

# Polarización 2da parte

Luz natural

Polaroids

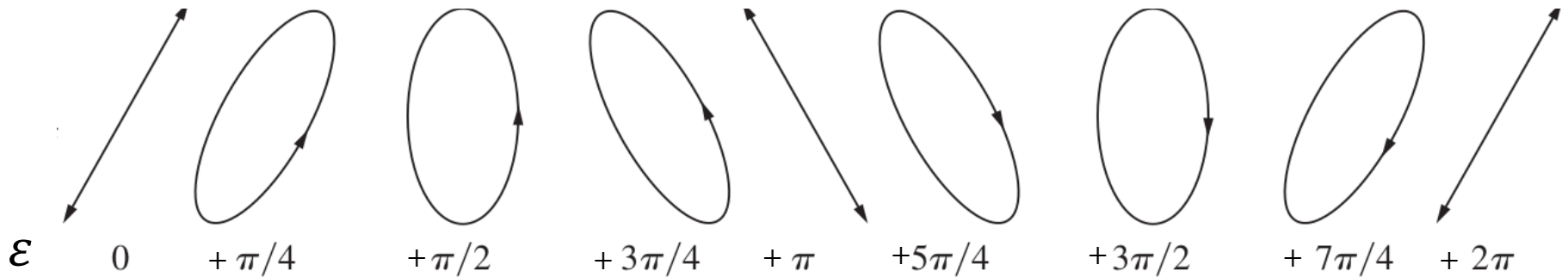
Dicroísmo

Birrefringencia

# En el capítulo anterior...

Aprendimos a describir matemáticamente un **estado de polarización** arbitrario

$$\vec{\psi}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - w t + \varphi_x\right)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - w t + \varphi_x + \varepsilon\right)}_{E_y} \hat{y}$$

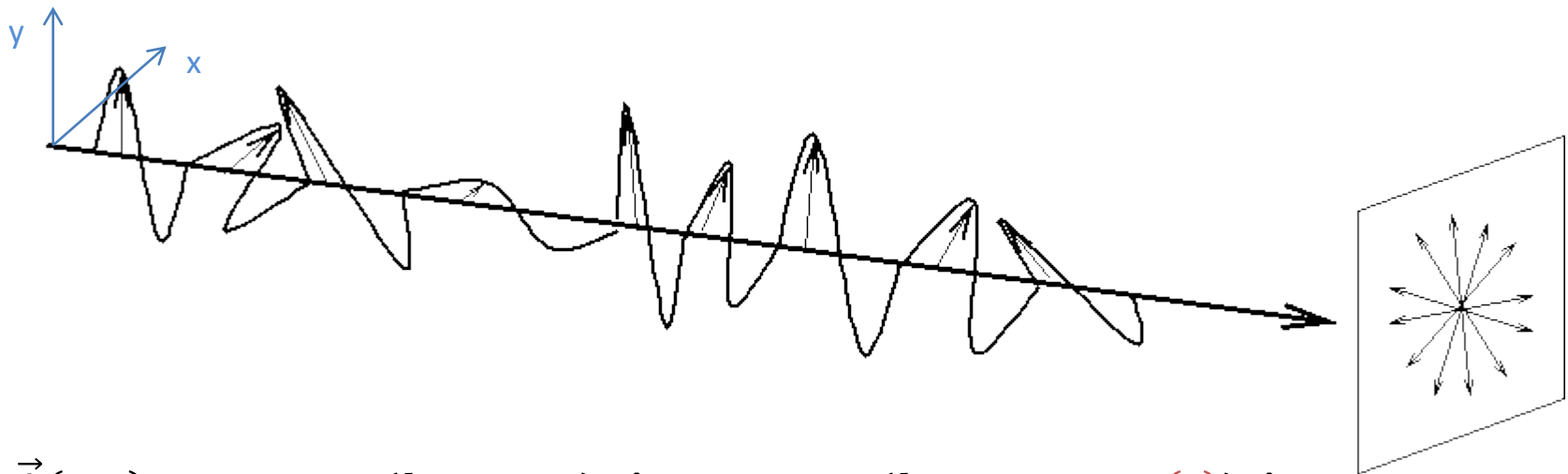


Curva paramétrica de una elipse que satisfacen  $E_x$  y  $E_y$

$$\rightarrow \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\varepsilon = \sin^2\varepsilon$$

