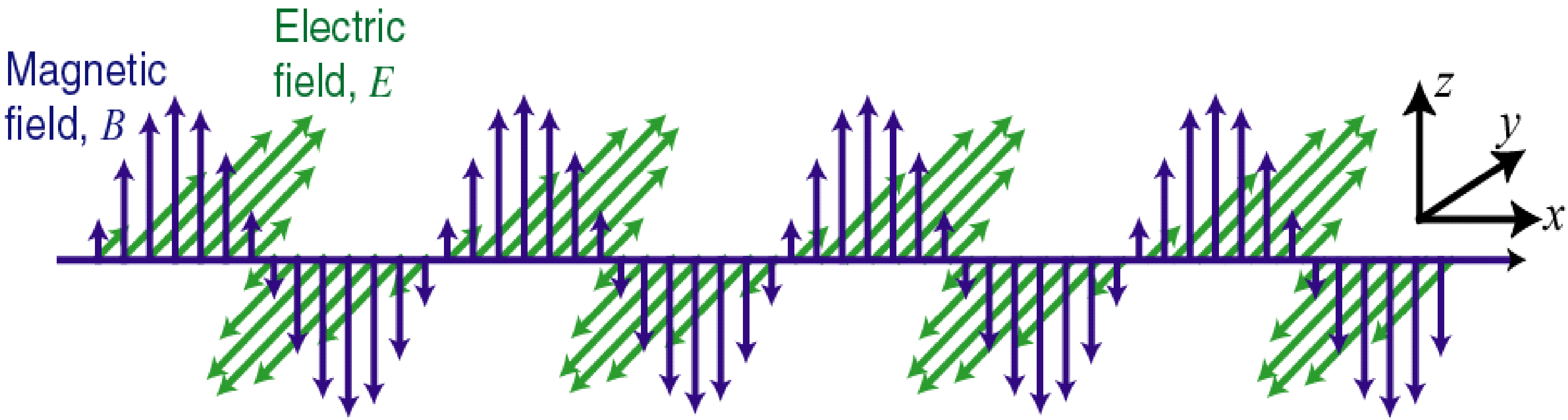
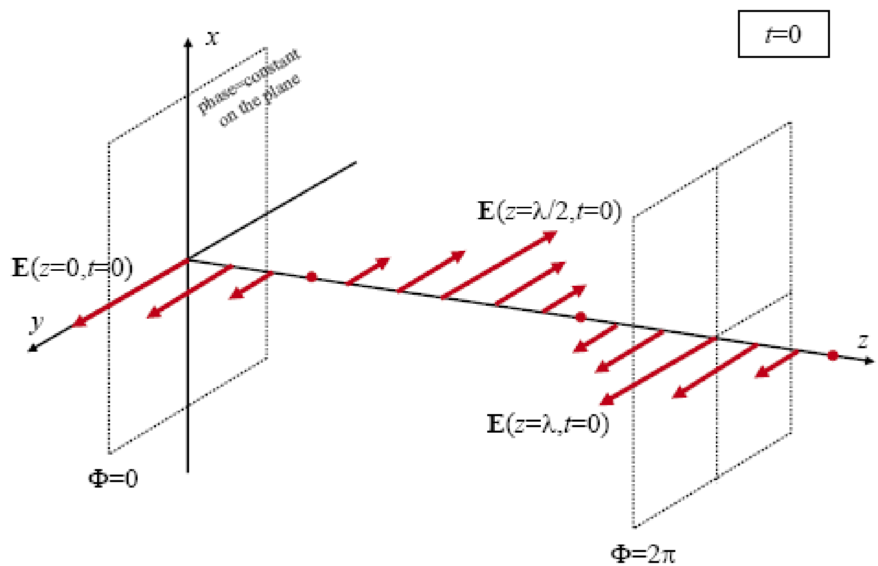
Polarización de una onda electromagnética

La luz es una onda electromagnética. Como hemos visto, las ondas EM son transversales, con los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$ perpendiculares y $\vec{E} \times \vec{B}$ coincide con la dirección de propagación.

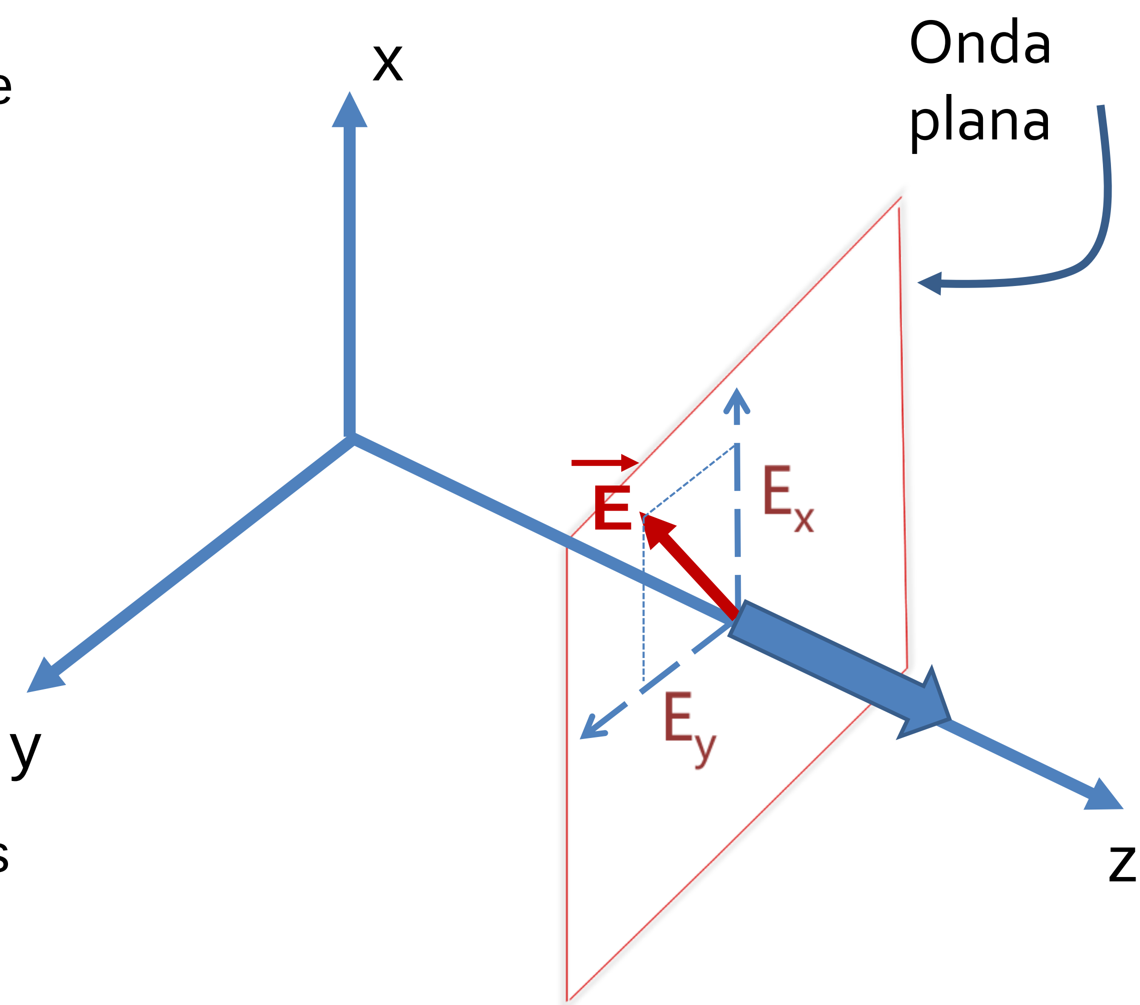


La polarización esta relacionada con la dirección de oscilación del campo eléctrico.



POLARIZACIÓN

"Fotografía instantánea" de una onda plana que se propaga a lo largo del eje Z positivo, en la que sólo se dibujó el campo eléctrico. Éste está contenido dentro del plano de la onda (OEM transversal), pero puede tener componentes en los ejes X e Y.



POLARIZACION

Analizaremos las vibraciones del campo **E** en el plano (como ya mencionamos **B** queda determinado).

Cualquier estado de polarización puede representarse por dos ondas linealmente polarizadas ortogonales

Consideraremos que el campo se propaga en la dirección +z y por lo tanto E en gral puede tener componente en las direcciones x e y:

$$\mathbf{E}\,(z,t) = E_x\,(z,t)\,\mathbf{i} + E_y\,(z,t)\,\mathbf{j}$$

$$E_x\,(z,t) = E_{ox}\,\cos\,(k\,z - \omega\,t)\;\boldsymbol{i}$$

$$E_y\,(z,t) = E_{oy}\,\cos\,(k\,z - \omega\,t + \boldsymbol{\varepsilon})\;\boldsymbol{j}$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$ es la diferencia de fase entre las componentes.

