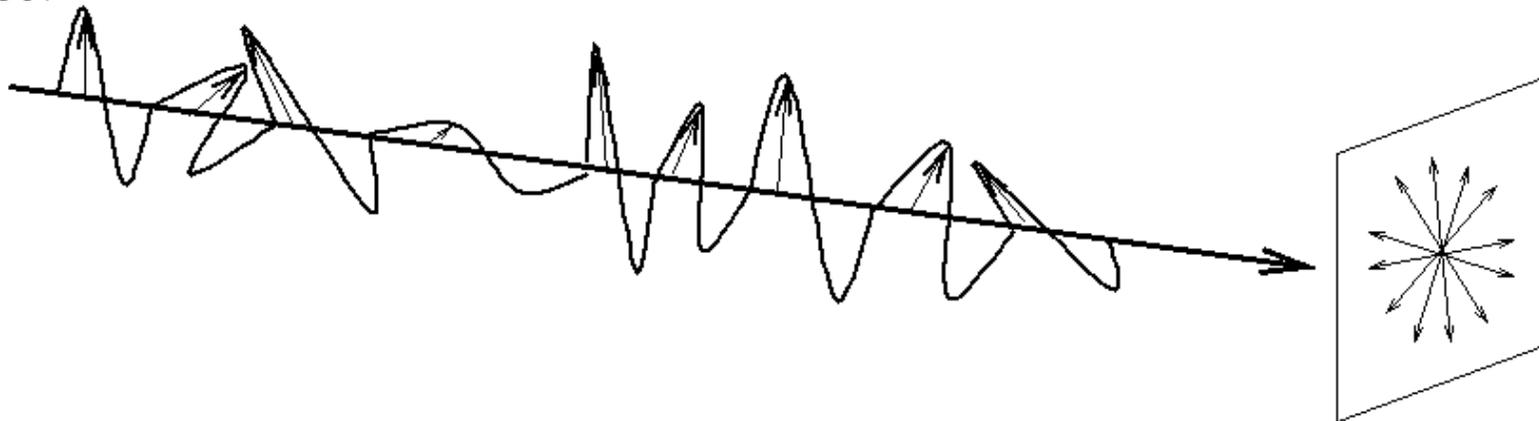


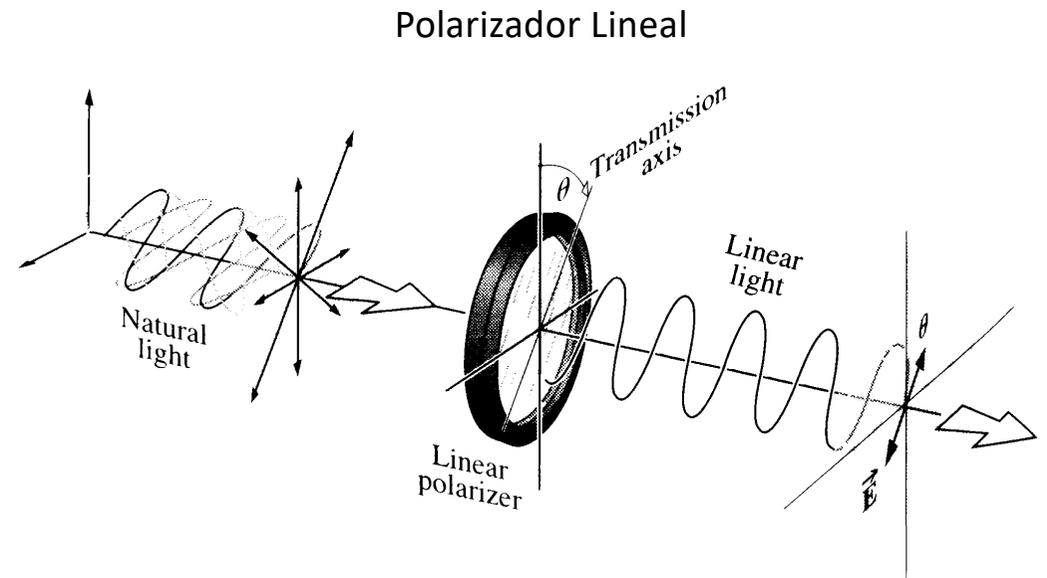
Luz Natural o no polarizada

- 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 observados todas las polarizaciones posibles.



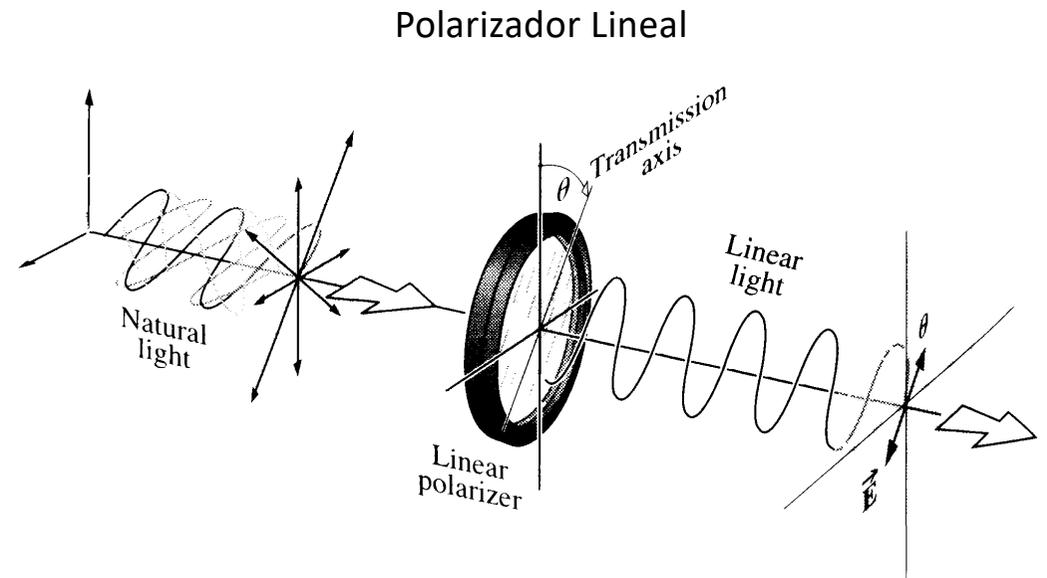
Polarizadores

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



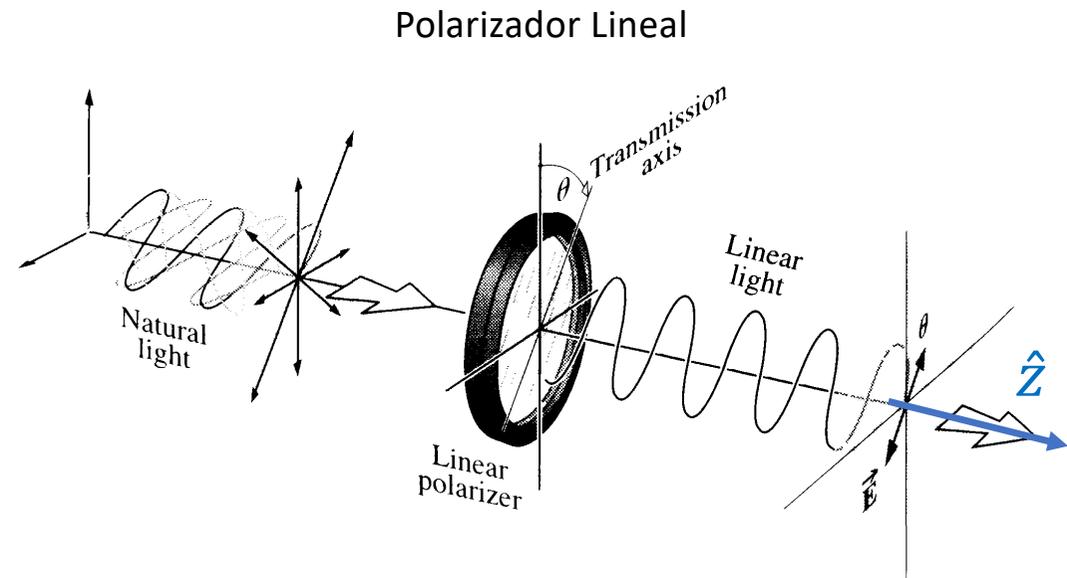
Polarizadores

- 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**.



