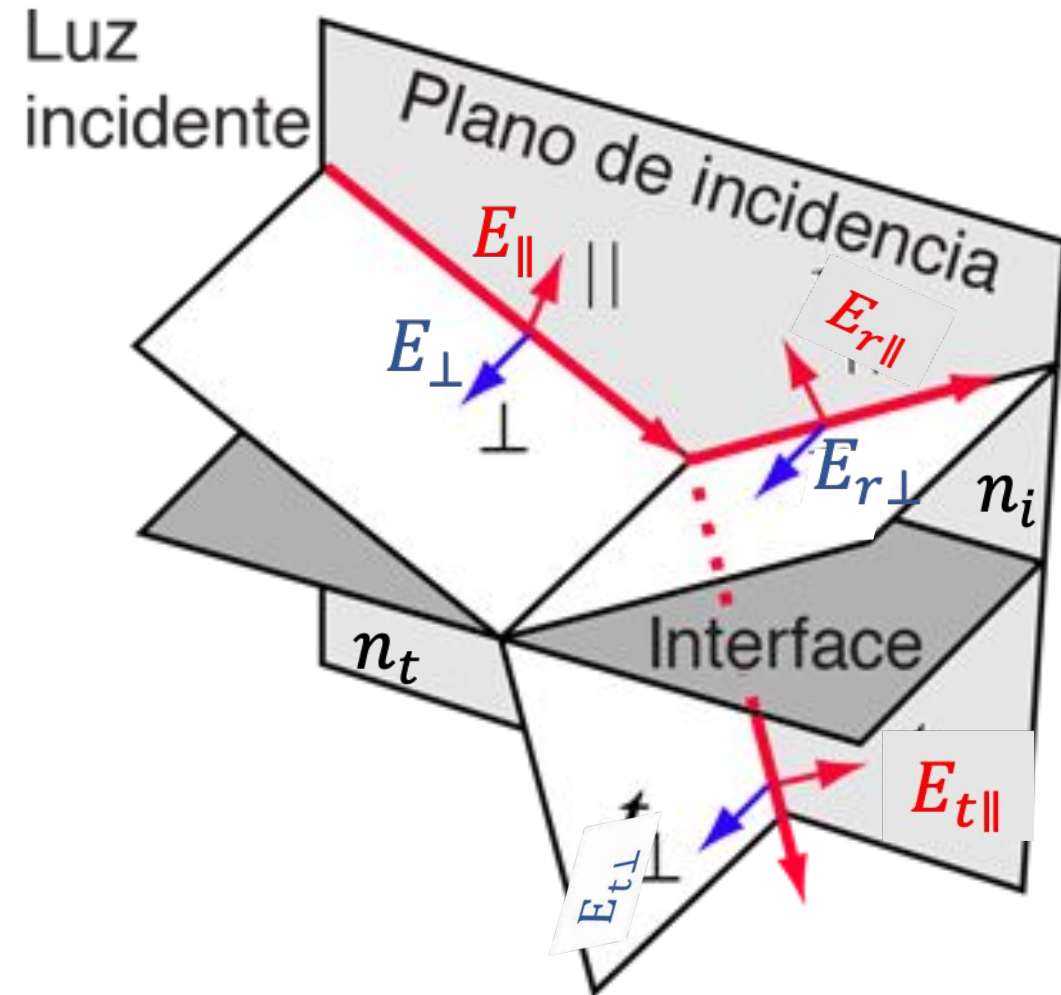


# Polarización por Reflexión

- Uno de los casos más comunes de polarización es el causado por la **reflexión** de luz no polarizada en un **dieléctrico**.
- Supongamos una interfase entre dos medios de índices de refracción  $n_i$  y  $n_t$ .
- Por las leyes de reflexión y Snell sabemos que habrá un rayo reflejado y otro refractado a ángulos  $\theta_r = \theta_i$  y  $\theta_t$ .
- Los rayos incidente, reflejado y refractado junto con la normal están en el mismo plano, el **plano de incidencia**.



- Supongamos que la luz incidente es **no polarizada**.
- Separemos las componentes del campo eléctrico incidente en una componente **paralela  $E_{\parallel}$**  y otra **perpendicular  $E_{\perp}$**  al plano de incidencia.
- Hacemos lo mismo con los campos reflejados y refractados.
- Las ecuaciones de Fresnel relacionan los campos reflejados y refractados en función de los campos incidentes



# Polarización por Reflexión: Angulo de Brewster

- La condición para que la componente paralela al plano de incidencia no aparezca en el rayo reflejado es:  $\theta_i = \theta_p$  tal que:

$$\theta_p + \theta_t = 90^\circ$$

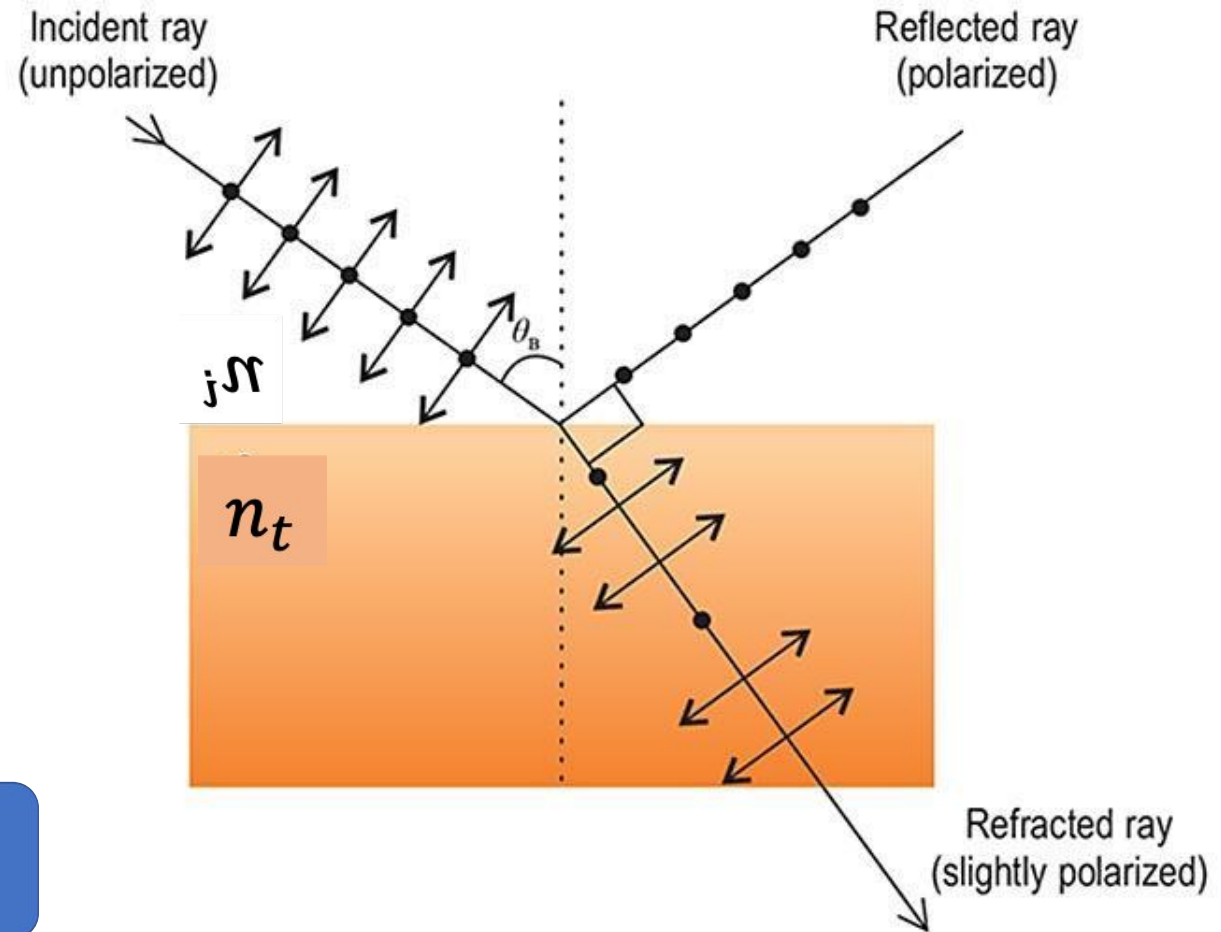
- Reemplazando en la ley de Snell

$$n_i \sin \theta_p = n_t \sin(90^\circ - \theta_p)$$

- Entonces:

$$\tan \theta_p = \frac{n_t}{n_i}$$

$\theta_p$  se denomina ángulo de Brewster



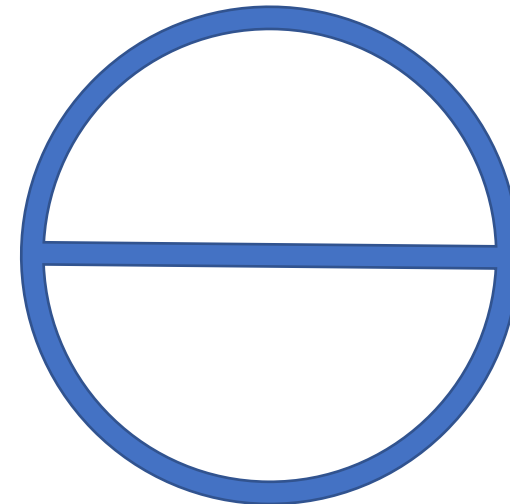
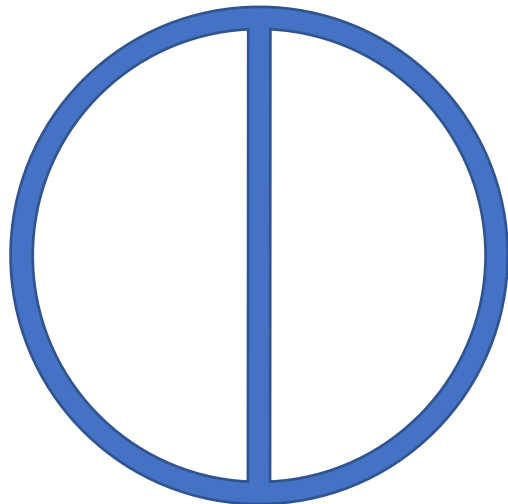


Con luz del sol reflejada en la ventana

Sin luz del sol reflejada en la ventana

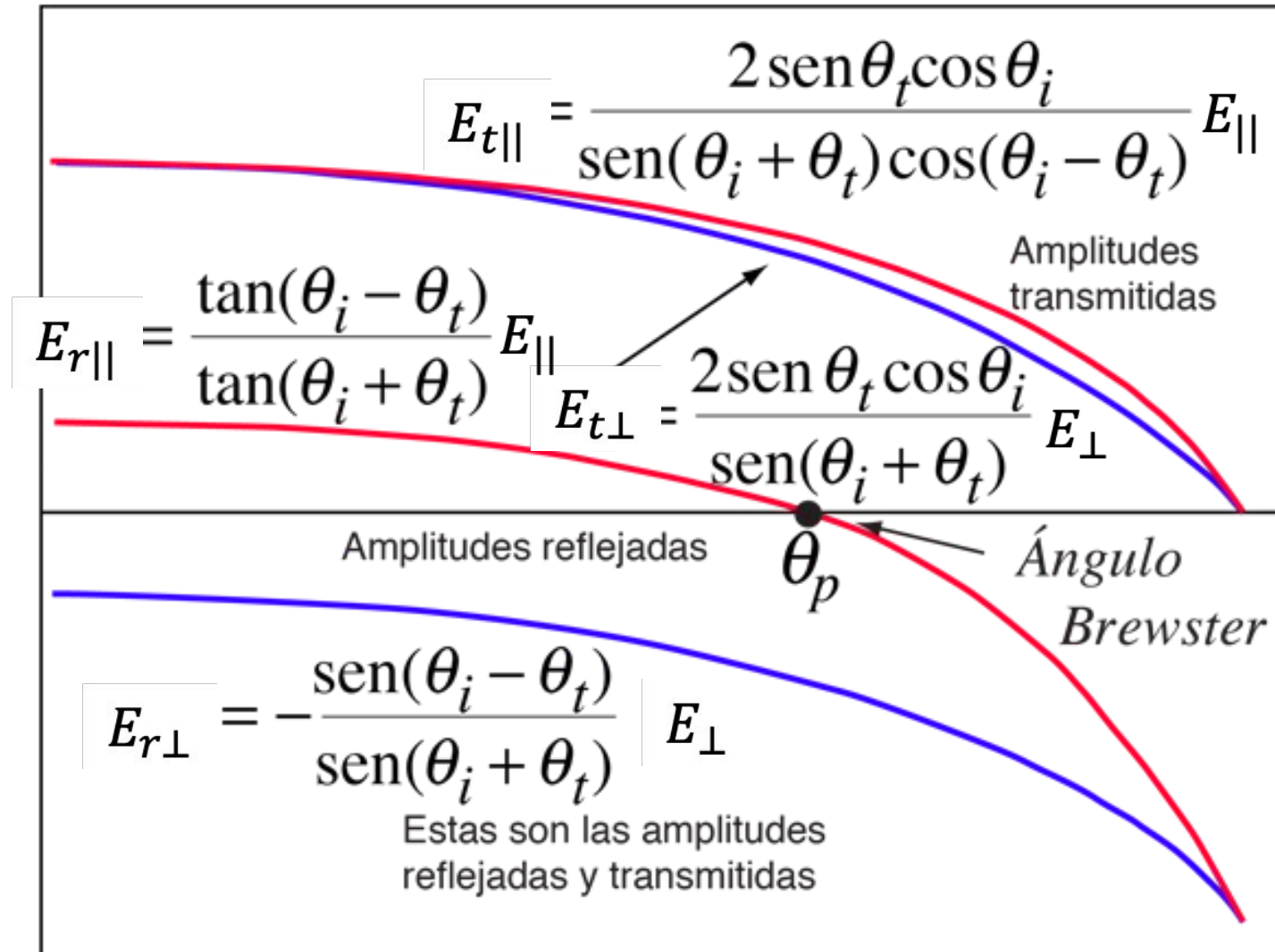


**Polarizador**



# Polarización por reflexión: Ecuaciones de Fresnel

- Las ecuaciones de Fresnel se deducen de las ecuaciones de Maxwell.
- En particular vemos que existe un valor para el ángulo de incidencia  $\theta_i = \theta_p$  donde  $E_{r\parallel} = 0$
- En esta situación el rayo reflejado está completamente polarizado en la dirección perpendicular al plano de incidencia