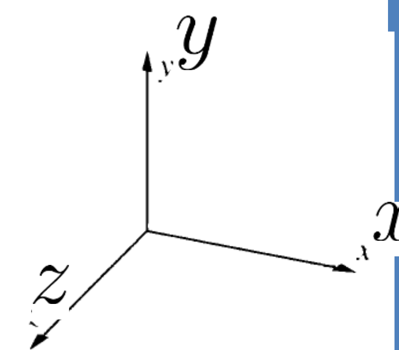
Luz linealmente polarizada (I)

Si la diferencia de fase es $\epsilon = \pm 2\,m\,\pi$ $(m = 0, 1, 2, \dots)$:

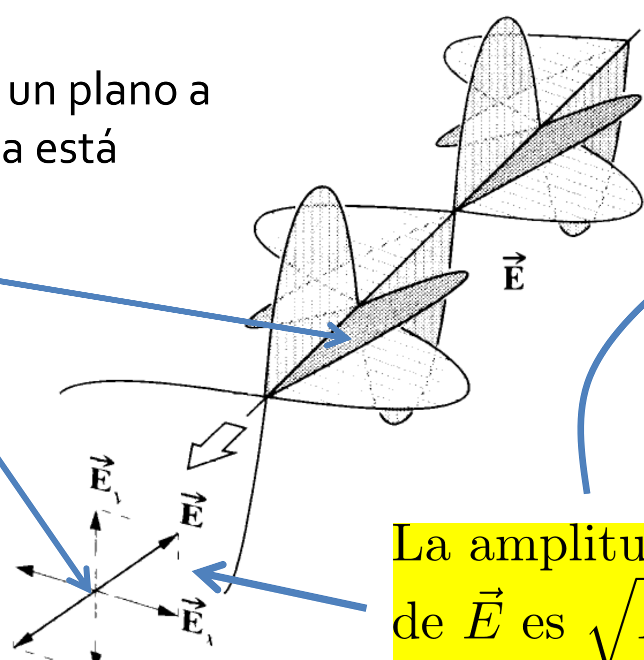
$$\Rightarrow \cos\left(kz - \omega t + \epsilon\right) = \cos\left(kz - \omega t\right)$$

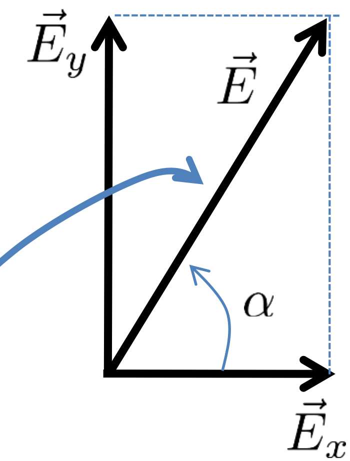
$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

$$\text{donde} \begin{cases} \vec{E}_x(z,t) = E_{0x}\ \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{i} \\ \vec{E}_y(z,t) = E_{0y}\ \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{j} \end{cases}$$



El campo eléctrico resultante oscila sobre un plano a un ángulo α del eje x. Decimos que la onda está *linealmente polarizada* con ángulo α.





$$\tan(\alpha) = \frac{E_y(z,t)}{E_x(z,t)}$$

$$= \frac{E_{0y}\cos(\dots)}{E_{0x}\cos(\dots)} = \frac{E_{0y}}{E_{0x}} > 0$$

$$\Longrightarrow \alpha > 0$$

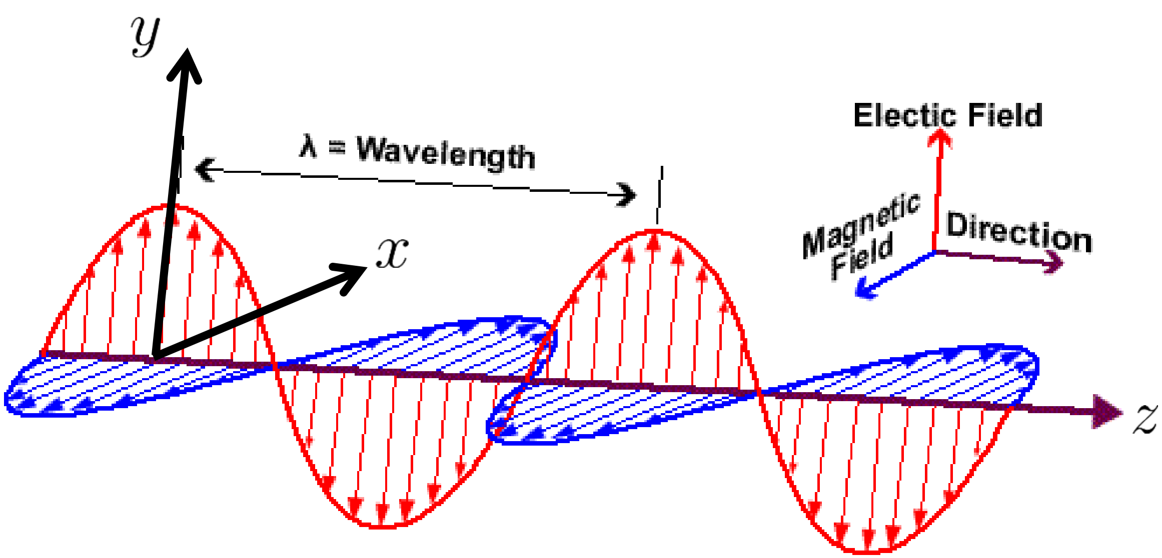
La amplitud máxima de $\vec{E}$ es $\sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}$

Luz linealmente polarizada

El caso más sencillo es si la amplitud en la dirección x es cero (E_{0x} = o), queda únicamente la componente en la dirección y (vertical). En este caso decimos que la onda está *linealmente polarizada*.

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

$$\text{donde} \begin{cases} \vec{E}_x(z,t) = 0\,\check{i} \\ \vec{E}_y(z,t) = E_{0y}\,\cos(kz - \omega t + \epsilon)\,\check{j} \end{cases}$$



Luz linealmente polarizada (II)

Si la diferencia de fase es $\epsilon = \pm(2\,m+1)\pi \;\; (m = 0, 1, 2, \ldots)$:

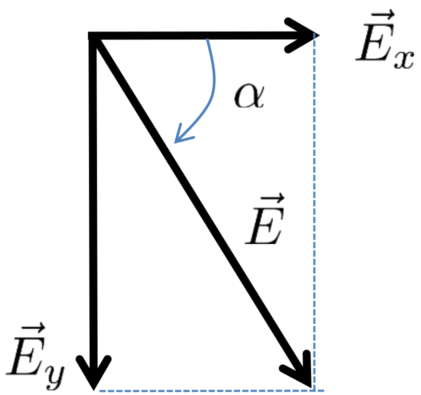
$$\Rightarrow \cos\left(kz - \omega t + \epsilon\right) = -\cos\left(kz - \omega t\right)$$

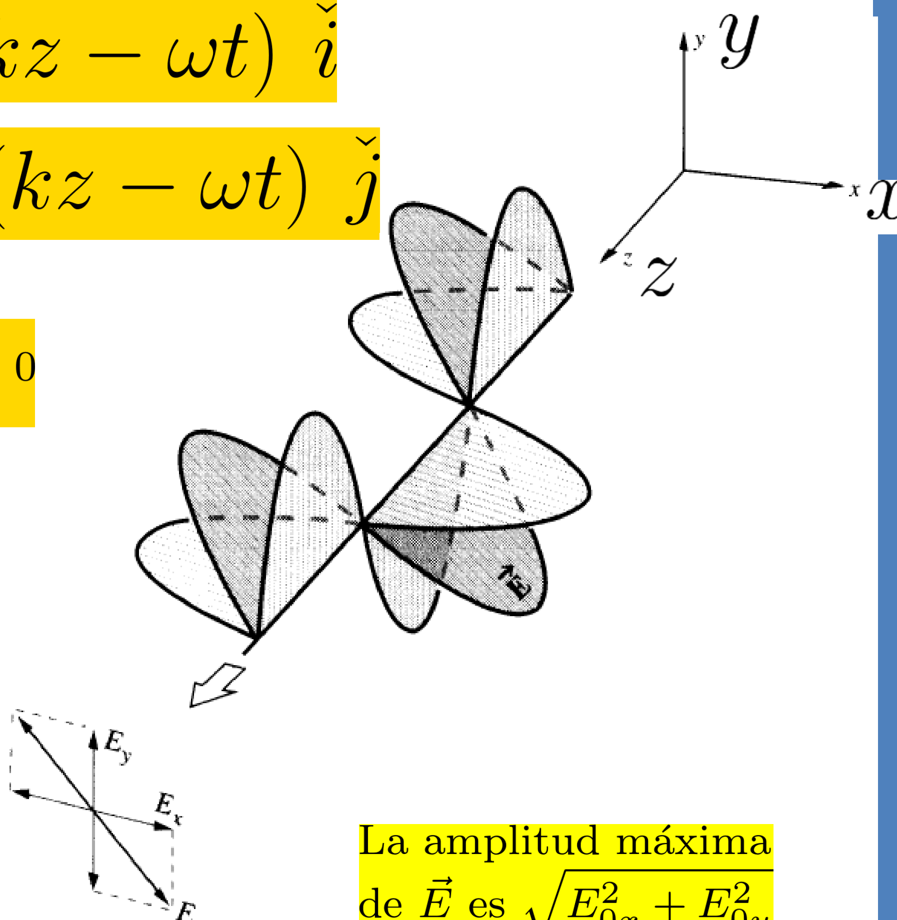
$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