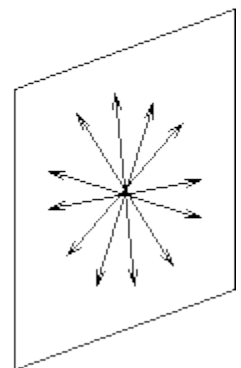
# Luz natural

- La verdad es que una propagación armónica, no describe adecuadamente la radiación **emitida** por fuentes naturales de luz
- Una fuente de luz natural esta compuesta por un enorme número de átomos emisores con orientaciones al azar.
- Cada emisor radía un tren de ondas polarizado por  $10^{-8}$  seg
- Nuevos trenes de ondas le siguen, cada uno de ellos con una polarización diferente
- Luz natural  $\leftrightarrow$  luz no-polarizada  $\leftrightarrow$  luz aleatoriamente polarizada



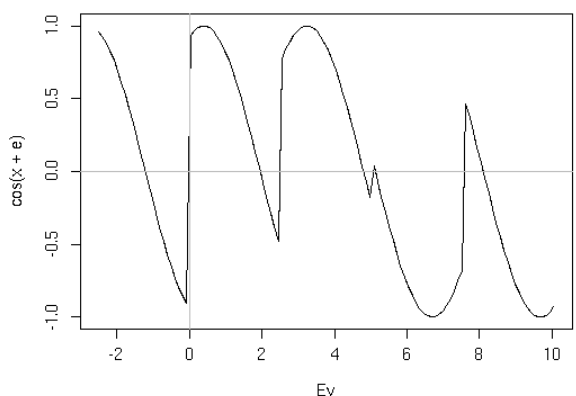
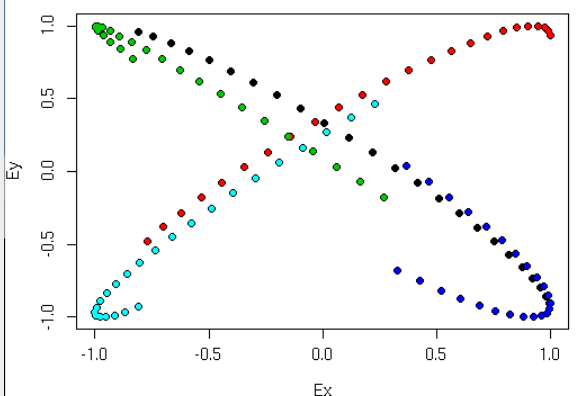
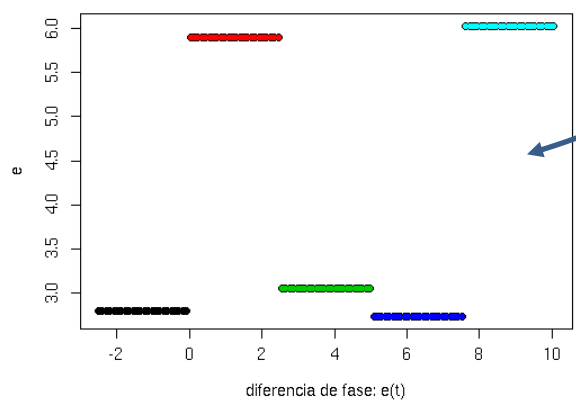
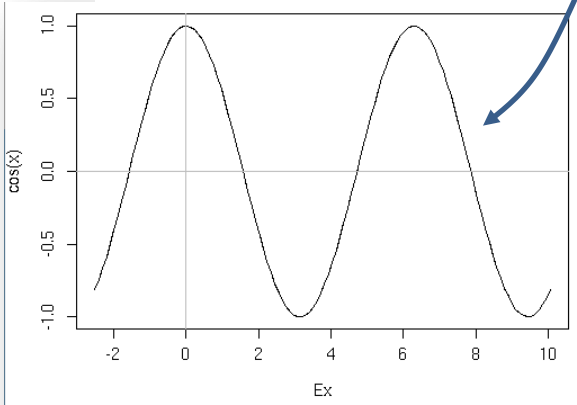
$$\vec{\psi}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - w t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - w t + \epsilon(t))}_{E_y} \hat{y}$$