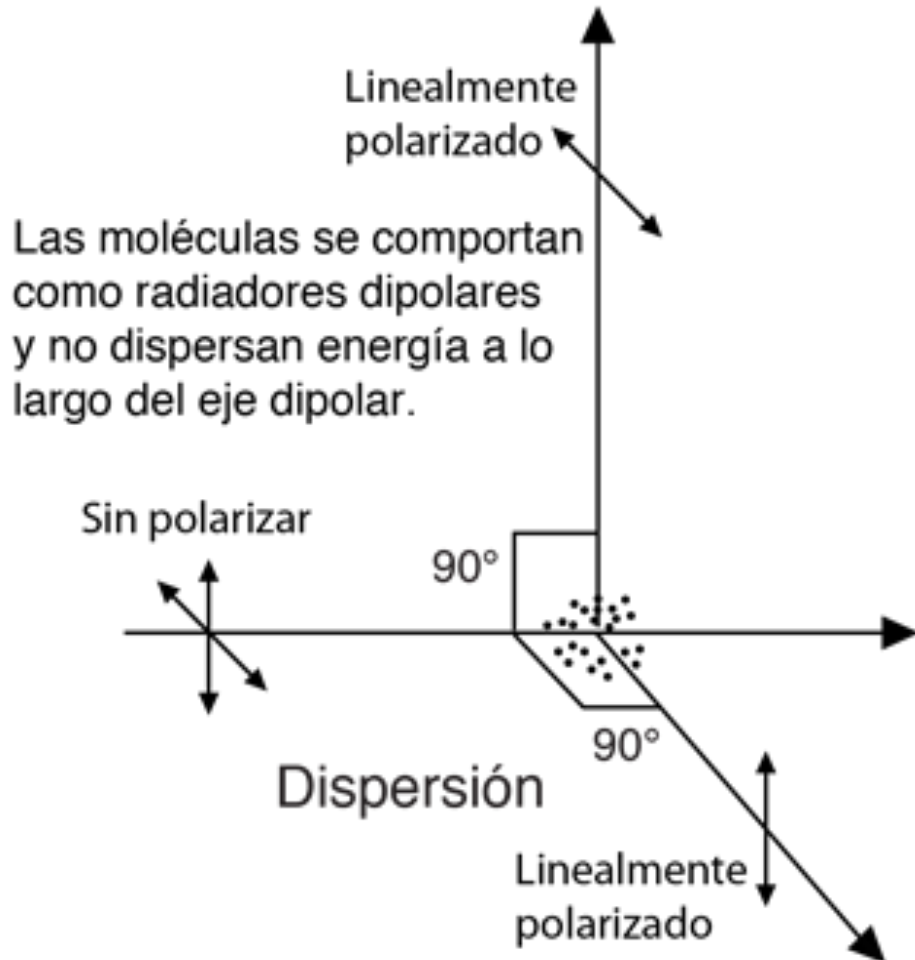


## Aplicaciones: Microscopios ángulo de Brewster

- Para estudiar partículas en interfases aire/líquido.
- Se observa la superficie del líquido en la dirección de  $\theta_p$  con lo cual, la imagen del líquido puede suprimirse
- Eso permite ver partículas en la interfase, las cuales no reflejan la luz con el mismo  $\theta_p$ .



# Polarización por dispersión



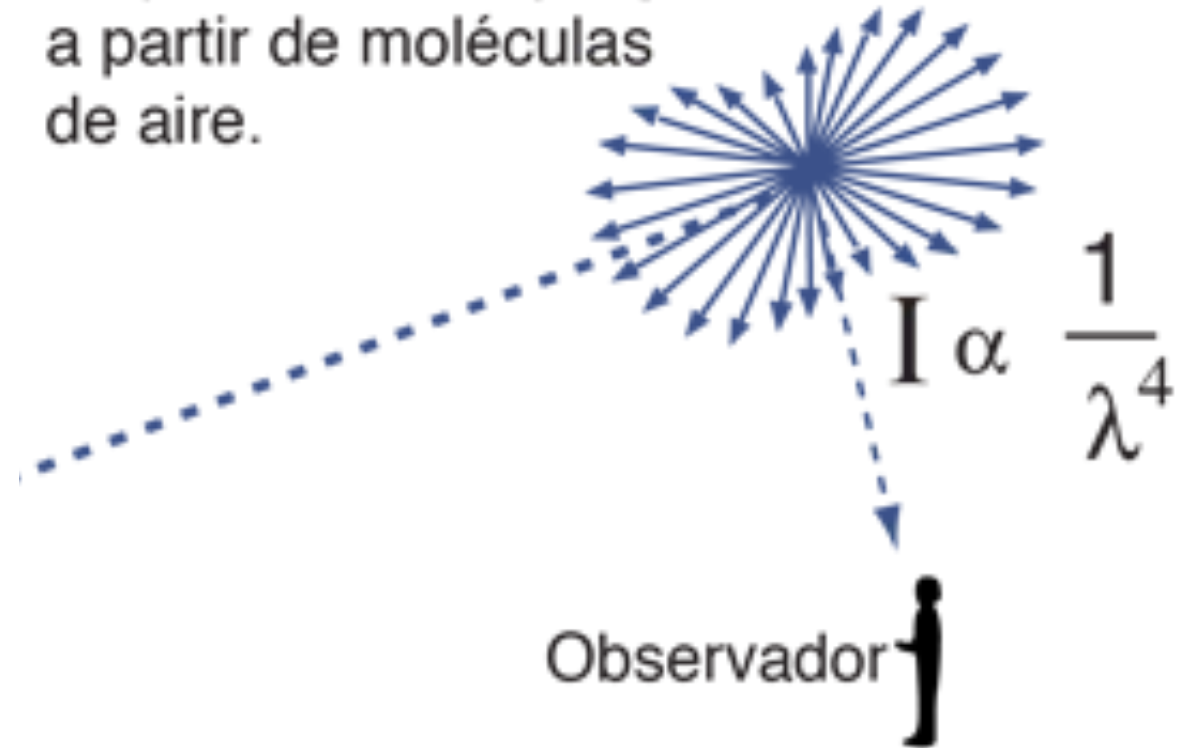
- Los dispersores se pueden visualizar como pequeñas antenas que irradian perpendicularmente a sus líneas de oscilación.
- Si en una molécula las cargas están oscilando a lo largo del eje y, no irradiarán a lo largo de este eje.
- De esta manera a  $90^\circ$  de la dirección del haz, la luz dispersada está polarizada linealmente.



# Efecto del cielo azul

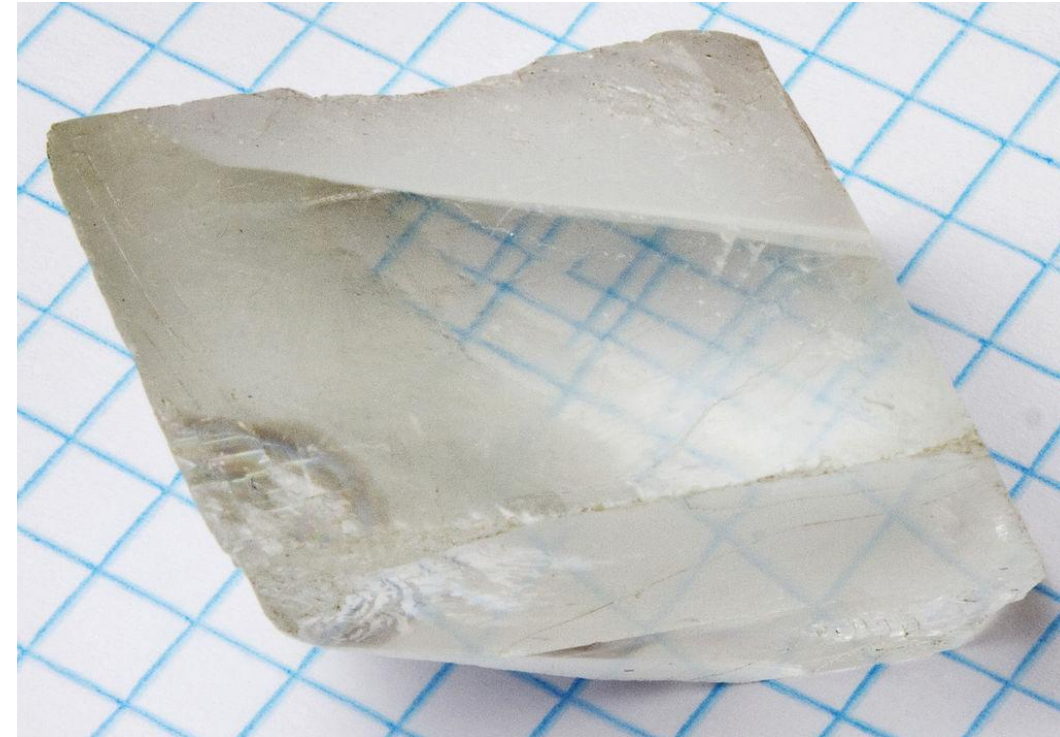
- El color azul del cielo tiene origen en la dispersión que producen las moléculas de la atmósfera sobre la luz solar.
- Esta dispersión llamada dispersión de Rayleigh, es más eficiente a longitudes visible de onda corta.
- Por lo tanto, la luz dispersada a la Tierra está predominantemente en el extremo azul del espectro.
- Dicha luz dispersada se encuentra polarizada