$$\text{donde} \begin{cases} \vec{E}_x(z,t) = E_{0x}\ \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{i} \\ \vec{E}_y(z,t) = -E_{0y}\ \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{j} \end{cases}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{E_y(z,t)}{E_x(z,t)} = \frac{-E_{0y}\cos(\ldots)}{E_{0x}\cos(\ldots)} = -\frac{E_{0y}}{E_{0x}} < 0$$

$$\Longrightarrow \alpha < 0$$





La amplitud máxima de $\vec{E}$ es $\sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}$

Polarización circular (a derecha)

Si las amplitudes son iguales ($E_{0x} = E_{0y} = E_0$) y la diferencia de fase es $\epsilon = (\pm 2\,m - \frac{1}{2})\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$):

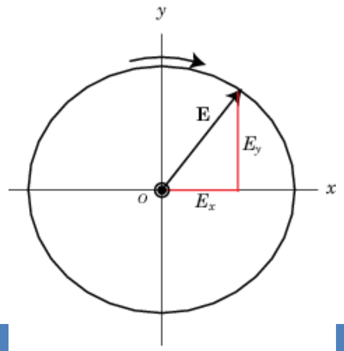
$$\Rightarrow \cos\left(kz - \omega t + \epsilon\right) = \operatorname{sen}\left(kz - \omega t\right)$$

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

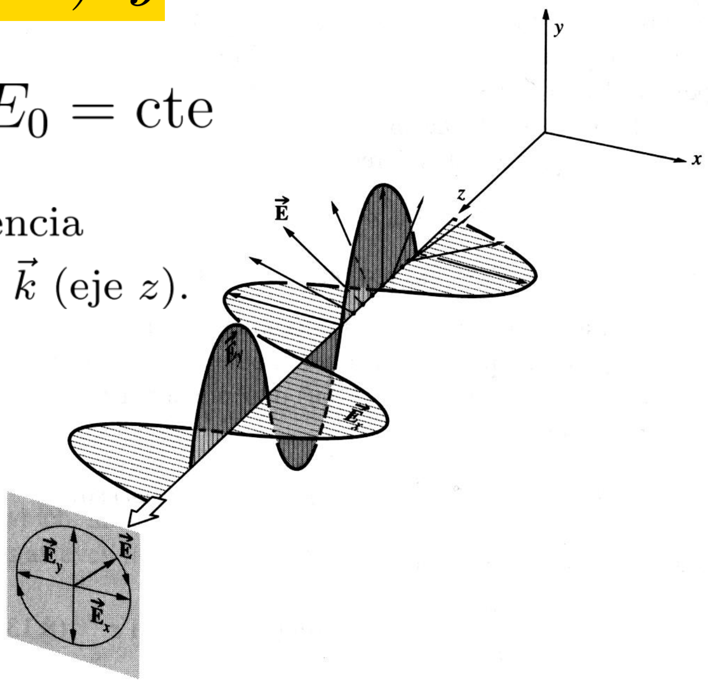
$$\text{donde} \begin{cases} \vec{E}_x(z,t) = E_0 \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{i} \\ \vec{E}_y(z,t) = E_0 \operatorname{sen}\left(kz - \omega t\right)\ \check{j} \end{cases}$$

$$\left\|\vec{E}\right\| = \sqrt{[E_0 \cos(\dots)]^2 + [E_0 \operatorname{sen}(\dots)]^2} = E_0 = \text{cte}$$

El campo resultante $\vec{E}(z,t)$ **gira** describendo una circunferencia de radio E_0 con velocidad angular ω a derecha alrededor de $\vec{k}$ (eje z).



Como el giro visto desde z es hacia la derecha, se dice que la polarización es ***circular a derecha***.



Polarización circular (a izquierda)

Si las amplitudes son iguales ($E_{0x} = E_{0y} = E_0$) y la diferencia de fase es $\epsilon = (\pm 2\,m + \frac{1}{2})\pi$ $(m = 0, 1, 2, \dots)$:

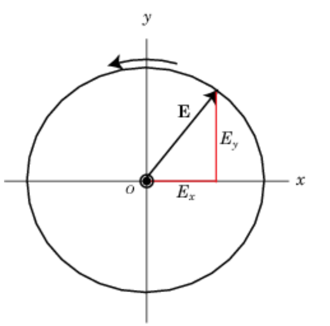
$$\Rightarrow \cos\left(kz - \omega t + \epsilon\right) = -\mathrm{sen}\left(kz - \omega t\right)$$

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

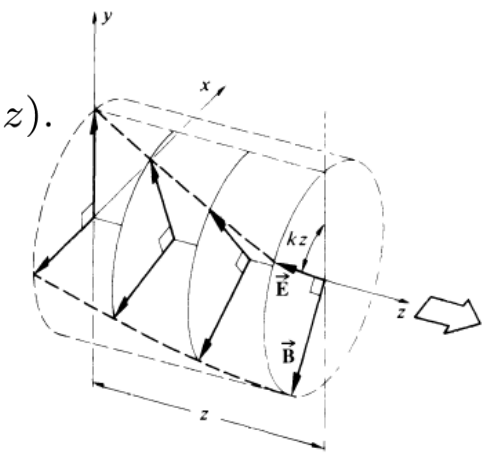
$$\text{donde} \begin{cases} \vec{E}_x(z,t) = E_0\ \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{i} \\ \vec{E}_y(z,t) = -E_0\,\mathrm{sen}\left(kz - \omega t\right)\ \check{j} \end{cases}$$

$$\left\|\vec{E}\right\| = \sqrt{[E_0\ \cos(\dots)]^2 + [-E_0\,\mathrm{sen}(\dots)]^2} = E_0 = \mathrm{cte}$$

El campo resultante $\vec{E}(z,t)$ **gira** describendo una circunferencia de radio E_0 con velocidad angular ω a izquierda alrededor de $\vec{k}$ (eje z).

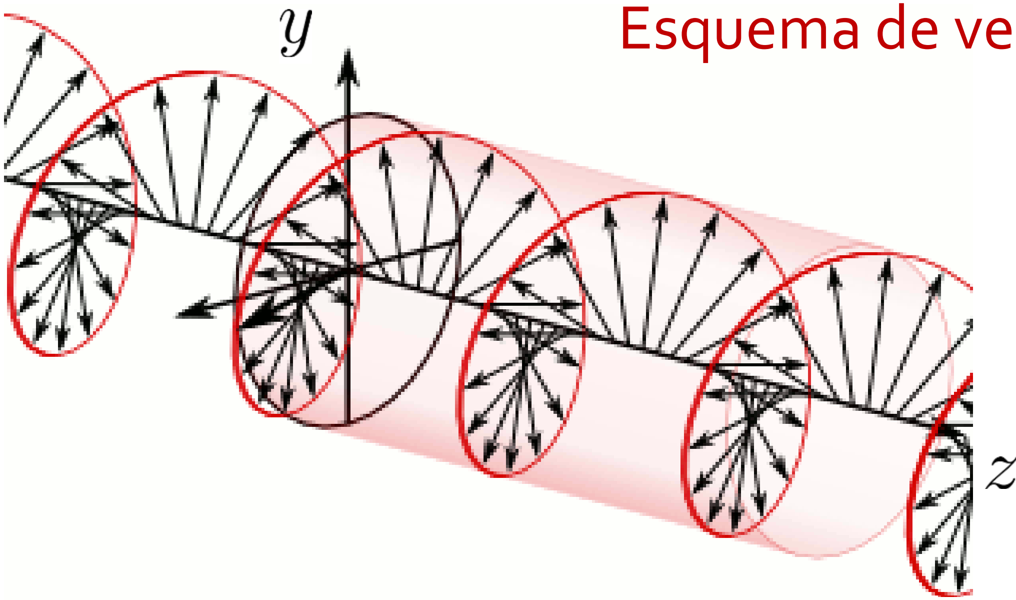


Como el giro visto desde z es hacia la izquierda, se dice que la polarización es ***circular a izquierda***.