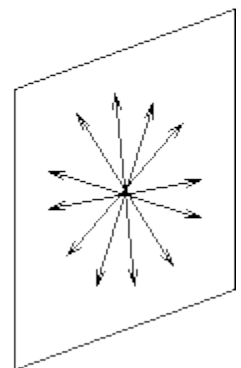
Función que varía aleatoriamente en el tiempo



$$\vec{\psi}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - \omega t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - \omega t + \epsilon(t))}_{E_y} \hat{y}$$

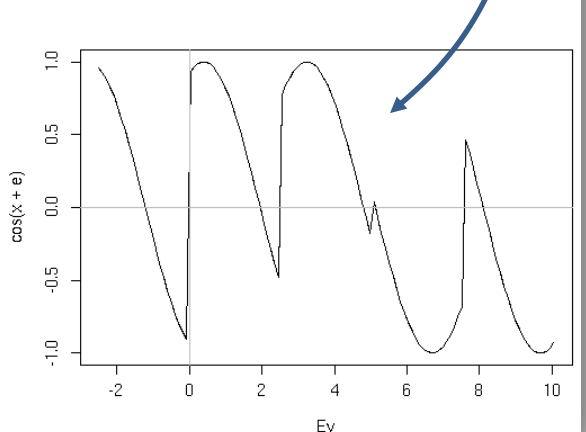
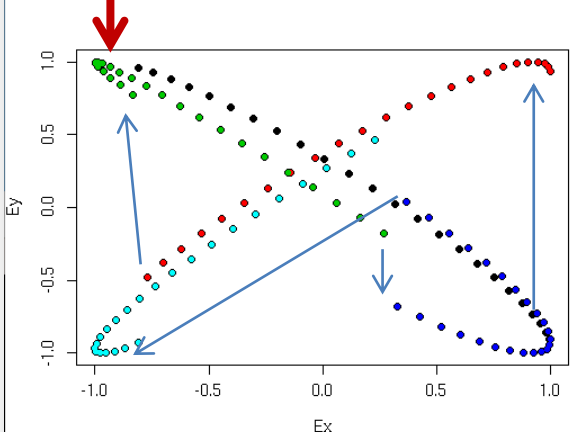
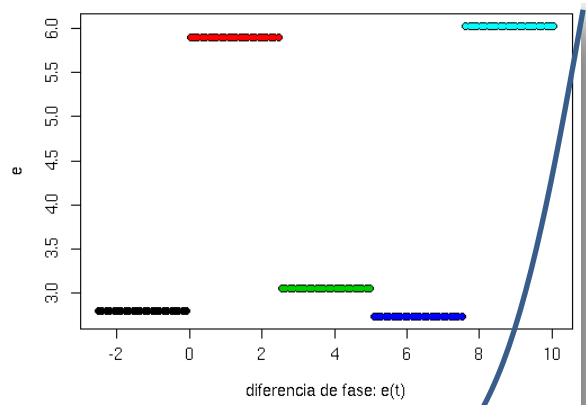
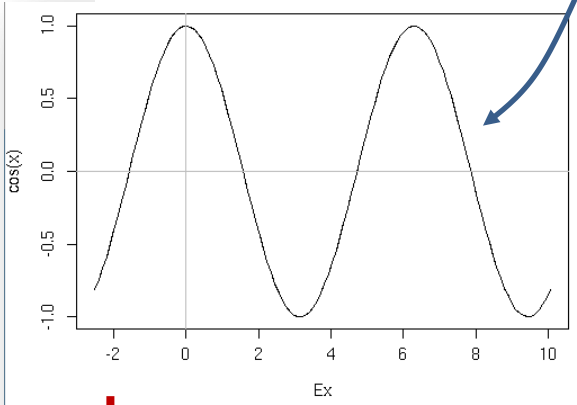
Función que varía aleatoriamente en el tiempo