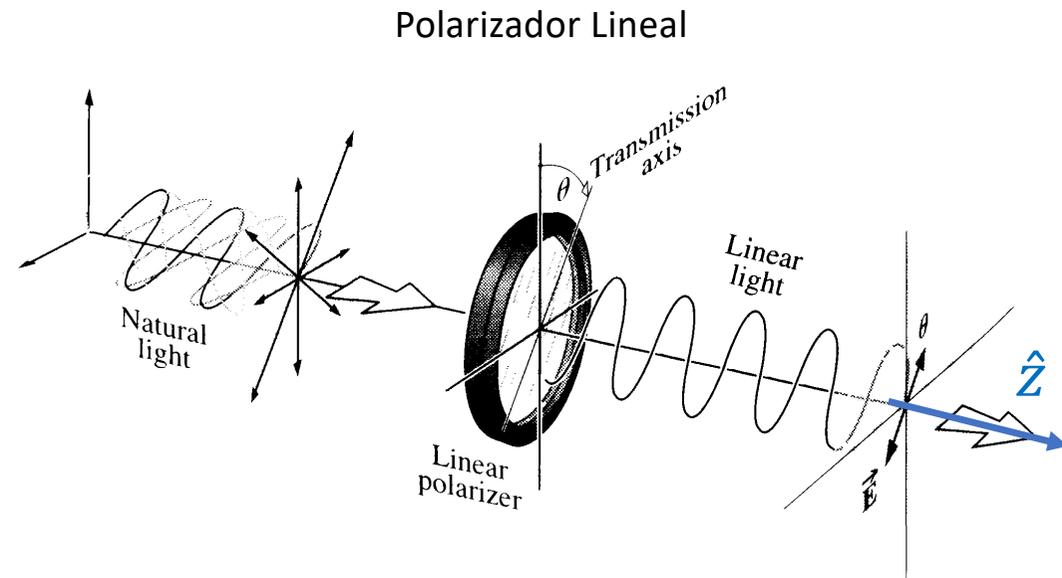
Ley de Malus

- ¿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.



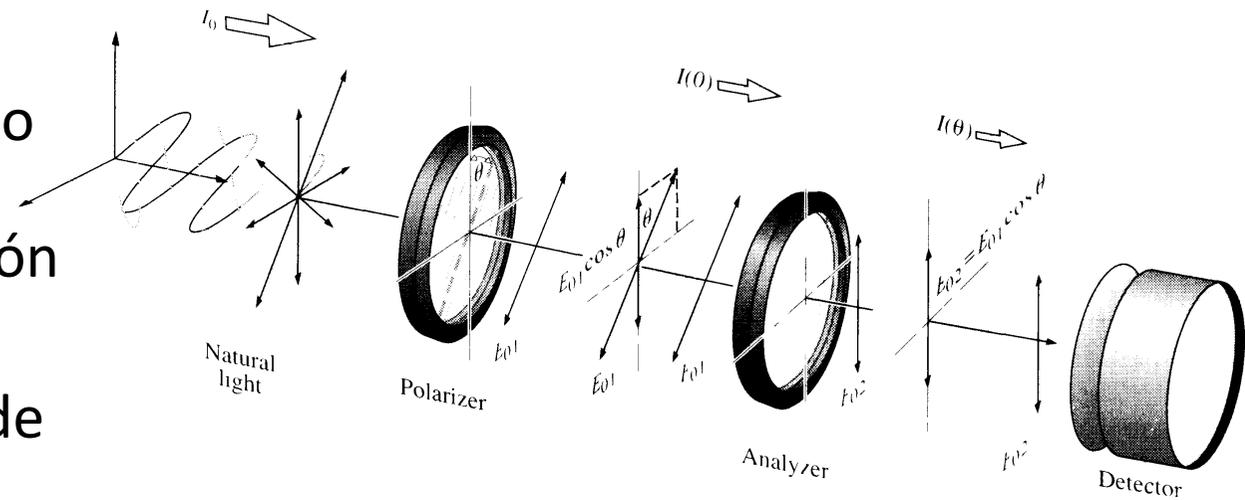
Ley de Malus

- 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.



Ley de Malus

- Supongamos que ahora agregamos otro polarizador lineal llamado analizador con su eje de transmisión en la dirección vertical.
- Supongamos que el eje de transmisión del primer polarizador forma un ángulo θ con la vertical.

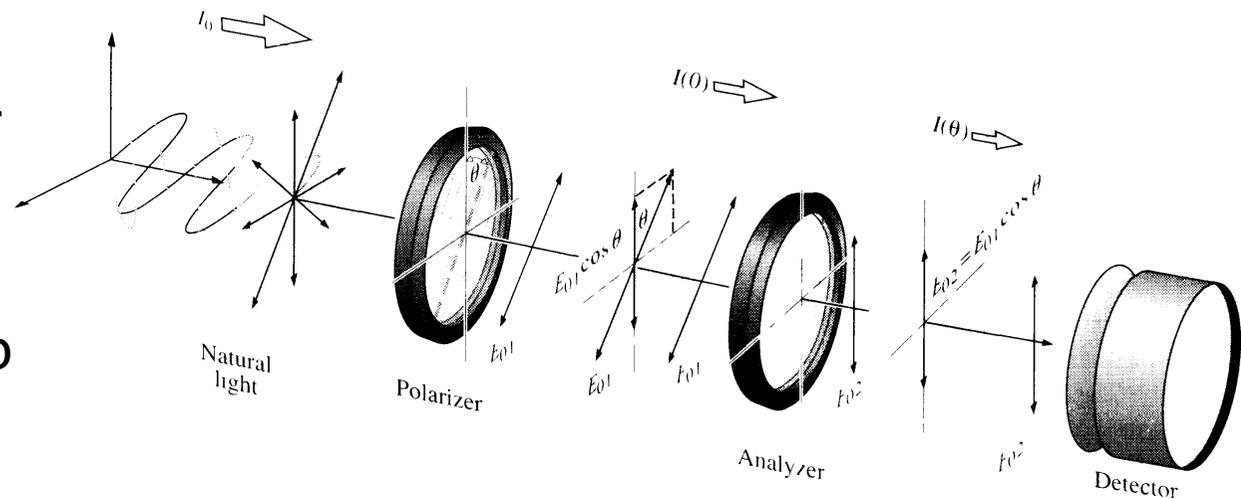


Ley de Malus

- 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

- Entonces la irradiancia luego del analizador queda

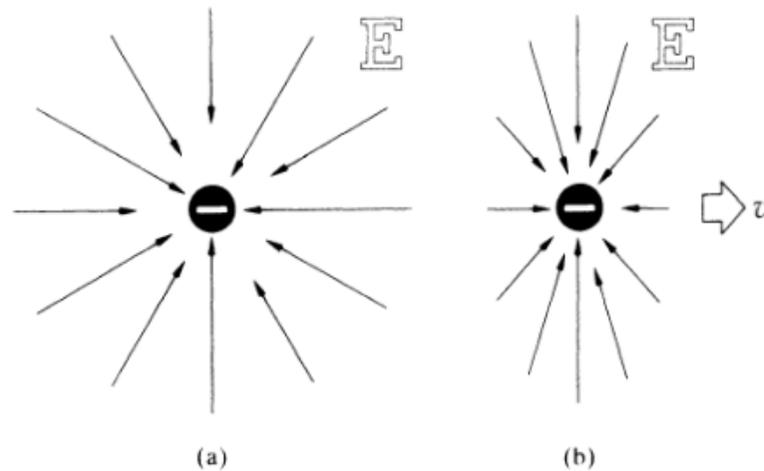
$$I(\theta) = I(0) \cos^2 \theta$$

- Donde

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

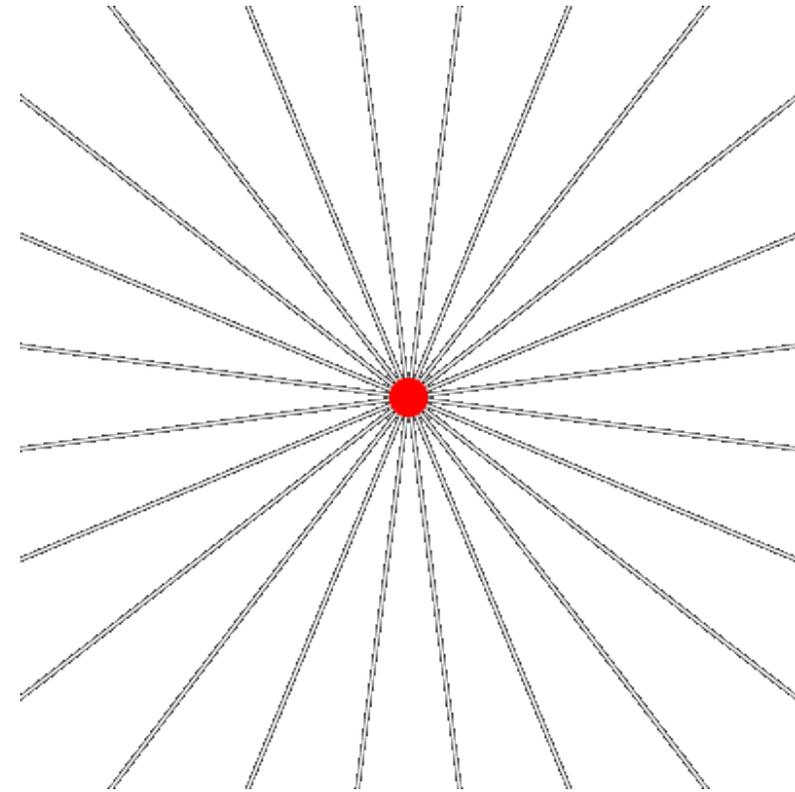
Conceptos Básicos de Radiación

- Vimos que una carga en reposo genera campos eléctricos y en movimiento uniforme genera además campos magnéticos estacionarios (no hay radiación)