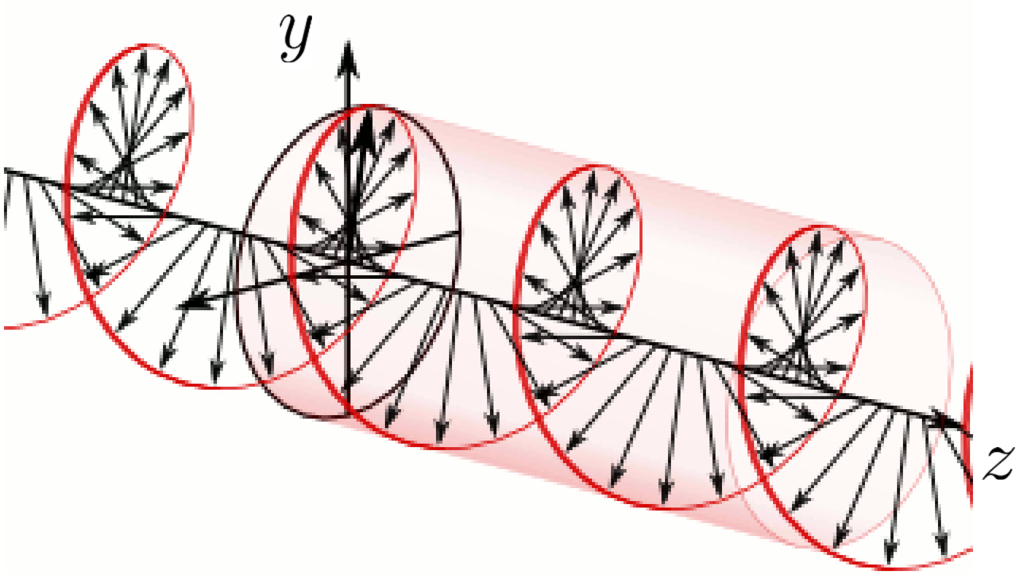


Polarización circular (ambos casos)

Esquema de vectores



Polarización circular
a izquierda



Polarización circular
a derecha

Polarización elíptica sobre los ejes (a derecha)

Si las amplitudes son distintas ($E_{0x} \neq E_{0y}$) y la diferencia de fase es $\epsilon = (\pm 2\,m - \frac{1}{2})\pi$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$):

$$\Rightarrow \cos(kz - \omega t + \epsilon) = \operatorname{sen}(kz - \omega t)$$

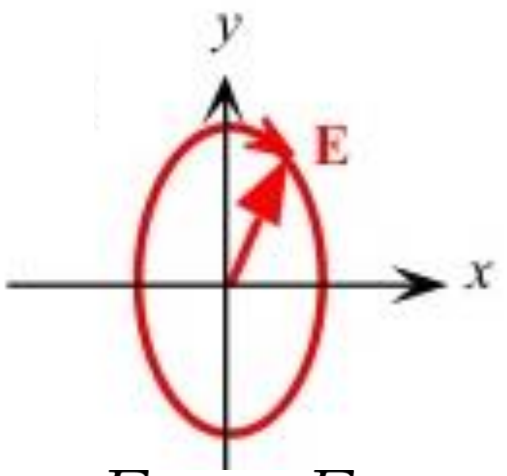
$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

$$\text{donde} \begin{cases} \vec{E}_x(z,t) = E_{0x}\, \cos(kz - \omega t)\ \check{i} \\ \vec{E}_y(z,t) = E_{0y}\, \operatorname{sen}(kz - \omega t)\ \check{j} \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 = 1$$

Ecuación de una elipse sobre los ejes cartesiano.

El campo resultante $\vec{E}(z,t)$ **gira** describiendo una **elipse** sobre los ejes, con semiejes E_{0x} y E_{0y}.
Nótese que la polarización circular es un caso especial de la elíptica.



$$E_{0y} > E_{0x}$$

Polarización elíptica general (a derecha)

Si las amplitudes son distintas ($E_{0x} \neq E_{0y}$) y la diferencia de fase es $\epsilon \neq 0, \pi/2, \pi$ (o múltiplos enteros de esos valores):

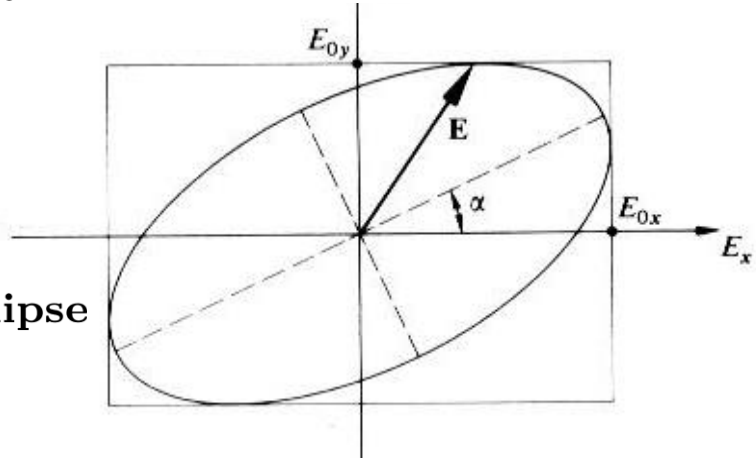
$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

$$\text{donde} \begin{cases} \vec{E}_x(z,t) = E_{0x}\ \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{i} \\ \vec{E}_y(z,t) = E_{0y}\ \cos\left(kz - \omega t + \epsilon\right)\ \check{j} \end{cases}$$

Se puede demostrar que estos campos cumplen la ecuación de una elipse rotada

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos(\epsilon) = \operatorname{sen}^2(\epsilon)$$

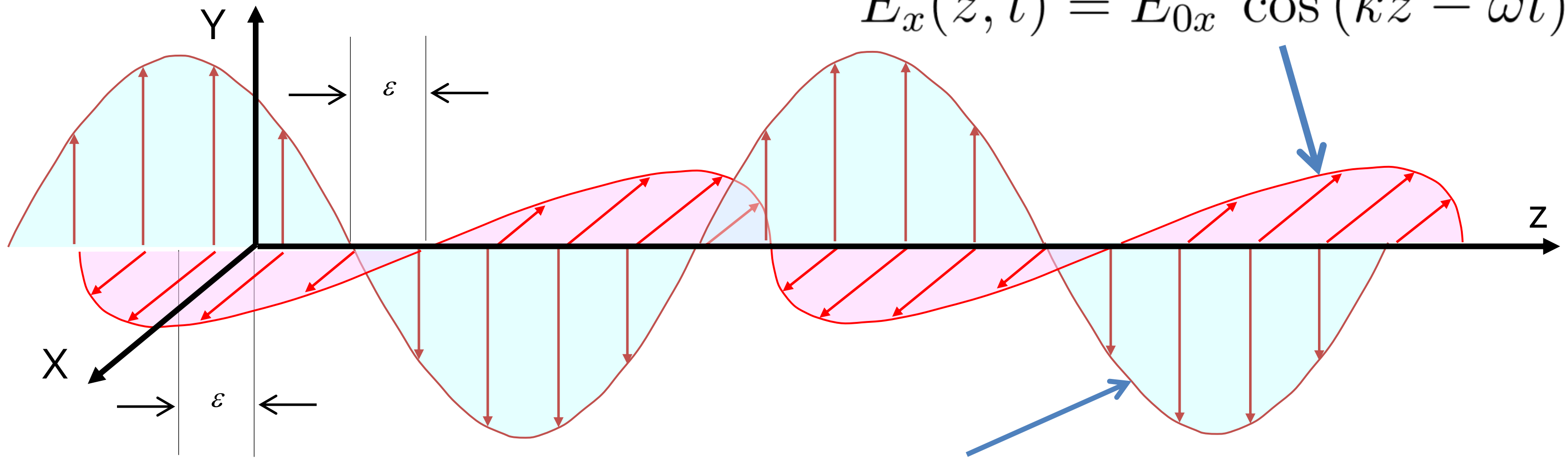
$$\tan(2\alpha) = \frac{2\,E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}\cos(\epsilon)$$



El campo resultante $\vec{E}(z,t)$ **gira** describiendo una **elipse** rotada un ángulo α, con semiejes E_{0x} y E_{0y}.