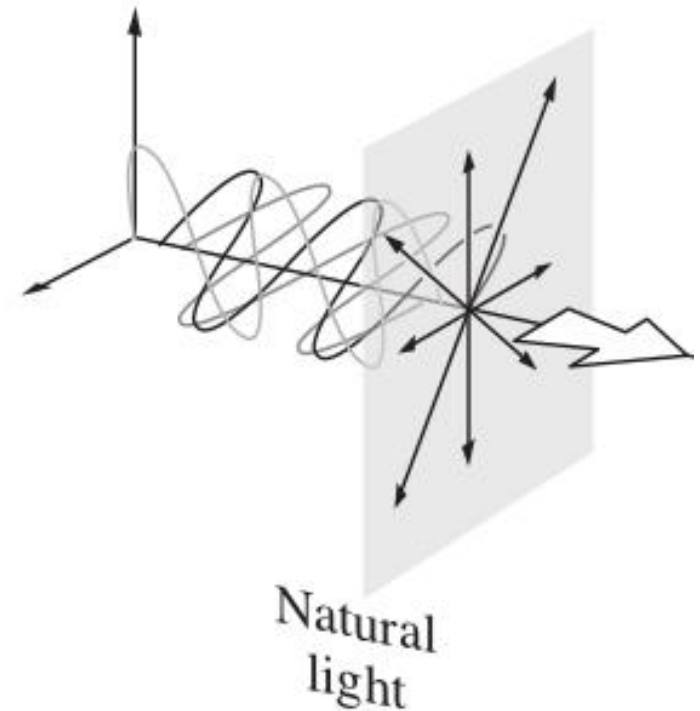


$$\vec{\psi}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - \omega t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - \omega t + \epsilon(t))}_{E_y} \hat{y}$$

Función que varía aleatoriamente en el tiempo



# Luz natural



- Puede suceder que la luz natural en un entorno posea también una contribución de una componente polarizada. Se modela como : LN + EP

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} [\cos(kz - \omega t) \hat{x} + \cos(kz - \omega t + \varepsilon(t)) \hat{y}] + E'_{0x} \cos(kz - \omega t) \hat{x} + E'_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon') \hat{y}$$