Dispersión de Rayleigh  
a partir de moléculas  
de aire.



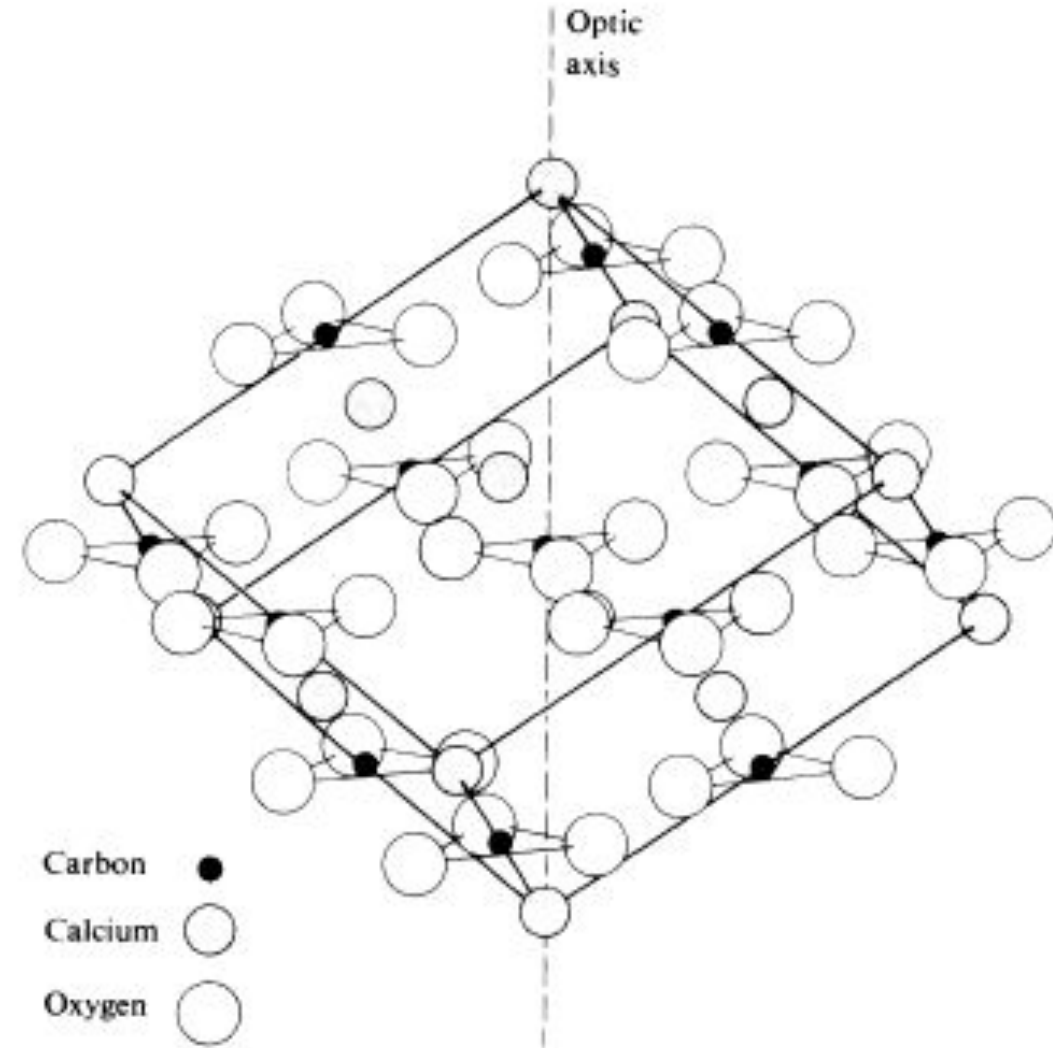
- Las anisotropías en la estructura de los materiales hacen que la propagación no tenga lugar a la misma velocidad en todas direcciones.
- En otras palabras, se tendrán distintos índices de refracción para distintas direcciones del campo eléctrico.
- Materiales que muestran **dos índices de refracción diferentes** son denominados **birrefringentes**.

# Birrefringencia



calcita mostrando doble refracción

- Los materiales birrefringentes se caracterizan por poseer una dirección característica que determina el valor del índice de refracción en la dirección paralela y perpendicular a ella.
- Esta dirección es la del **eje óptico**
- **El eje óptico no es una línea es una dirección.**



Calcita: Estructura cristalina y eje óptico.

- Ciertos cristales de estructura hexagonal, tetragonal y trigonal poseen solo un eje óptico
- Se denominan uniaxiales.
- Poseen dos índices de refracción

$$n_{\parallel} = \frac{c}{v_{\parallel}} (\vec{E} \text{ paralelo al eje óptico})$$

$$n_{\perp} = \frac{c}{v_{\perp}} (\vec{E} \text{ perpendicular al eje óptico})$$

- La resta  $\Delta n \equiv (n_{\parallel} - n_{\perp})$  es una medida de la birrefringencia.

---

**TABLE 8.1 Refractive Indices of Some Uniaxial Birefringent Crystals ( $\lambda_0 = 589.3 \text{ nm}$ )**

Crystal	perpendicular al eje optico $n_o$	paralelo al eje optico $n_e$
Tourmaline	1.669	1.638
Calcite	1.6584	1.4864
Quartz	1.5443	1.5534
Sodium nitrate	1.5854	1.3369
Ice	1.309	1.313
Rutile ( $\text{TiO}_2$ )	2.616	2.903

---



# Láminas retardadoras

- Cambian la polarización de una onda incidente.
- Producen una diferencia de fase en la onda determinada en una de las componentes perpendiculares de  $\vec{E}$ .
- Al salir de la lámina, la diferencia de fase inicial entre las componentes perpendiculares del campo  $\vec{E}$  es diferente a la de la onda incidente.