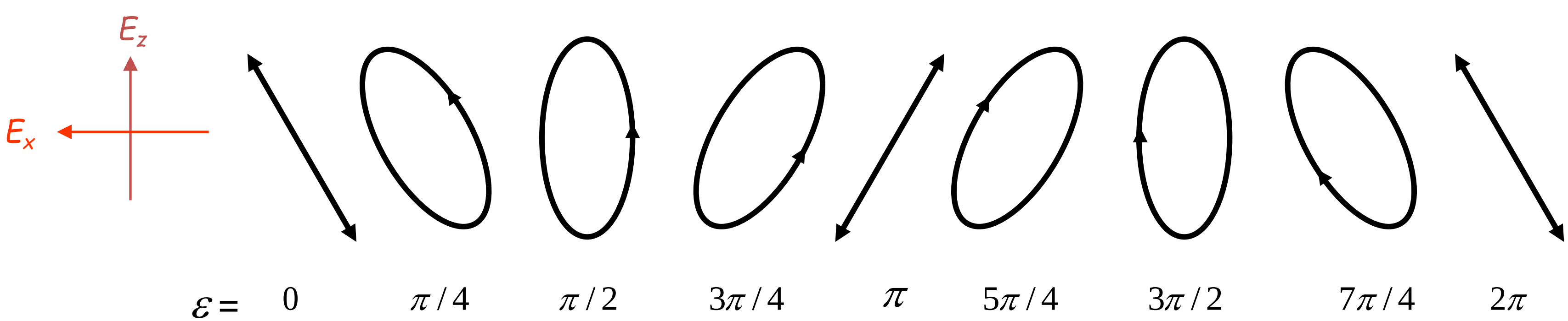
Polarización elíptica general

$$\vec{E}_x(z,t) = E_{0x}\ \cos\left(kz - \omega t\right)\ \check{i}$$



$$\vec{E}_y(z,t) = E_{0y}\ \cos\left(kz - \omega t + \epsilon\right)\ \check{j}$$

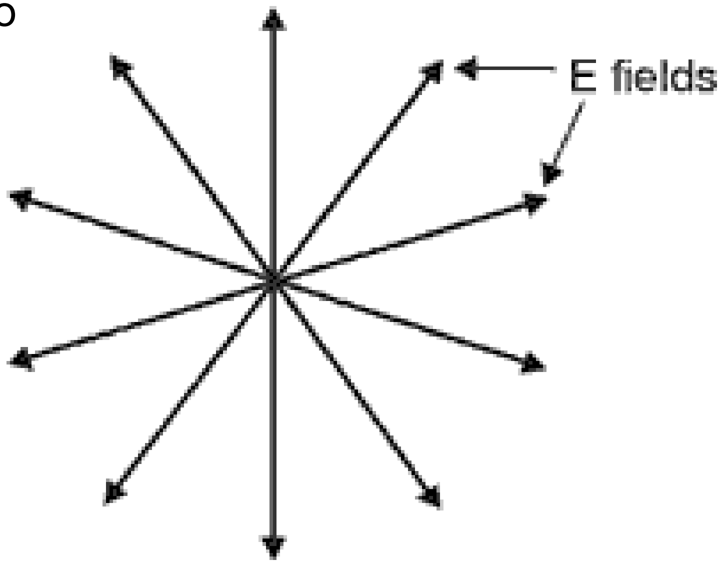
Trayectoria descrita por el extremo del vector campo eléctrico a medida que avanza la onda



Nótese que las polarizaciones lineal y circular son casos particulares de la elíptica.

La luz natural

La luz que nos llega del sol o de una lámpara incandescente no privilegia ninguna dirección del plano perpendicular a la dirección de propagación, por lo tanto el campo rota constantemente en cualquier dirección. Decimos que es luz “no polarizada”.



Una fuente de luz ordinaria consiste de un número muy grande de emisores atómicos orientados al azar. Cada átomo excitado emite un tren de onda polarizado durante unos 10^{-8} s. Todas emisiones de distintas frecuencias se pueden combinar para formar una onda polarizada que no persiste más que ese tiempo.

Si los cambios de estado de polarización tienen lugar tan rápido que es imposible distinguir cualquier estado de polarización resultante, decimos que la onda es **luz natural** (o *luz polarizada al azar*).

La luz natural

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t)$$

Los estados de polarización varían rápidamente en el tiempo en la luz natural. Cuando las fases de las componentes x e y fluctúan de esa forma, se dice a veces que la luz es *no polarizada*. Matemáticamente, la luz natural se puede representar por dos ondas arbitrarias de igual amplitud, linealmente polarizadas, que son ortogonales e incoherentes entre sí, donde *su diferencia de fase relativa varía rápidamente y al azar:*

$$\text{donde}\begin{cases}\vec{E}_x(z,t) = E_{0x}\ \cos\left[kz - \omega t - \theta_x(t)\right]\ \check{i}\\ \vec{E}_y(z,t) = E_{0y}\ \cos\left[kz - \omega t + \theta_y(t)\right]\ \check{j}\end{cases}$$

donde $\theta_x(t)$ y $\theta_y(t)$ son las fases.

Si la fase relativa que varia temporalmente fluctúa, $\theta_x(t) - \theta_y(t)$, la luz no mantiene un único estado de polarización sino presenta una sucesión de diferentes estados de polarización y de allí que se denomine no polarizada.

Obtención de luz polarizada

Discutiremos dos posibilidades para obtener luz polarizada:

1. Dicroísmo (absorción selectiva)
2. Reflexión (Ley Brewster)

También existen otras formas:

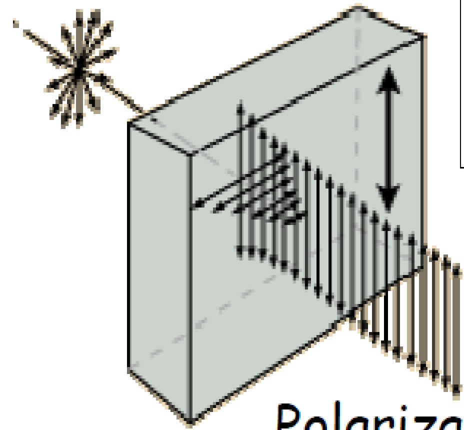
- Dispersión (scattering)
- Birrefringercia (doble refracción)

1. Dicroísmo (absorción selectiva)

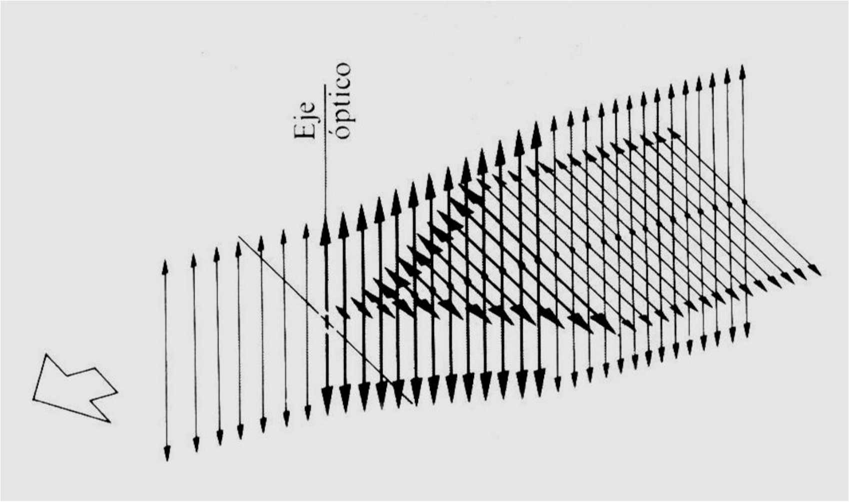
Hay una absorción selectiva de una de las componentes del campo E incidente. Son medios *anisotrópicos* con asimetrías en su red cristalina que producen absorción preferencial en un eje *(eje óptico).* Produce *polarización LINEAL.*

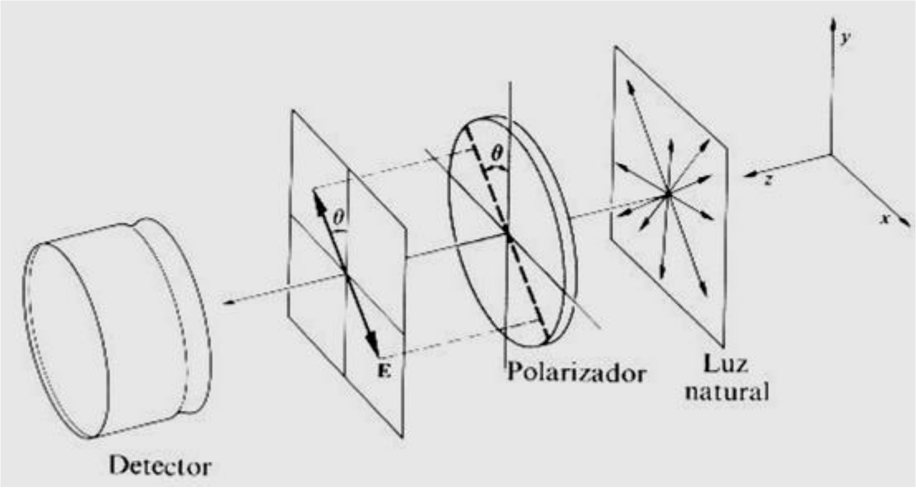
Ejemplos de medios dicróicos:
•turmalina (silicatos de boro),
•polaroids (Lamb, 1928).