# Pe...pero...Y entonces...?

*Research*

## Patterns and properties of polarized light in air and water

Thomas W. Cronin<sup>1,\*</sup> and Justin Marshall<sup>2</sup>

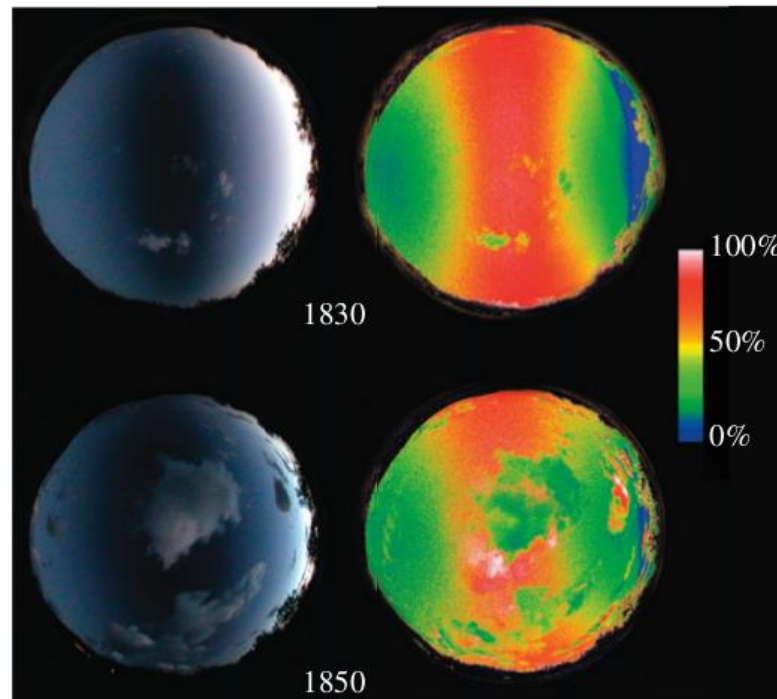
<sup>1</sup>Department of Biological Sciences, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, MD 21250, USA

<sup>2</sup>Queensland Brain Institute, University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia

Natural sources of light are at best weakly polarized, but polarization of light is common in natural scenes in the atmosphere, on the surface of the Earth, and underwater. We review the current state

of knowledge concerning how polarization and polarization patterns are formed by linearly polarized light. Scattering of sunlight or moonlight in the sky often forms a stable and predictable pattern used by many animals for orientation and navigation. At day, at twilight, and on moonlit nights. By contrast, polarization of light in most directions of view, is generally much weaker. In air, the surfaces of reflection are partially polarized light, but such reflections are rarer underwater, and

Natural sources of light are at best weakly polarized but polarization of light is common in natural scenes in the atmosphere, on the surface of the Earth, and underwater.



Grado de polarizacion

# Y entonces....?

## Localización



PHILOSOPHICAL  
TRANSACTIONS  
OF  
THE ROYAL  
SOCIETY

*Phil. Trans. R. Soc. B* (2011) **366**, 763–771  
doi:10.1098/rstb.2010.0196

Research

### **Behavioural and physiological mechanisms of polarized light sensitivity in birds**

Rachel Muheim\*

*Department of Biology, Lund University, Lund 223 62, Sweden*



nature  
COMMUNICATIONS

ARTICLE

Received 26 Mar 2014 | Accepted 24 Jun 2014 | Published 22 Jul 2014

DOI: 10.1038/ncomms5488 OPEN

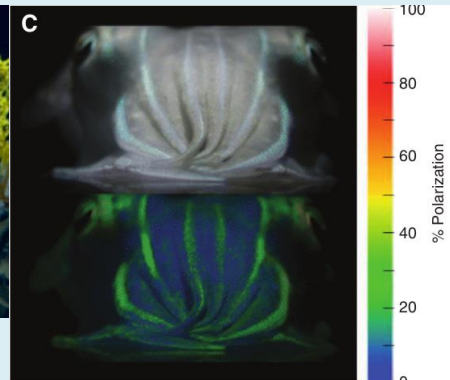
### A functional role of the sky's polarization pattern for orientation in the greater mouse-eared bat

Stefan Greif<sup>1,2</sup>, Ivailo Borissov<sup>3</sup>, Yossi Yovel<sup>3</sup> & Richard A. Holland<sup>1</sup>

## Comunicación (?)



Sepia



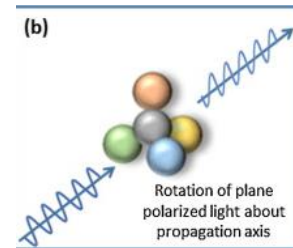
*pygmy octopus*: Patrón  
de luz polarizada por  
reflexión



# Y entonces...?

## Aplicaciones tecnológicas:

- Navegación vikinga (?)
- LCD (Liquid Crystal Displays)
- Lentes Anti-brillo
- Cine 3D
- Comunicaciones
  - 2 polarizaciones pueden compartir la misma banda de frecuencia
  - Etc...
- Identificación de minerales
- Quiralidad de compuestos orgánicos
- Espectroscopia infra-roja
- Detección de stress en materiales.