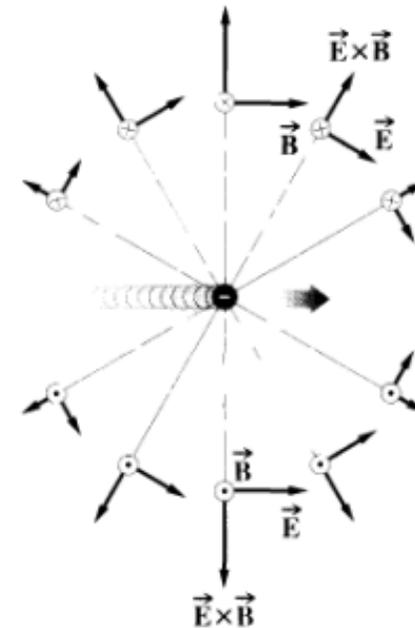
Conceptos Básicos de Radiación

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



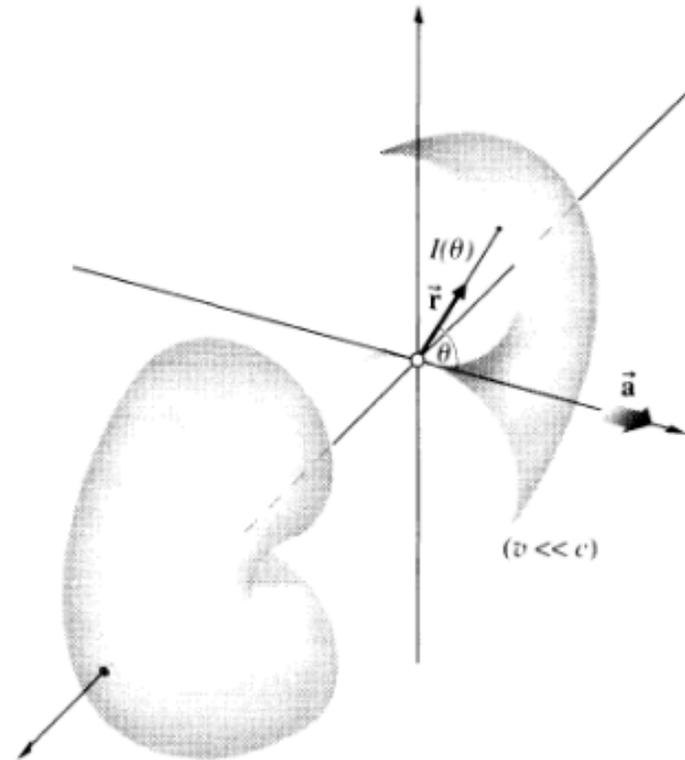
Conceptos Básicos de Radiación

- 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.



Conceptos Básicos de Radiación

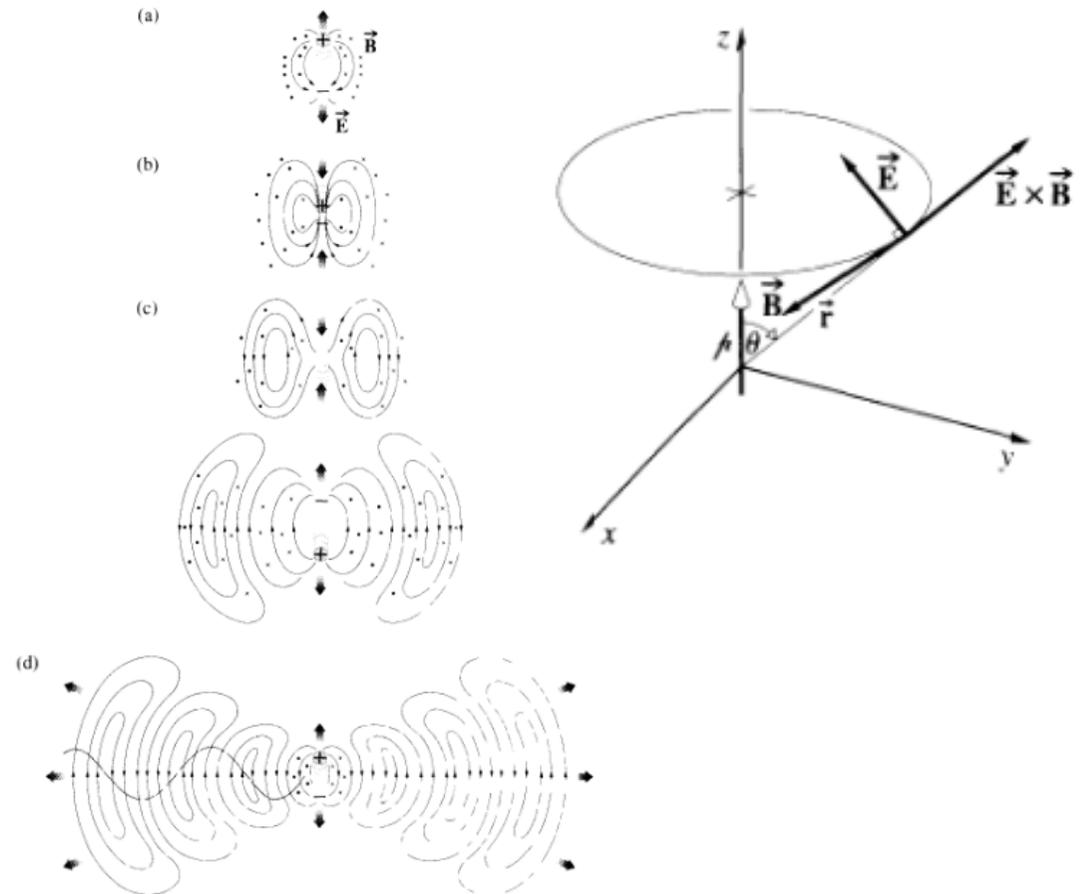
- Cuando una carga se acelera se genera un pulso eléctrico y magnético que se propaga llevando la información sobre la aceleración de la carga.
- Los campos variables así generados conforman la radiación.
- Lejos de la carga es posible demostrar que la radiación se emite mayormente en la dirección perpendicular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



Radiación dipolar eléctrica (antena)

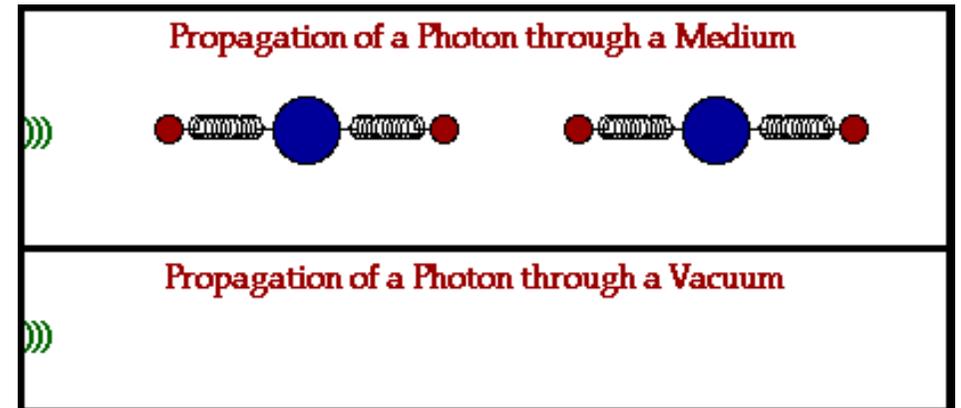
- La forma más simple de radiación proviene de la oscilación a frecuencia ω de dipolos eléctricos.
- Los electrones se mueven más rápido que los núcleos.
- Lejos del dipolo el campo eléctrico se aproxima por:

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



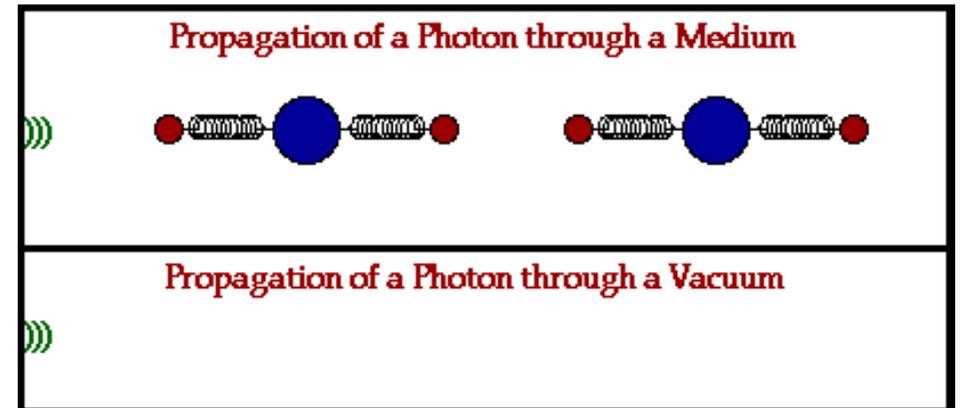
Propagación de la luz en medios transparentes

- 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.