Polarización por absorción.
Lámina Polaroid.



Polarizador dicroico





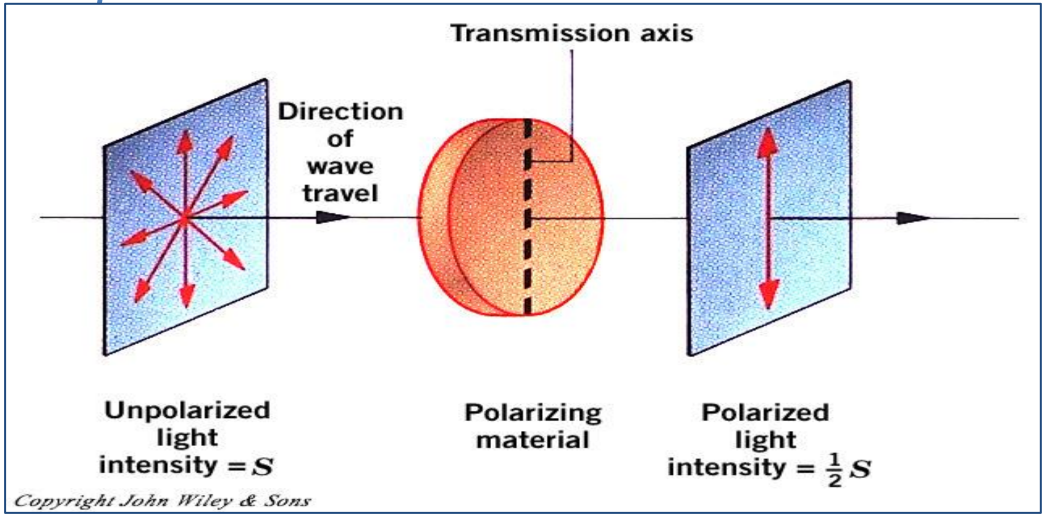
1. Dicroísmo (absorción selectiva)

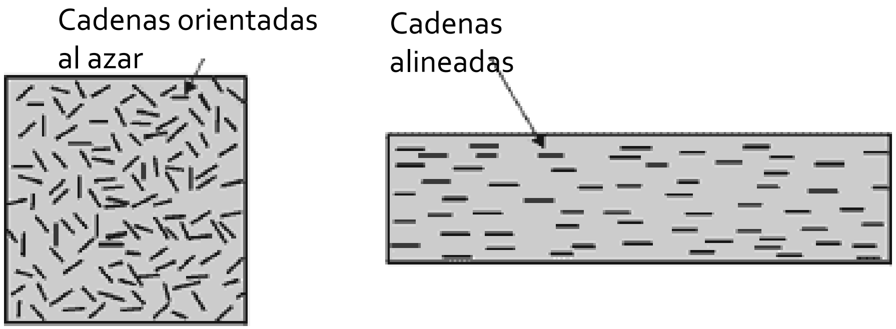
Filtros polarizadores

Un polarizador ideal deja pasar el 100% de la luz incidente en dirección de su eje de transmisión y bloquea toda la luz que incide vibrando en la dirección perpendicular. El más empleado usualmente es el *polaroid*.

Polaroid

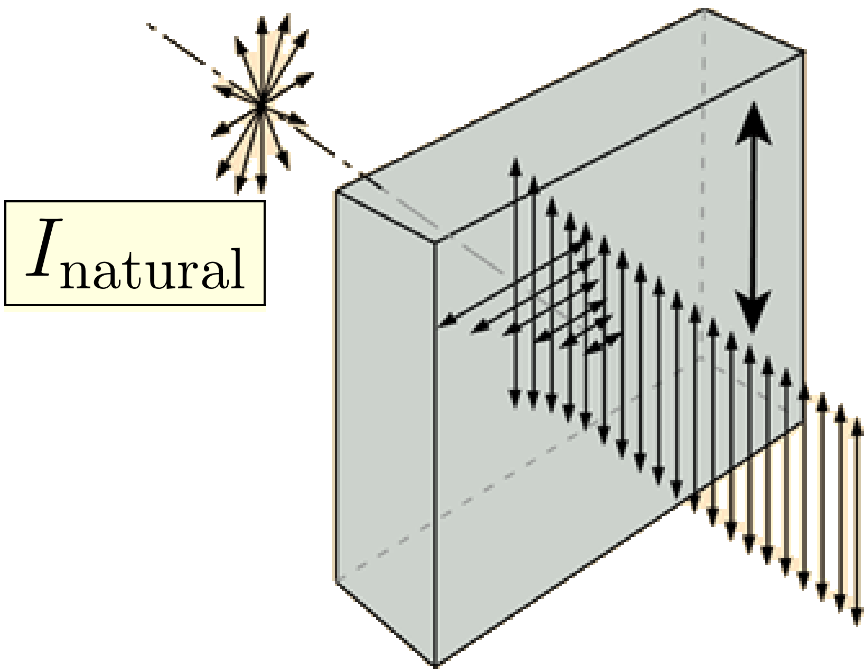
- Alcohol polivinílico impregnado con yodo
- Estirado en caliente
- Absorbe el campo E alineado con las moléculas
- Transmite el E perpendicular a las moléculas





1. Dicroísmo (absorción selectiva)

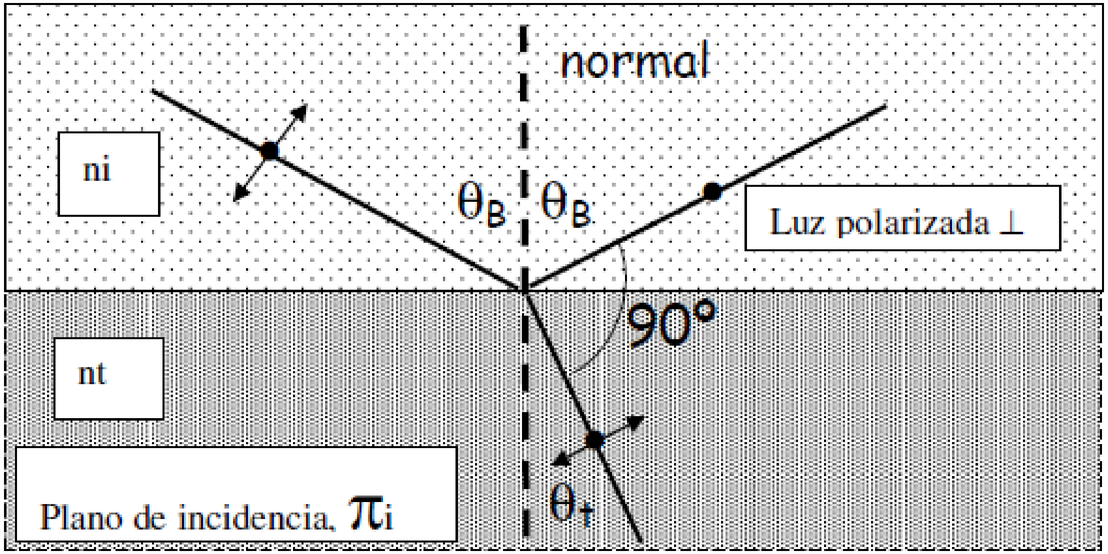
Si la entrada a un polarizador es luz natural, la salida es luz *linealmente polarizada* en la dirección del eje de transmisión del polarizador.



$$I_{\text{transmitida}} = I_0 = \frac{I_{\text{natural}}}{2}$$

Cuando la luz natural incide sobre un polarizador, la intensidad transmitida es la *mitad de la incidente.*

2. Reflexión (Ley de Brewster)



Para un ángulo, llamado "Ángulo de Brewster" la onda reflejada no tiene componente de E paralela al plano de incidencia)