# Láminas retardadoras: Eje óptico

- Toda lámina retardadora posee un eje óptico, es decir una dirección privilegiada dentro del material anisótropo que lo conforma.
- La propiedad es tal que la velocidad de una onda polarizada a lo largo del eje óptico será:

$$v_{\parallel} = \frac{c}{n_{\parallel}}$$

- Por otro lado, la velocidad de una onda polarizada en dirección perpendicular al eje óptico será:

$$v_{\perp} = \frac{c}{n_{\perp}}$$

# Relación de velocidades

- Para retardadores uniaxiales negativos (calcita)

$$\begin{aligned}v_{\parallel} &> v_{\perp} \\ n_{\parallel} &< n_{\perp}\end{aligned}$$

Eje rápido  $\parallel$  al eje óptico

- Para retardadores uniaxiales positivos (cuarzo)

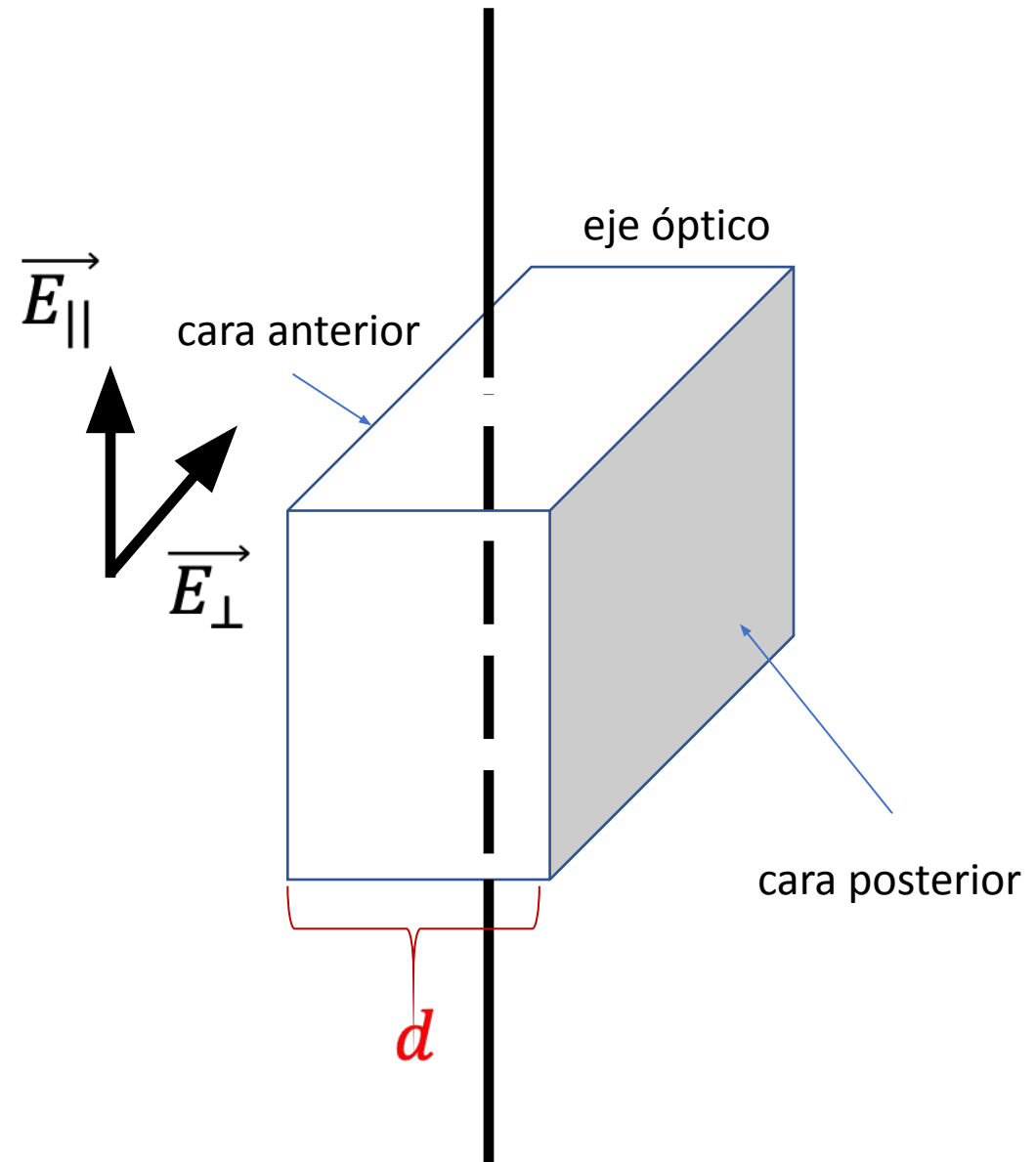
$$\begin{aligned}v_{\parallel} &< v_{\perp} \\ n_{\parallel} &> n_{\perp}\end{aligned}$$

Eje rápido  $\perp$  al eje óptico



# Láminas retardadoras

- Supongamos una lámina de caras plano paralelas de espesor  $d$ , que son a su vez, paralelas al eje óptico del material de la lámina.
- Si el campo eléctrico  $\vec{E}$  de una onda monocromática plana tiene componentes paralela y perpendicular al eje óptico  $\vec{E}_{||}$  y  $\vec{E}_{\perp}$ , estas componentes van a propagarse a distintas velocidades dentro del cristal.

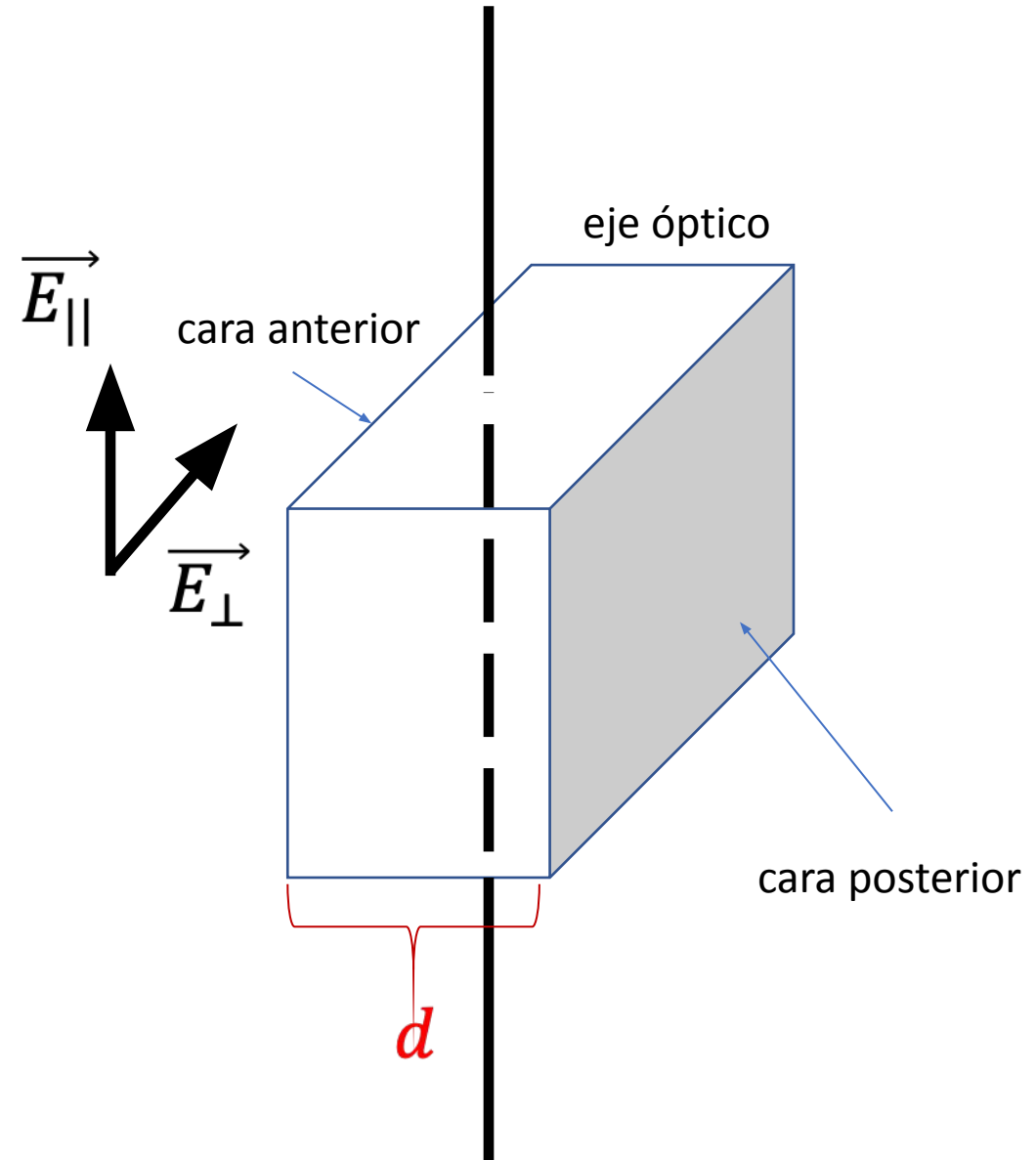


- Luego de atravesar una distancia  $d$ , la diferencia de fase acumulada entre  $\vec{E}_{||}$  y  $\vec{E}_{\perp}$  es