Microtubules in A Dividing Plant Cell

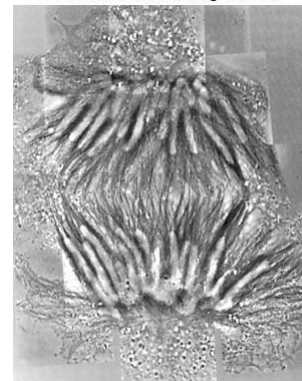
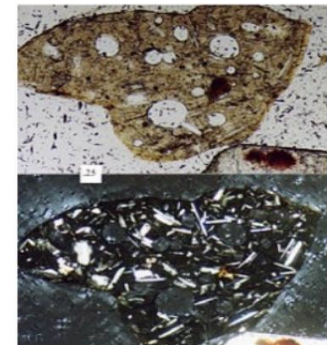


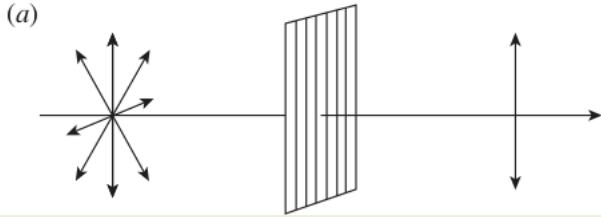
Figure 1



# Polarizando (i.e. favoreciendo direcciones)

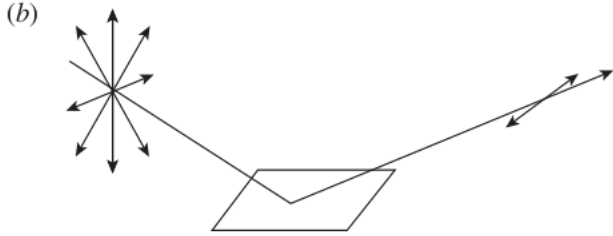
Absorviendo componentes

Dicroísmo

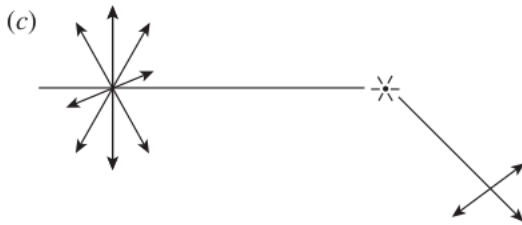


Direcciones de emision *prohibidas*

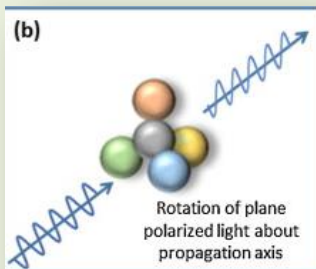
Reflexion



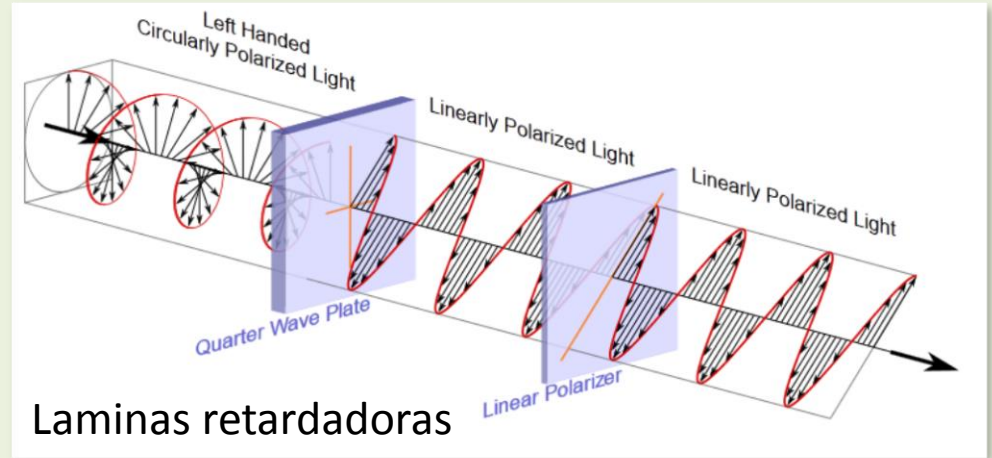
Scattering



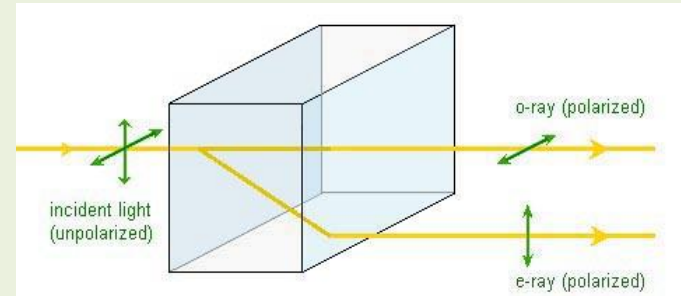
Actividad  
optica



Introduciendo desfases (Bi-refringencia)



Laminas retardadoras