Para este ángulo la luz reflejada está totalmente polarizada en dirección perpendicular al plano de incidencia

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

$$\text{y se cumple que } \theta_B + \theta_t = 90^\circ$$

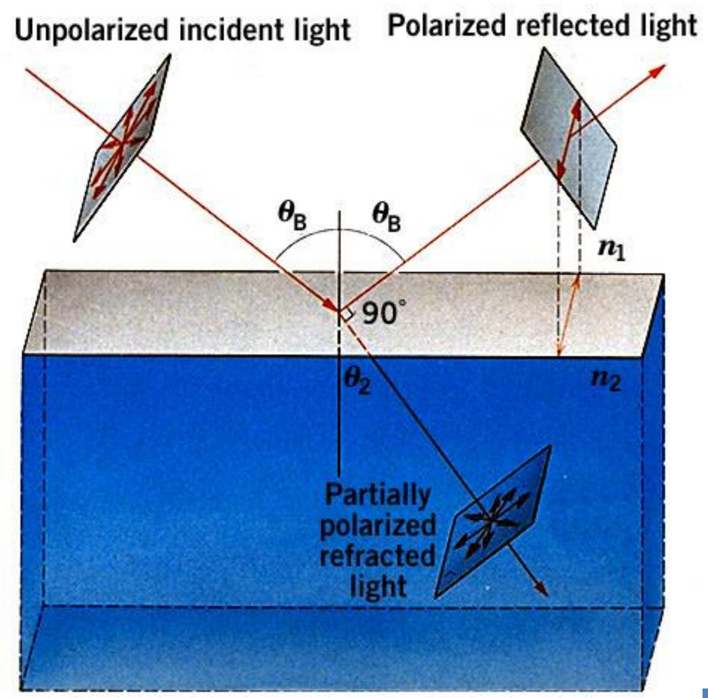
2. Reflexión (Ley de Brewster)

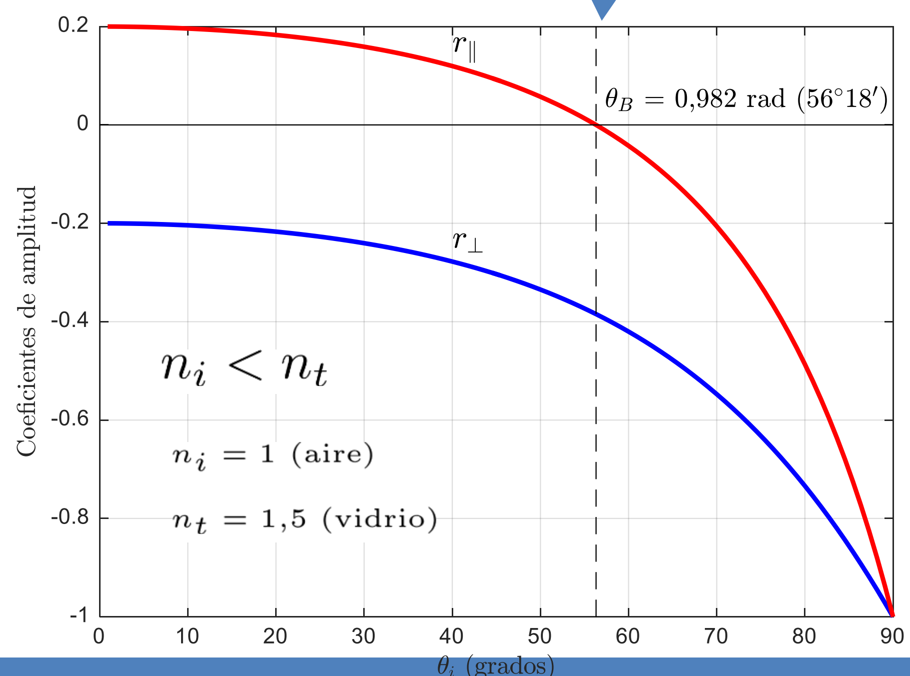
Cuando $\theta_i + \theta_t = \pi/2 \equiv 90°$ la luz reflejada a $\theta_i = \theta_B$ está SÓLO linealmente polarizada en la dirección perpendicular al plano de incidencia ($r_{\parallel} = 0$). Por Ley de Snell sabemos que $n_i \operatorname{sen}(\theta_i) = n_t \operatorname{sen}(\theta_t)$:

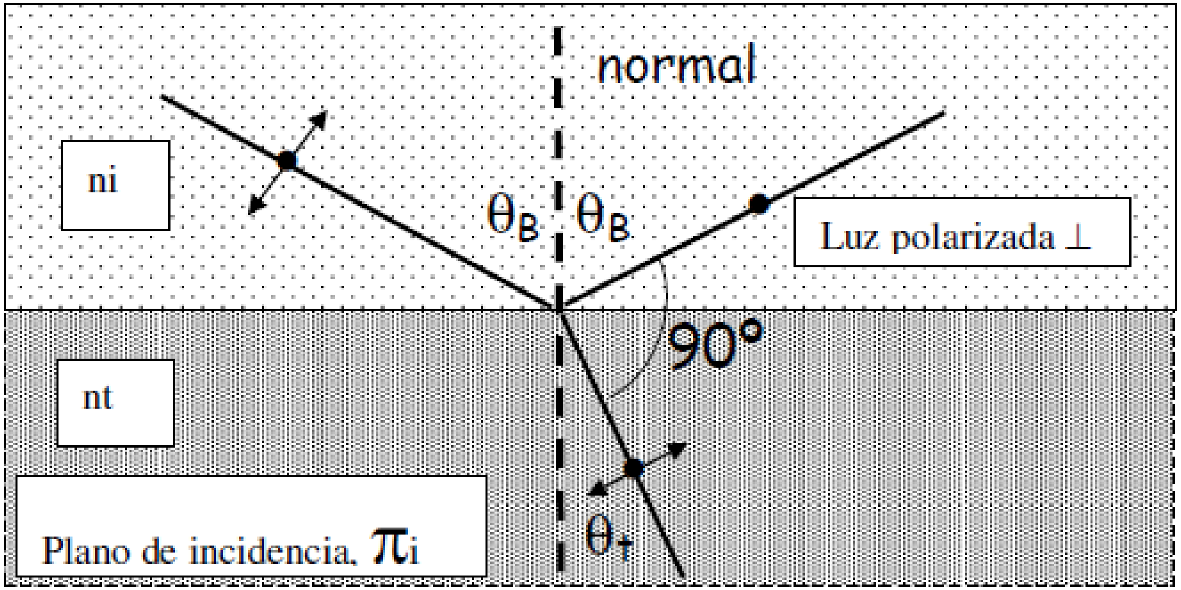
$$\Longrightarrow \underline{n_i \operatorname{sen}(\theta_i)} = n_t \operatorname{sen}(\theta_t) = n_t \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right) = \underline{n_t \cos(\theta_i)}$$