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d (|n_{\perp} - n_{||}|)$$

$\lambda$  es el valor en el vacío

- El estado final de la polarización dependerá de las amplitudes de  $\vec{E}_{||}$  y  $\vec{E}_{\perp}$ , pero también de  $\Delta\varphi$



# Láminas de onda completa

- Son las láminas donde:

$$\Delta\varphi = 2\pi \text{ o cualquier múltiplo}$$

- Como se puede ver,  $\Delta\varphi$  depende de  $\lambda$  por eso se llama cromática.
- Si tenemos luz incidente blanca linealmente polarizada, sólo el  $\lambda$  correspondiente va a emerger con la misma polarización.
- Pregunta: ¿con qué polarización emergerá el resto de las  $\lambda$ ?

# Láminas de media onda

- Son las láminas donde:

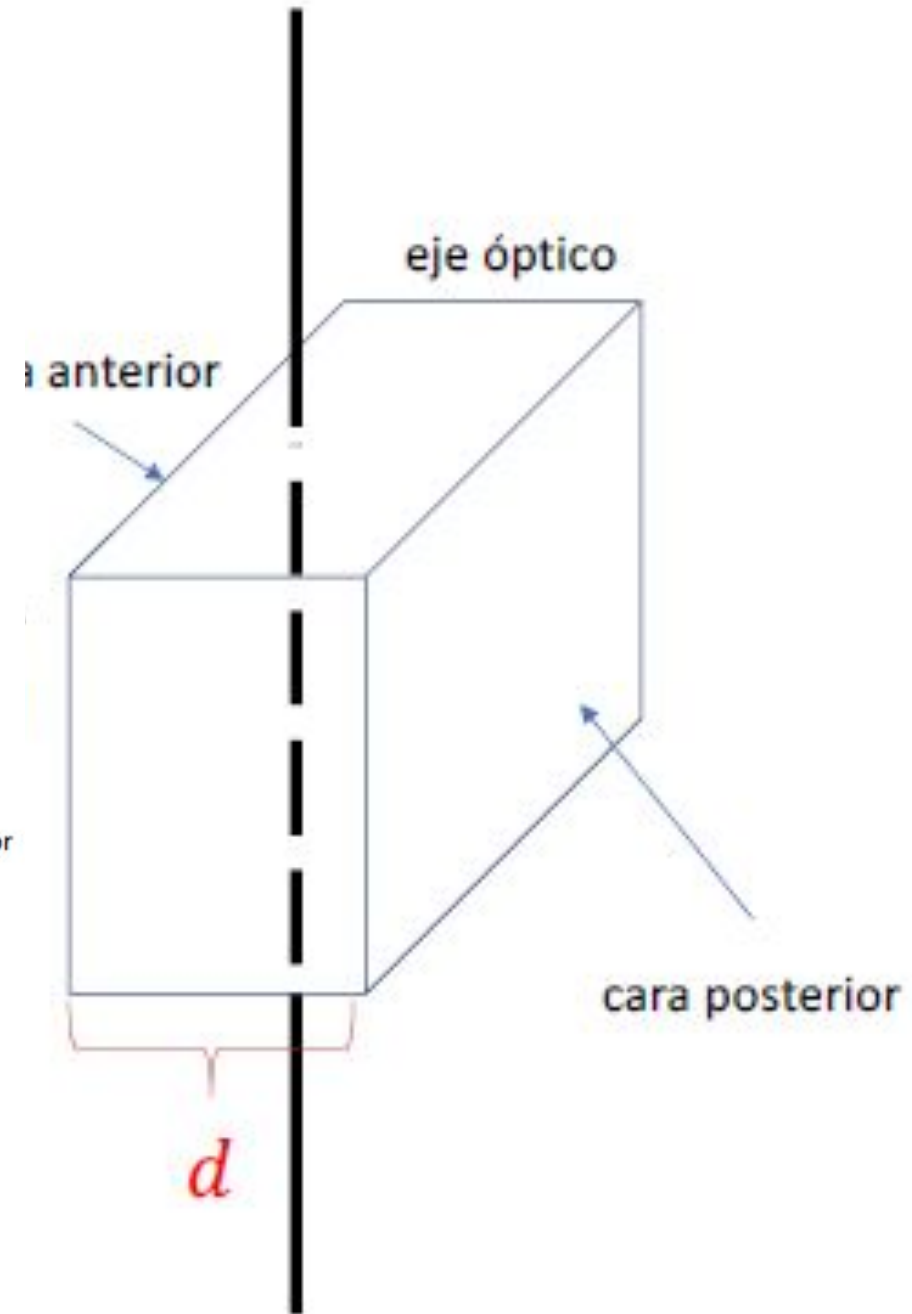
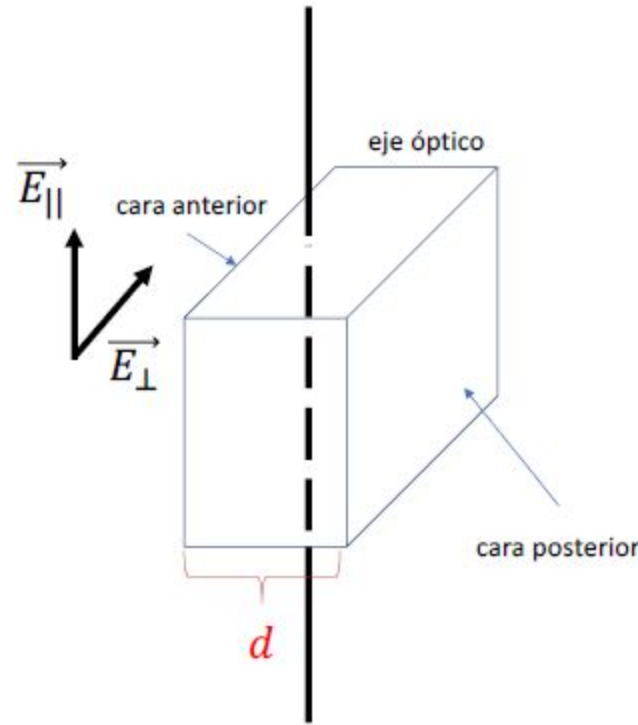
$$\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi\dots$$

- Esto corresponde a materiales donde

$$d(|n_{\perp} - n_{\parallel}|) = \frac{2m + 1}{2}\lambda$$

donde  $m = 0, 1, 2 \dots$

- Rota luz linealmente polar en  $2\theta$  respecto al eje óptico.