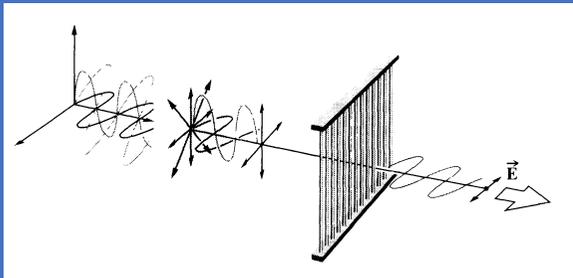
Propagación de la luz en medios transparentes

- 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



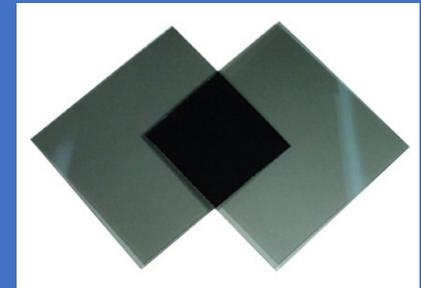
Polarizador de rejilla

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



Cristales dicroicos

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

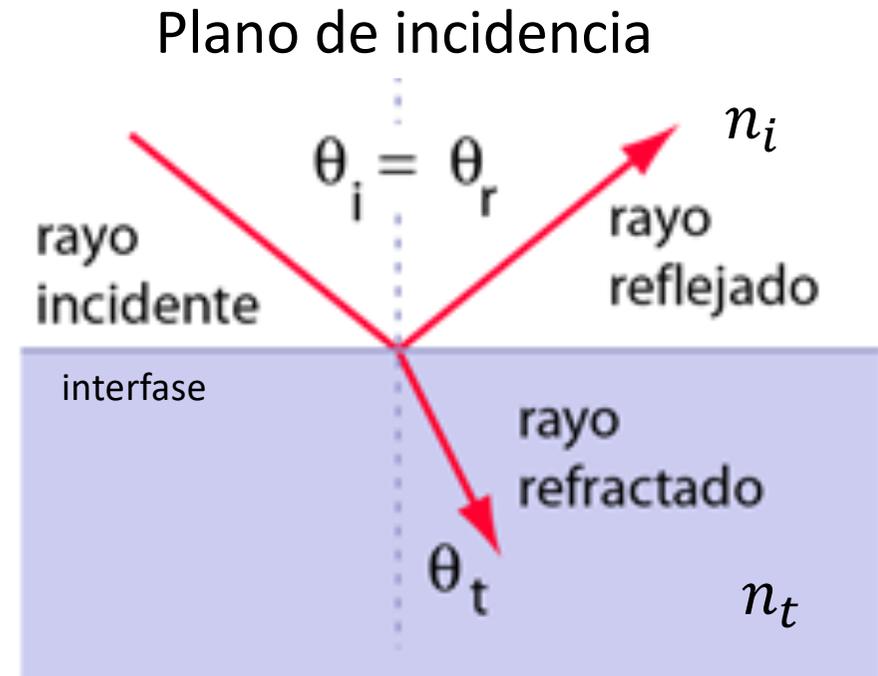


Polaroid

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

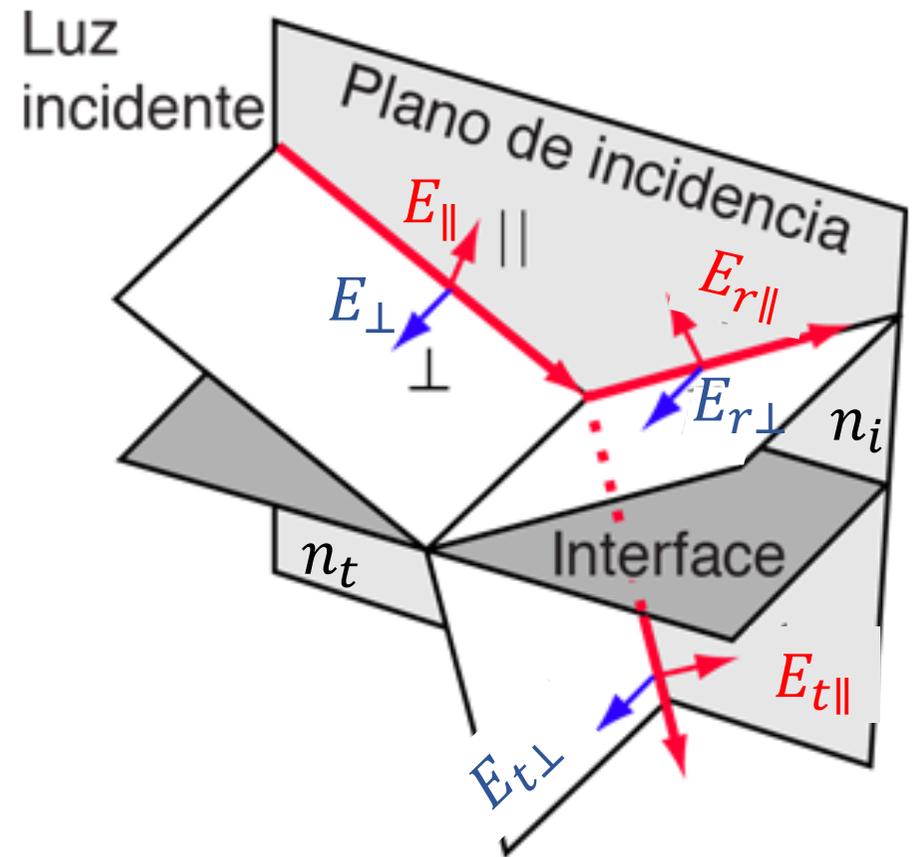
Polarización por Reflexión

- 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 θ_t .
- Los rayos incidente, reflejado y refractado junto con la normal están en el mismo plano, el **plano de incidencia**.



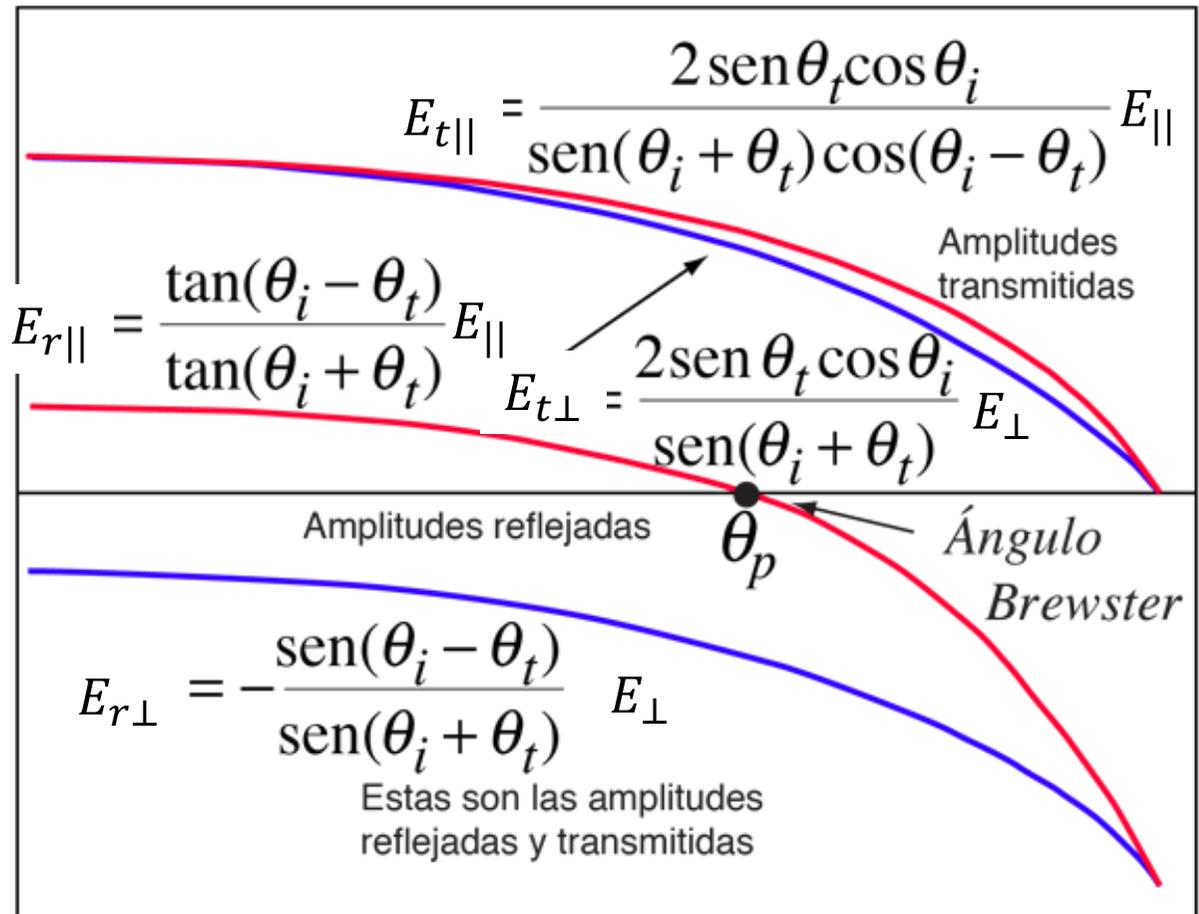
Polarización por Reflexión

- 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: 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