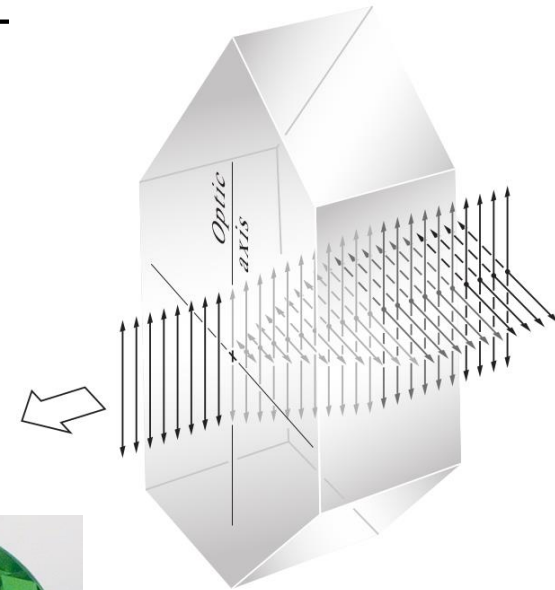
# Dicroísmo 1

Estado de polarización lineal resulta por **absorción selectiva** de la perturbación que oscila en **una dirección dada**

$$\vec{\psi}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - w t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - w t + \varepsilon(t))}_{E_y} \hat{y}$$

Critales dicróicos

- Estructura cristalina anisotrópica
- Existencia de un **eje optico(EO)**
- Componente perpendicular al EO es fuertemente absorbida (las cargas aceleradas no radian sino que redistribuyen la energía absorbida en la red cristalina...disipan calor)