**Antes de la lámina:**

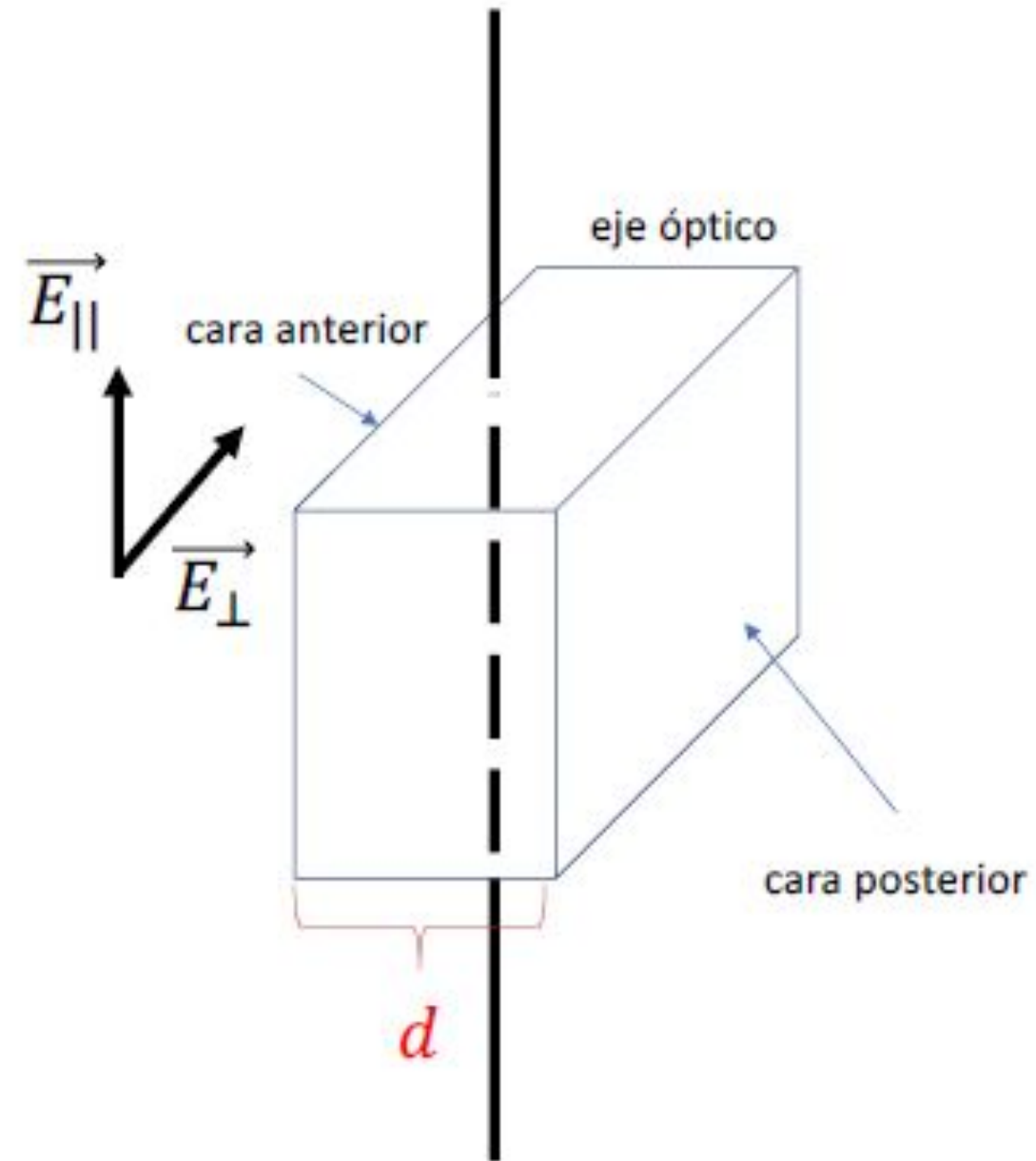
$$E_x = E_o \text{sen}(\theta) \cos(kz - wt)$$

$$E_y = E_o \cos(\theta) \cos(kz - wt)$$

**Después de la lámina  $E_x$  se atrasa ( $\pi$ ):**

$$E_x = E_o \text{sen}(\theta) \cos(kz - wt + \pi)$$

$$E_y = E_o \cos(\theta) \cos(kz - wt)$$

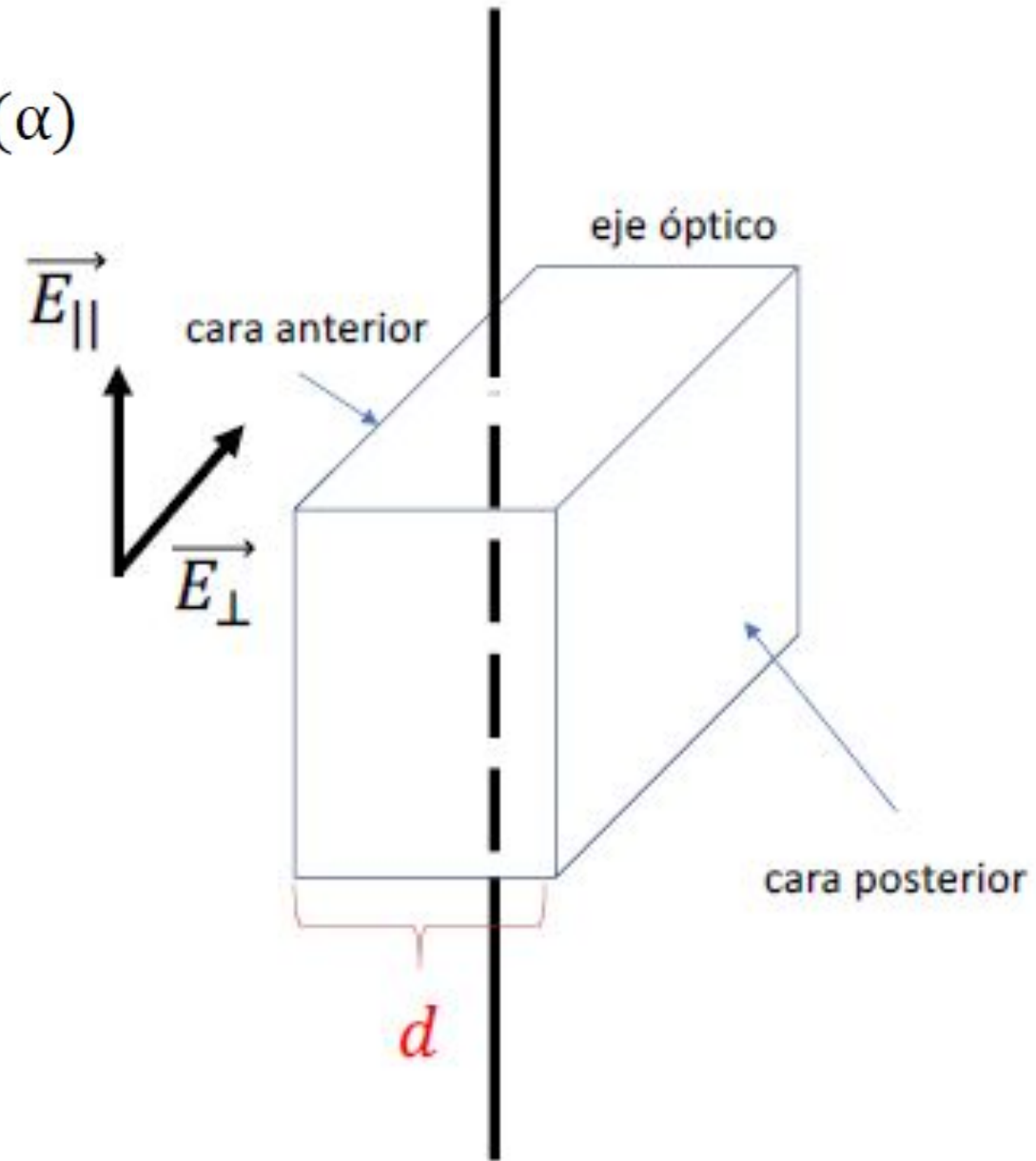


Usando esta relación:  $\cos(\alpha + \pi) = -\cos(\alpha)$

Obtenemos:

$$E_x = -\underline{E_o} \operatorname{sen}(\Theta) \cos(kz - \omega t)$$

$$E_y = E_o \cos(\Theta) \cos(kz - \omega t)$$



**Cambia el signo de la componente x del campo E**

- Son las láminas donde:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$$

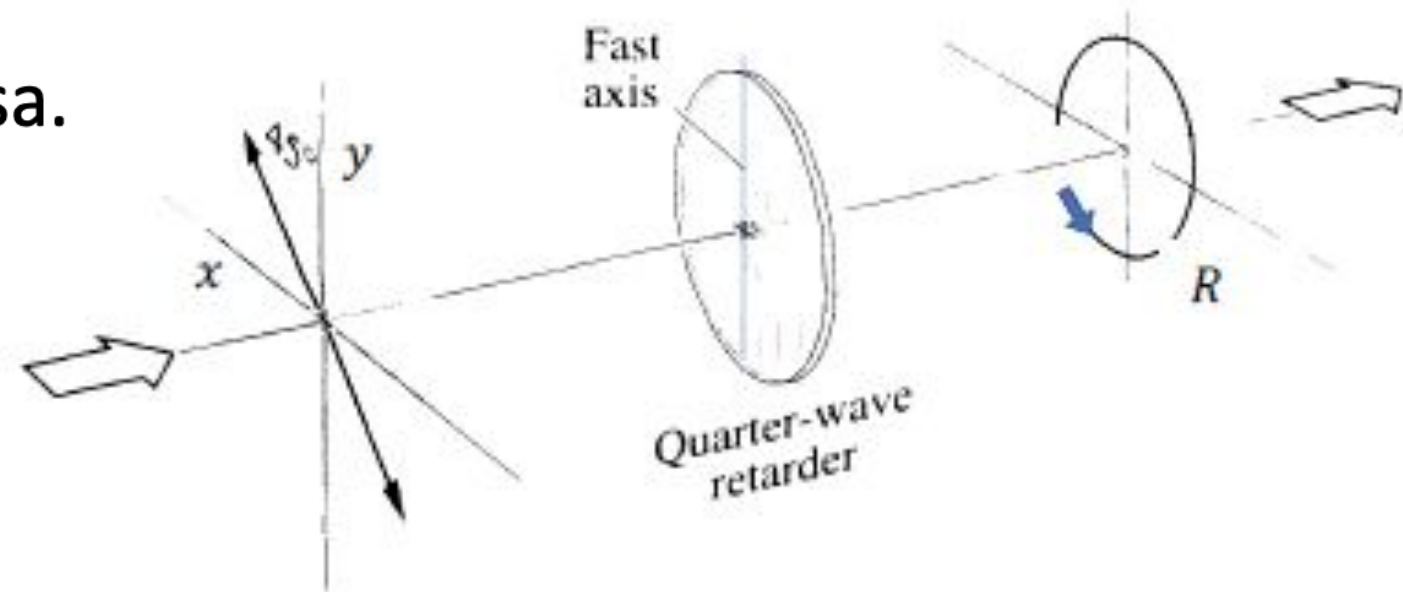
- Esto corresponde a materiales donde

$$d(|n_{\perp} - n_{\parallel}|) = \frac{4m + 1}{2} \lambda$$

donde  $m = 0, 1, 2 \dots$

- Transforma luz linealmente polarizada en elíptica y viceversa.

## Láminas de cuarto de onda



## Antes de la lámina

$$E_{ox} = E_{oy} = E_o$$

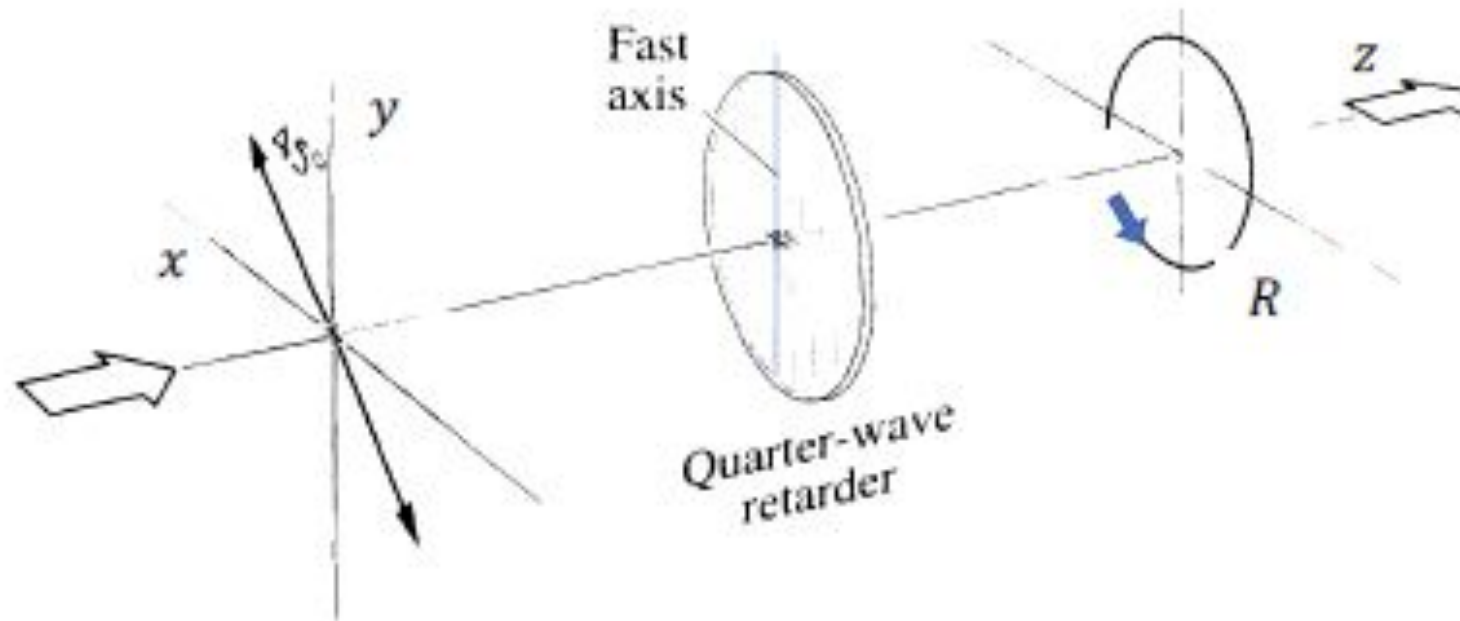
$$E_x = -E_o \cos(kz - \omega t)$$

$$E_y = -E_o \cos(kz - \omega t)$$

## Después de la lámina

$$E_x = -E_o \cos(kz - \omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$E_y = -E_o \cos(kz - \omega t)$$





Usando esta relación:  $\cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) = -\text{sen}(\alpha)$

Obtenemos las siguientes expresiones para las componentes del campo:

$$E_x = -E_0 \text{sen}(kz - wt)$$

$$E_y = -E_0 \text{sen}(kz - wt)$$

↓  
**Esto da una  
polarización circular  
derecha (horaria viendo  
hacia la fuente)**