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:

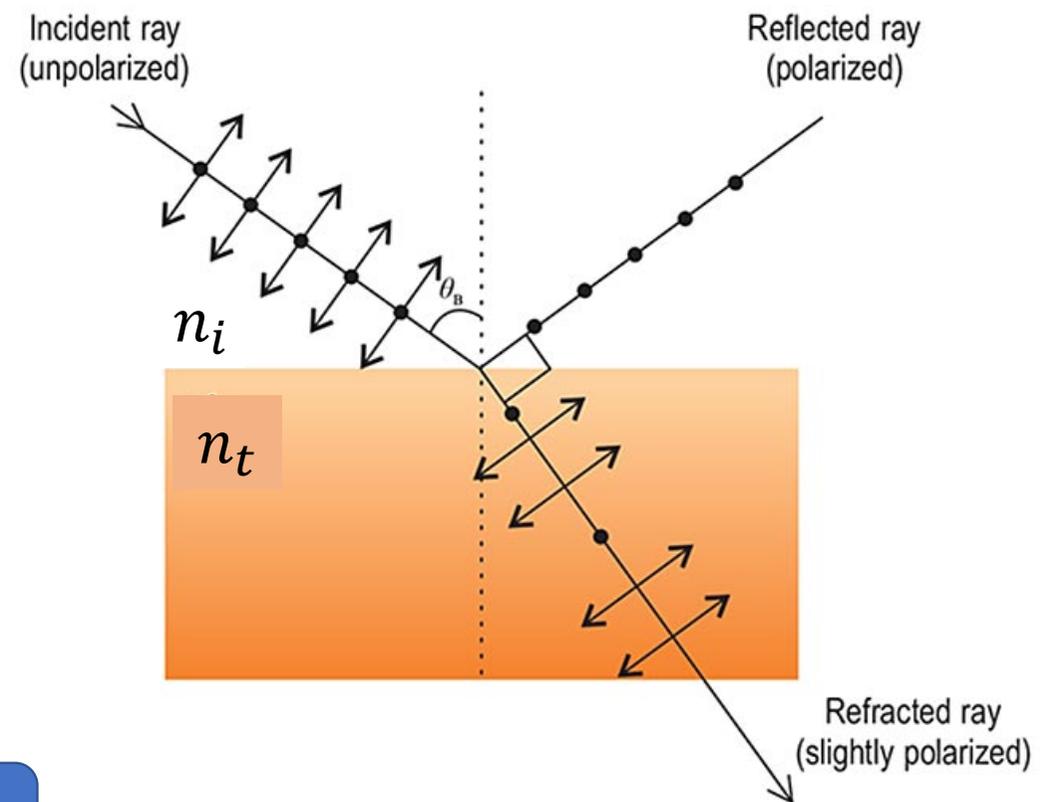
$$\theta_p + \theta_t = 90^\circ$$

- Reemplazando en la ley de Snell
- $$n_i \sin \theta_p = n_t \sin(90^\circ - \theta_p)$$

- Entonces:

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

θ_p se denomina ángulo de Brewster



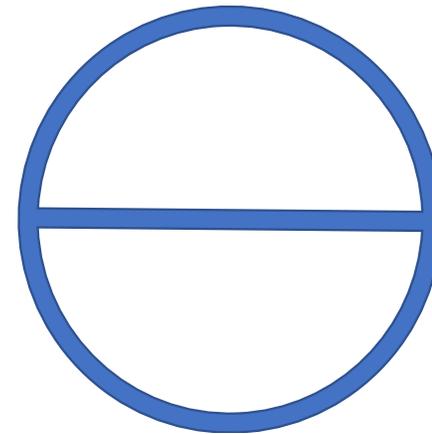
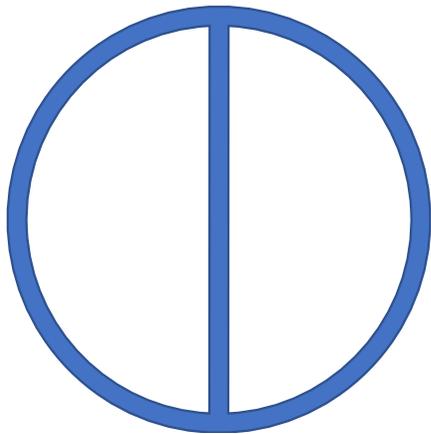
Con luz del sol reflejada en la ventana

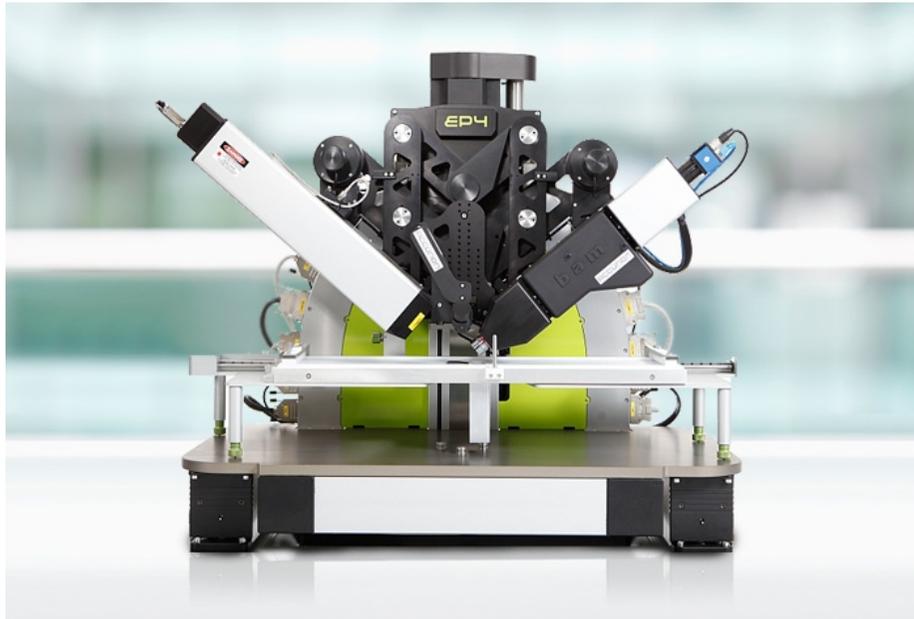


Sin luz del sol reflejada en la ventana



Polarizador

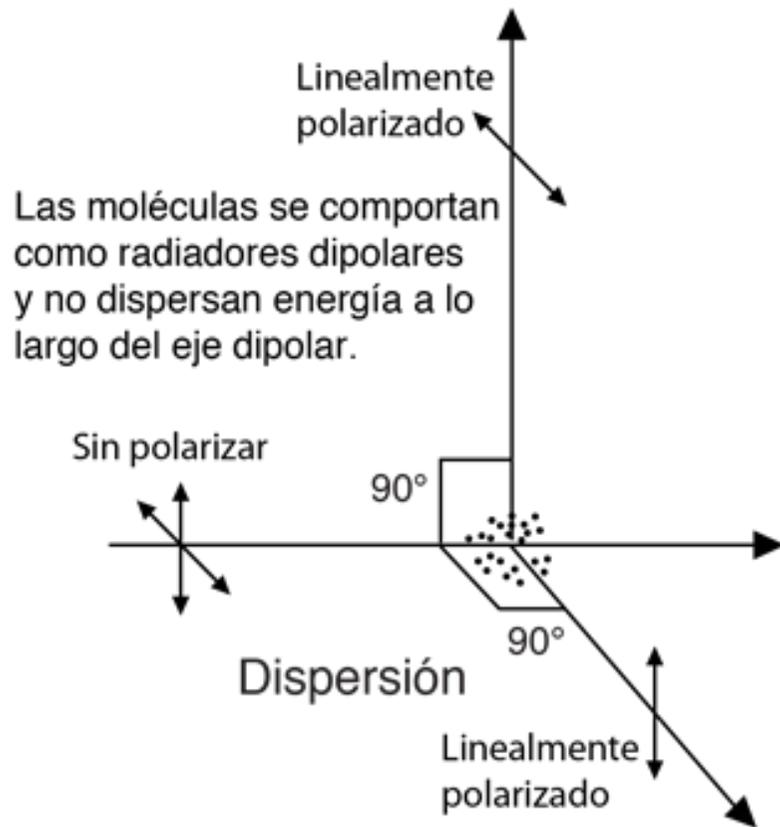




Aplicaciones: Microscopios ángulo de Brewster

- Para estudiar partículas en interfases aire/líquido.
- Se observa la superficie del líquido en la dirección de θ_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 θ_p .