$$\Longrightarrow \boxed{\tan(\theta_B) = \frac{n_t}{n_i}}$$

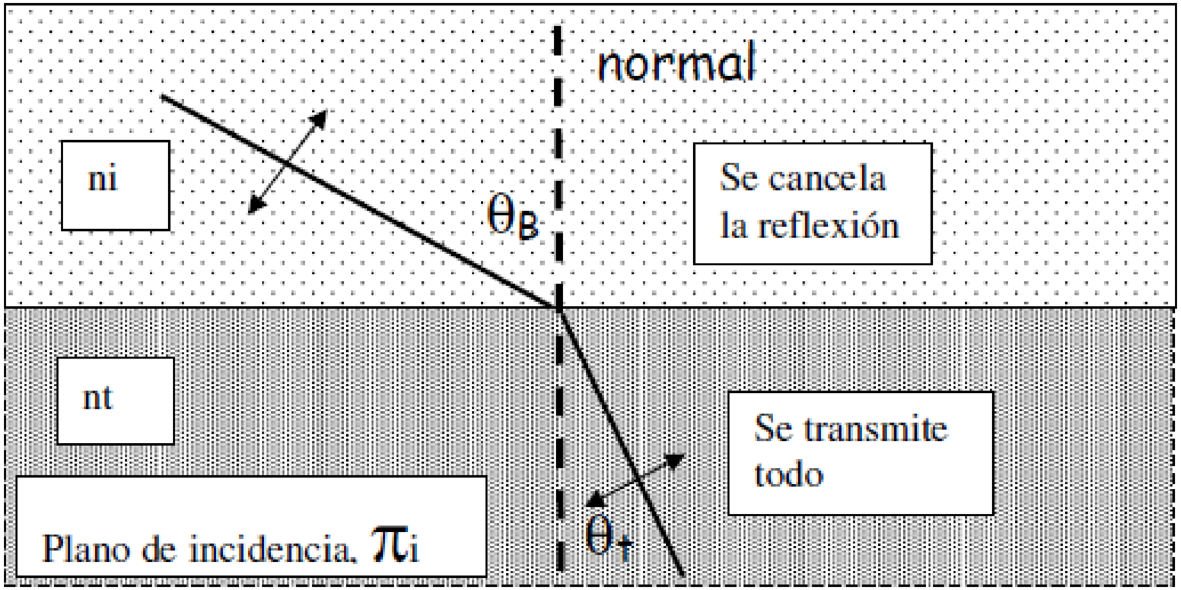
θ_B es el *ángulo de Brewster*





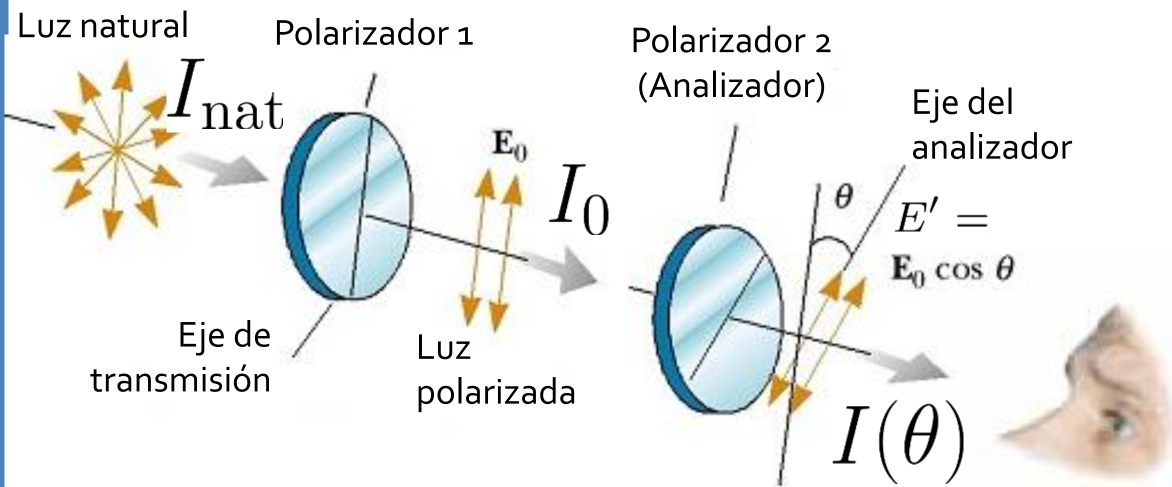


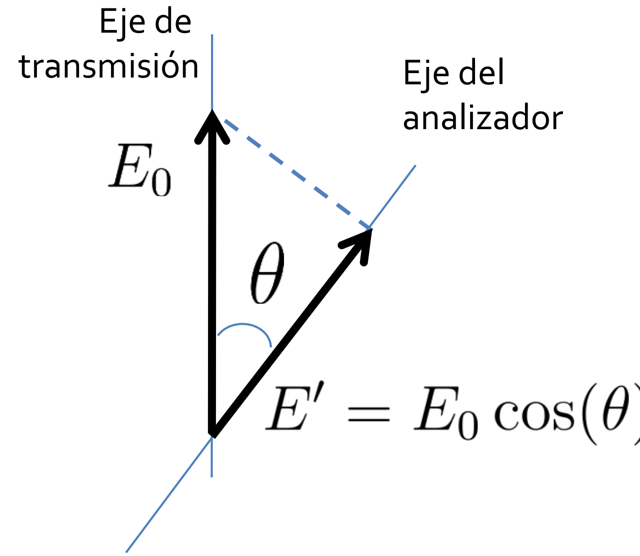
¿Que ocurre si incide luz polarizada en el plano de incidencia?



No hay reflexión si se incide con luz polarizada en el plano de incidencia

Ley de Malus (polarización lineal)





La intensidad I de la luz polarizada es

$$I_0 = \left\langle \left\| \vec{S} \right\| \right\rangle = \frac{c\,\varepsilon_0}{2} \left\| \vec{E} \right\|^2_{\text{máx}} = \frac{c\,\varepsilon_0}{2} E_0^2$$

La intensidad I de la luz que pasa por el analizador es

$$I(\theta) = \frac{c\,\varepsilon_0}{2} E'^2 = \frac{c\,\varepsilon_0}{2} \left[E_0 \cos(\theta)\right]^2 = I_0 \cos^2(\theta) \Rightarrow \boxed{I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)}$$

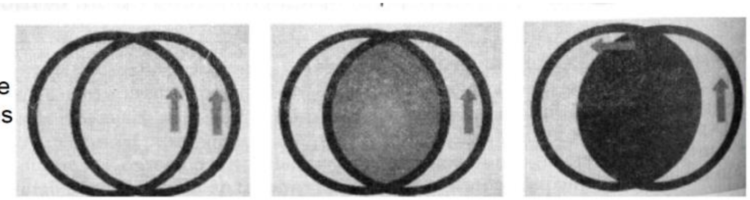
Ley de Malus

$I(\theta = 0) = I_0$ (polarizadores alineados)

$I(\theta = 90°) = 0$ (polarizadores perpendiculares)

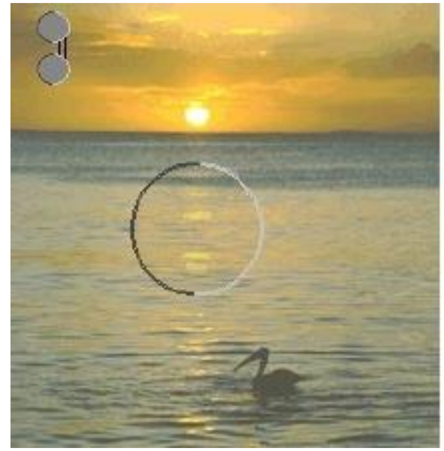
Con la luz natural sola no se puede usar la Ley de Malus; ésta sólo se aplica para luz linealmente polarizada (polarizador 1).

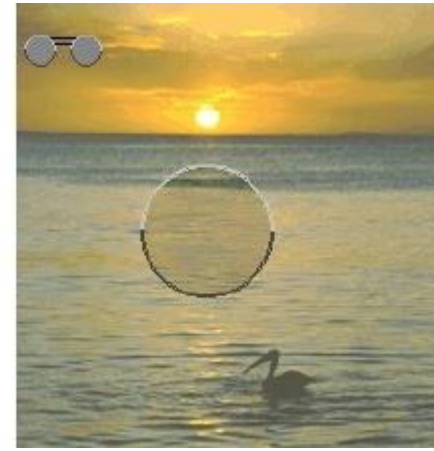
Luz a través de 2 Polarizadores con Ejes //

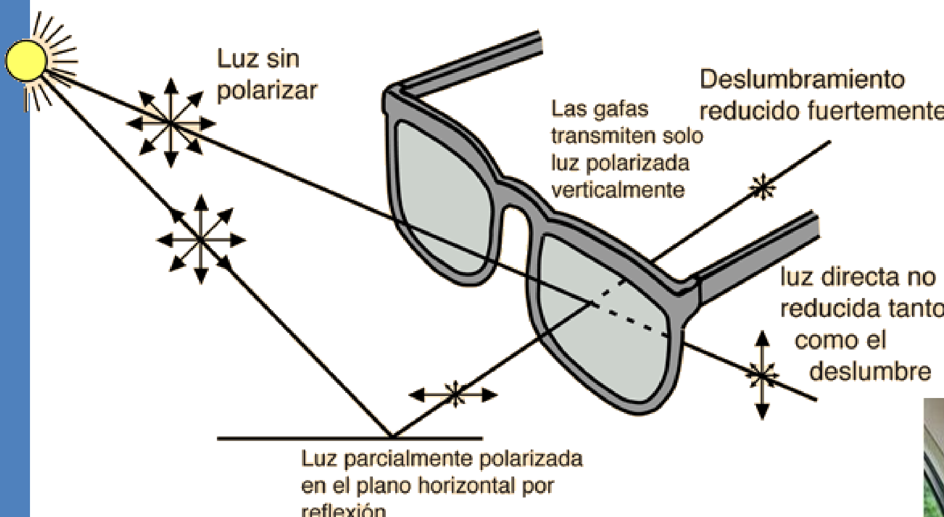


Luz a través de 2 Polarizadores con Ejes ⊥

Algunas aplicaciones prácticas







Reflexión a través de polarizador que sólo transmite luz polarizada horizontalmente

Reflexión a través de polarizador que sólo transmite luz polarizada verticalmente