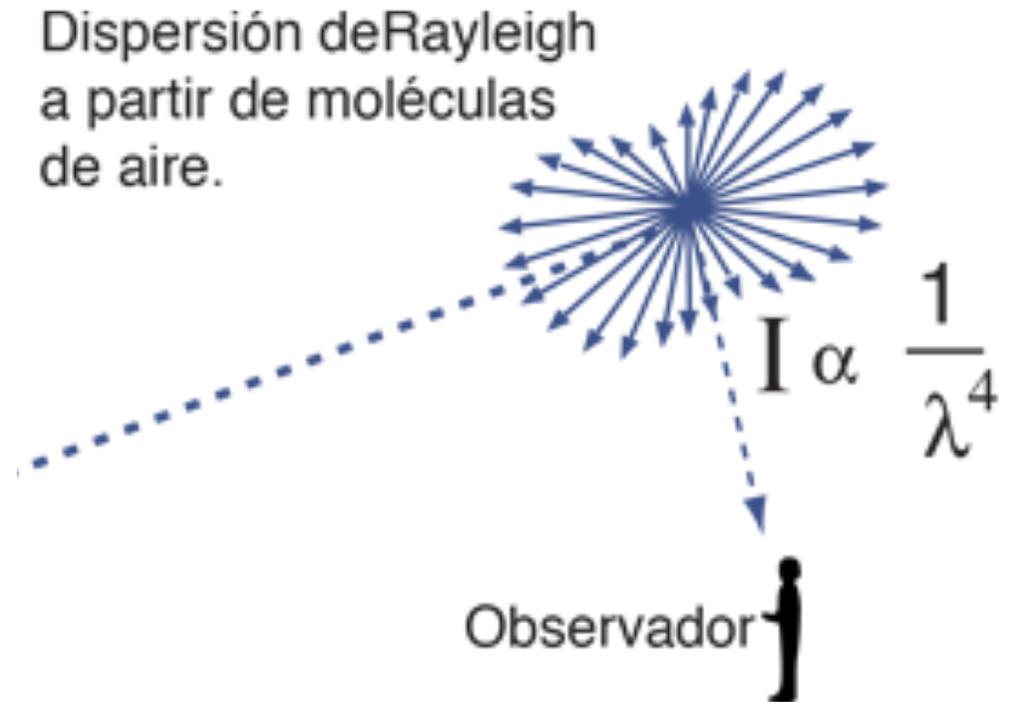
Polarización por dispersión



- 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° de la dirección del haz, la luz dispersada esta polarizada linealmente.

Efecto del cielo azul

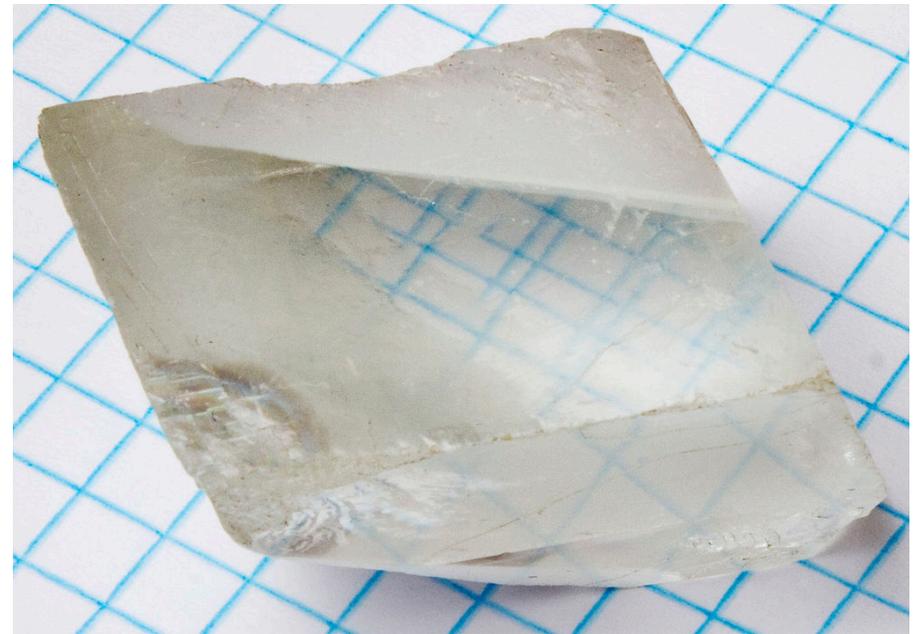
- El color azul del cielo tiene origen en la dispersión que producen las moléculas de la atmósfera sobre la luz solar.
- Esta dispersión llamada dispersión de Rayleigh, es más eficiente a longitudes visible de onda corta.
- Por lo tanto, la luz dispersada a la Tierra está predominantemente en el extremo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



Birrefringencia

Birrefringencia

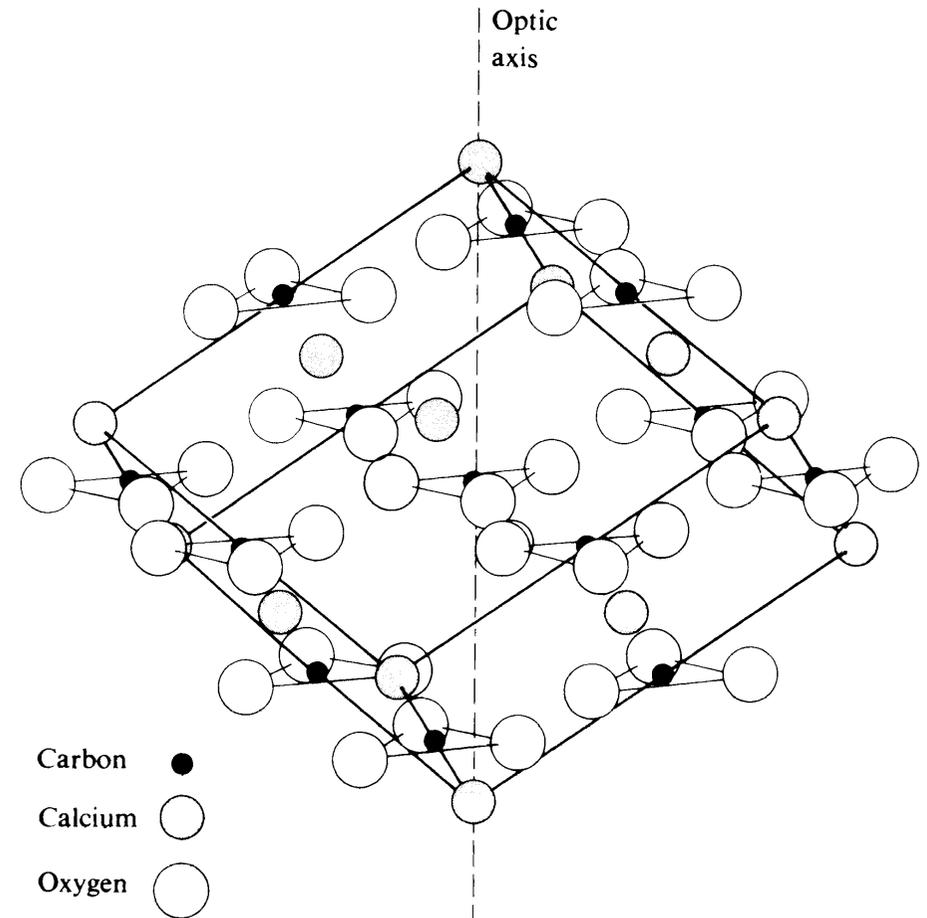
- Las anisotropías en la estructura de los materiales hacen que la propagación no tenga lugar a la misma velocidad en todas direcciones.
- En otras palabras, se tendrán distintos índices de refracción para distintas direcciones del campo eléctrico.
- Materiales que muestran **dos índices de refracción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



calcita mostrando doble refracción

Birrefringencia

- 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.

Birrefringencia

- 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 (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

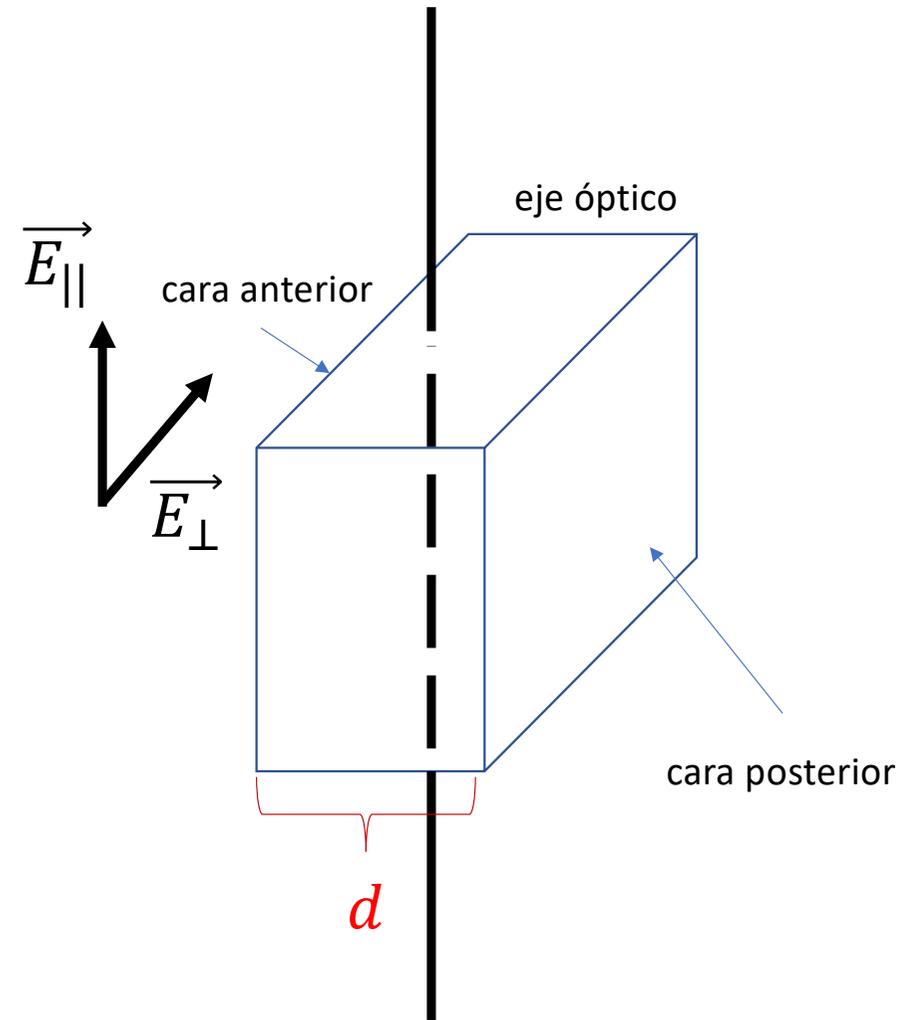
- Para retardadores uniaxiales positivos (cuarzo)

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

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.



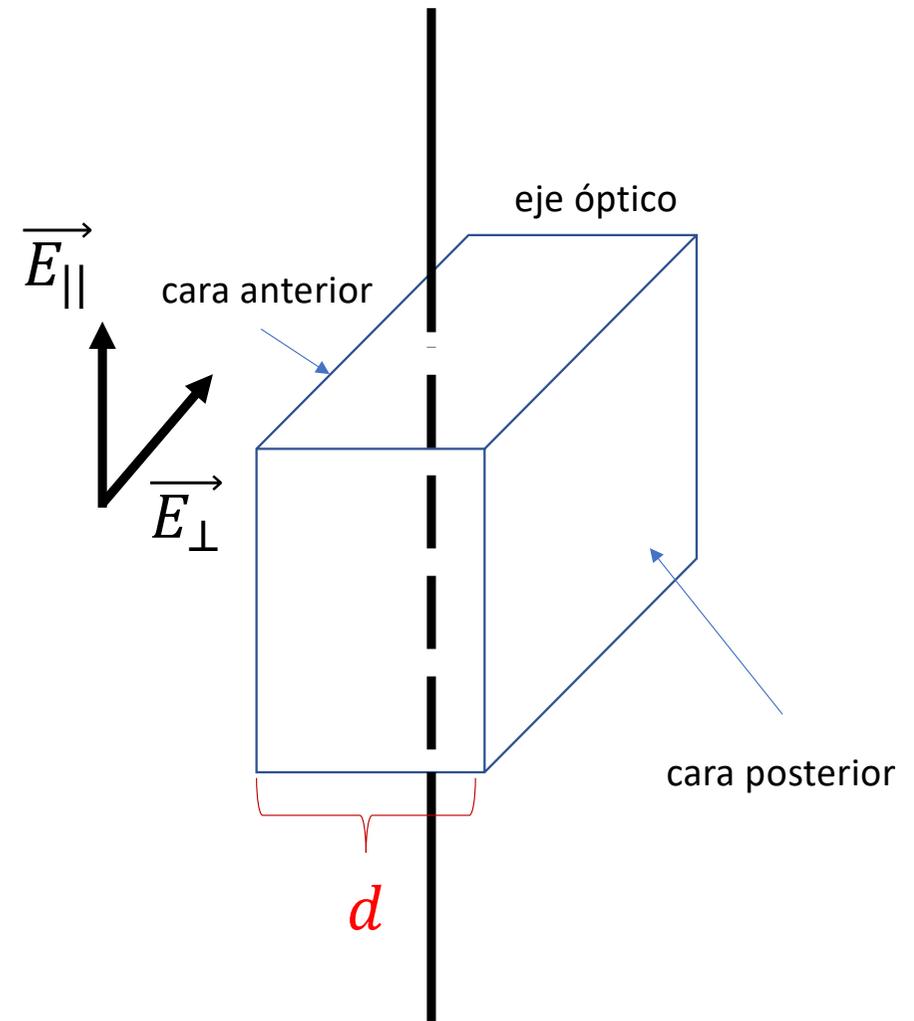
Láminas retardadoras

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

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

λ 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 λ por eso se llama cromática.
- Si tenemos luz incidente blanca linealmente polarizada, sólo el λ correspondiente va a emerger con la misma polarización.
- Pregunta: ¿con qué polarización emergerá el resto de las λ ?

Láminas de media onda

- Son las láminas donde:

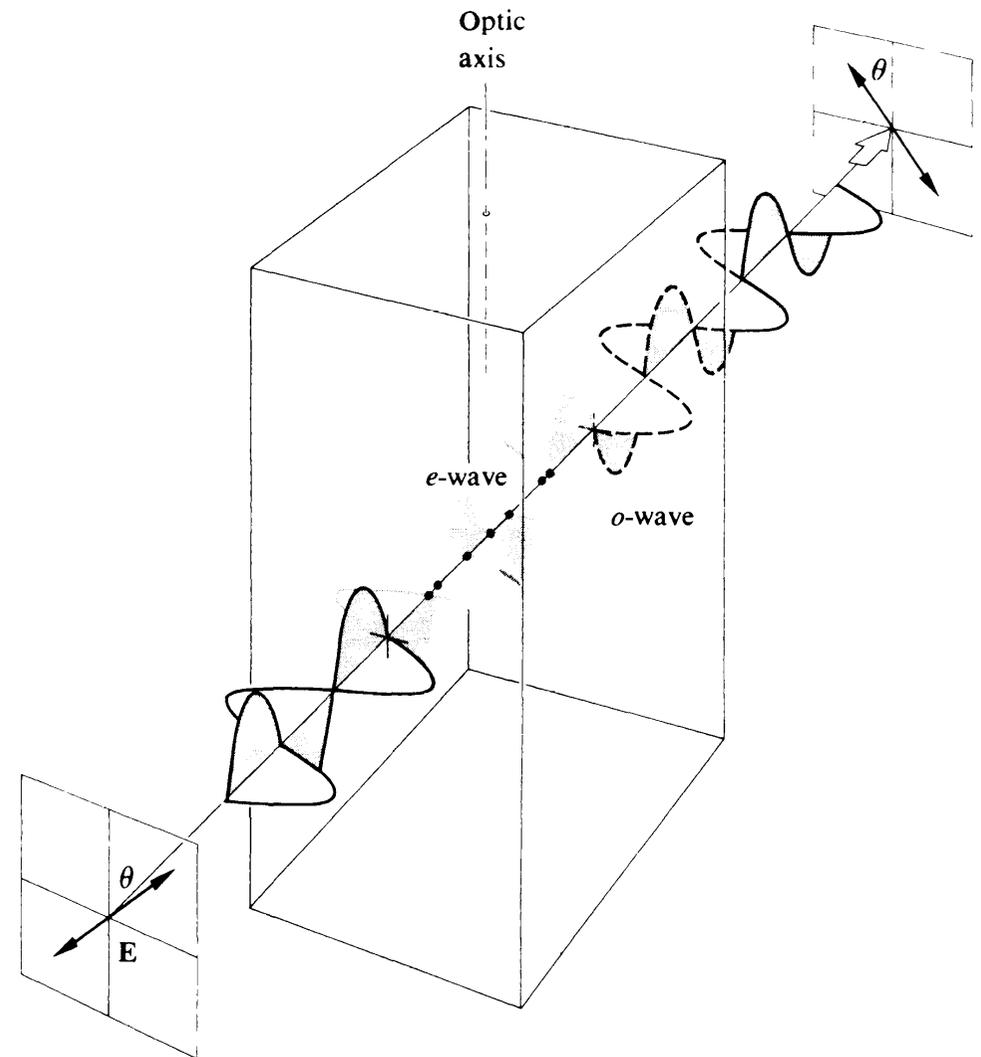
$$\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi\dots$$

- Esto corresponde a materiales donde

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

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

- Rota luz linealmente polarizada en 2θ respecto al eje optico.



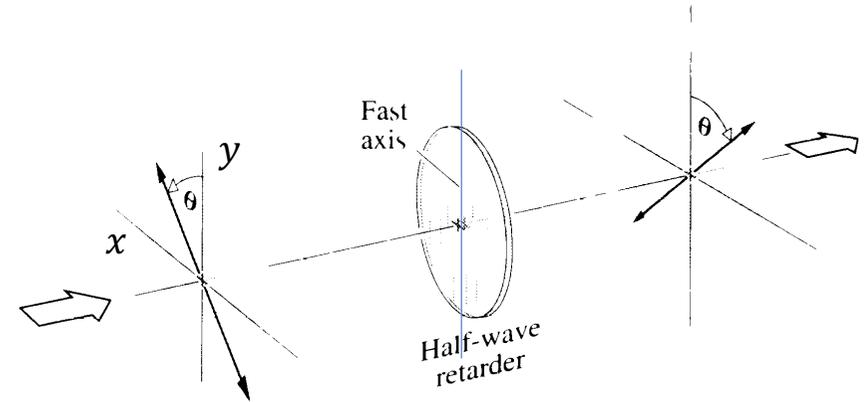
Láminas de media onda

- Antes de la lámina

$$E_x = E_0 \sin \theta \cos(kz - \omega t)$$
$$E_y = E_0 \cos \theta \cos(kz - \omega t)$$

- Después de la lámina E_x se atrasa π

$$E_x = E_0 \sin \theta \cos(kz - \omega t + \pi)$$
$$E_y = E_0 \cos \theta \cos(kz - \omega t)$$

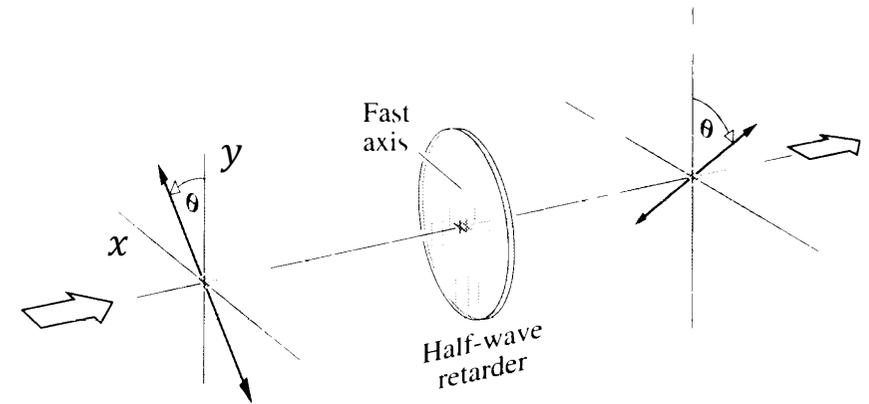


Láminas de media onda

pero

$$\cos(\alpha + \pi) = -\cos(\alpha)$$
$$\Rightarrow E_x = -E_0 \sin(\theta) \cos(kz - \omega t)$$
$$E_y = E_0 \cos \theta \cos(kz - \omega t)$$

E_x se invierte de signo



Láminas de cuarto de onda

- Son las láminas donde:

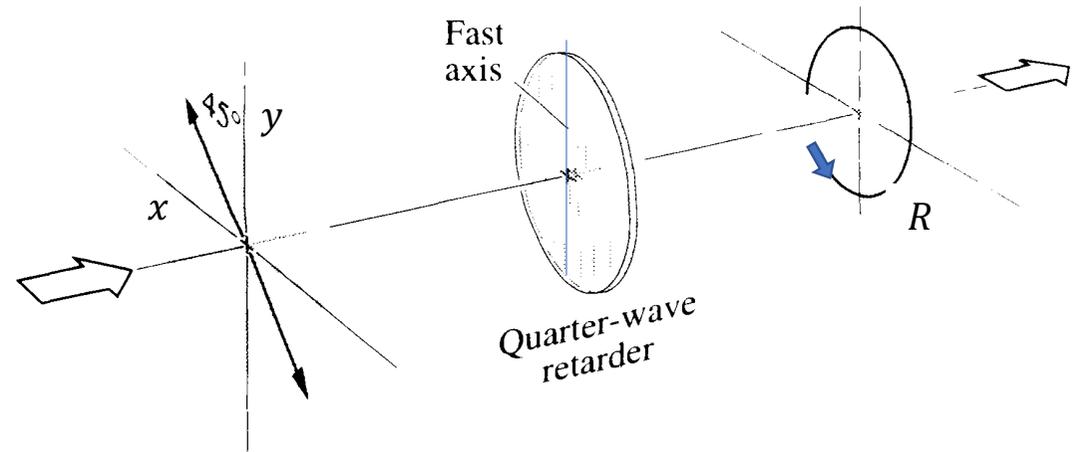
$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$$

- 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 $\vec{E}_{0x} = \vec{E}_{0y} = E_0$

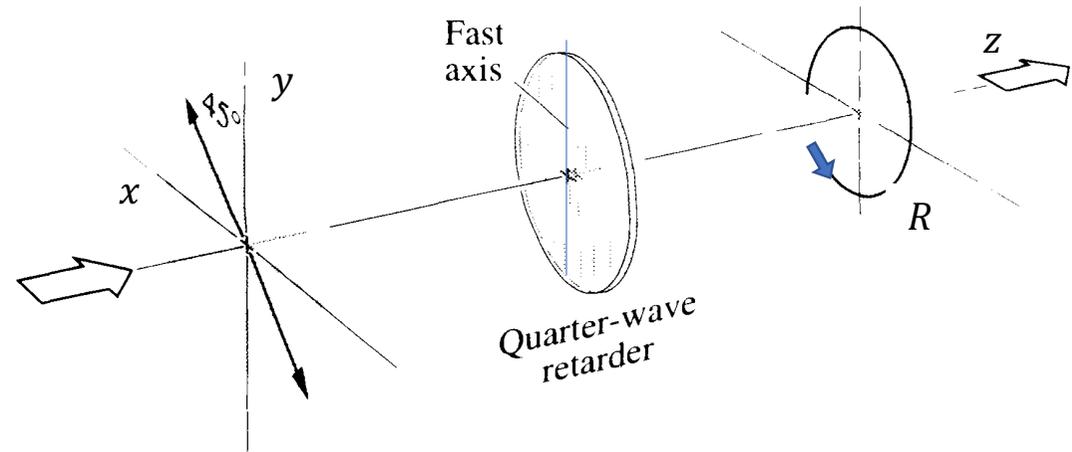
$$E_x = E_0 \cos(kz - \omega t)$$

$$E_y = E_0 \cos(kz - \omega t)$$

- Después de la lámina

$$E_x = E_0 \cos(kz - \omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$E_y = E_0 \cos(kz - \omega t)$$

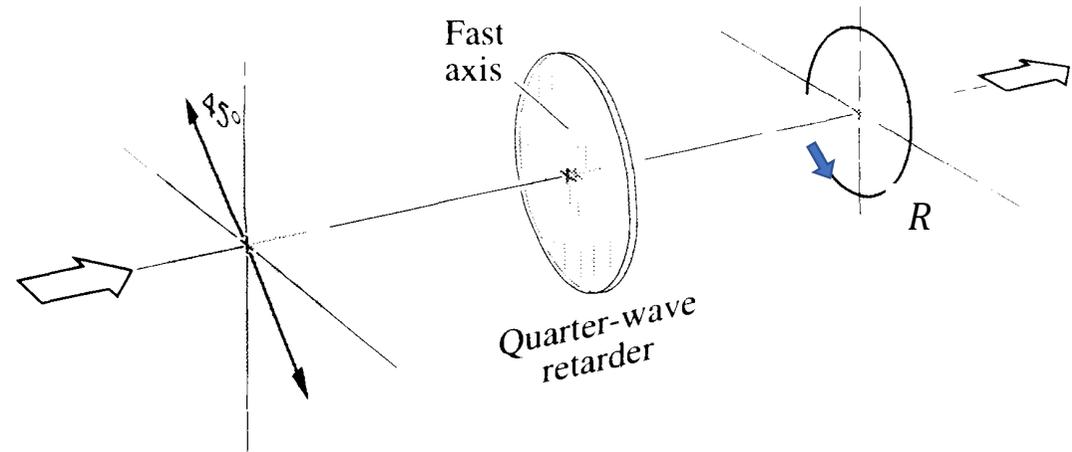


Láminas de cuarto de onda

Como $\cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) = -\sin \alpha$

Entonces

$$E_x = -E_0 \sin(kz - \omega t)$$
$$E_y = E_0 \cos(kz - \omega t)$$



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