Dichroic Tourmaline Crystal Light Transmission

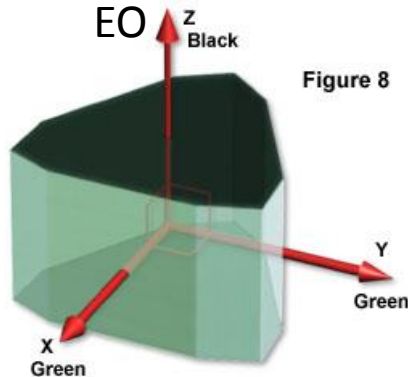


Figure 8

Dichroic Absorption in Tourmaline

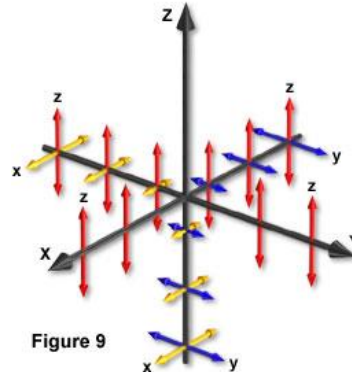


Figure 9

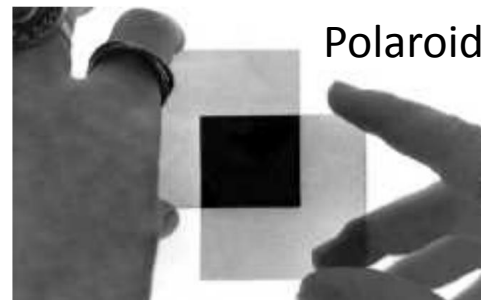
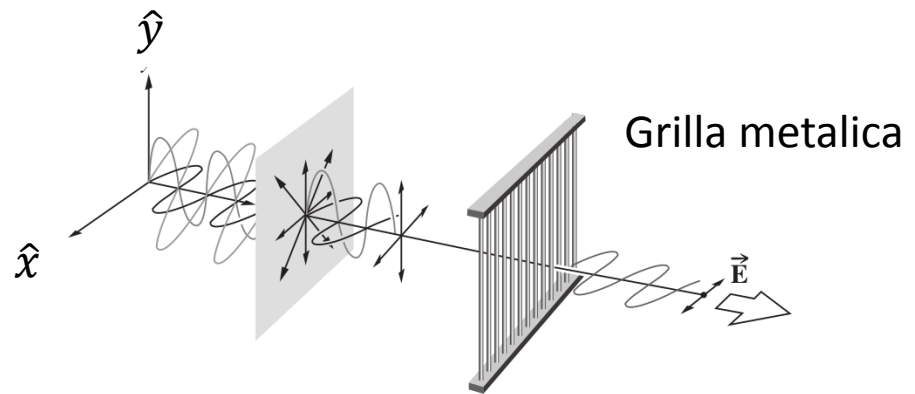


# Dicroísmo 2

Estado de polarización lineal resulta por **absorción selectiva** de la perturbación que oscila en **una dirección dada**

$$\vec{\psi}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - w t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - w t + \varepsilon(t))}_{E_y} \hat{y}$$

- La componente  $\hat{y}$  acelera electrones (creando corrientes en los alambres) que chocan con átomos de la red y ceden su energía (se calienta el alambre)
- La componente  $\hat{x}$  no es absorbida y se transmite
- $\hat{x}$  es el eje de transmisión (ET) del polarizador



Polaroid

Plástico calentado y estirado (polímeros alineados) recubierto por solución de *iodine*

# Hablemos de energía transportada

$$\vec{E}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - \omega t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon)}_{E_y} \hat{y}$$

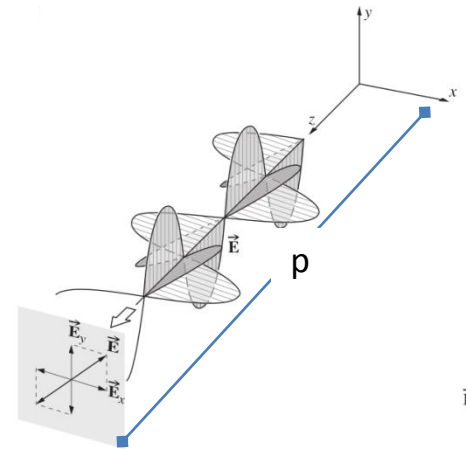
**Energía** transmitida por una onda, por unidad de área

Cte dipolar electrica

$$\varepsilon_0 c E(z, t)^2$$

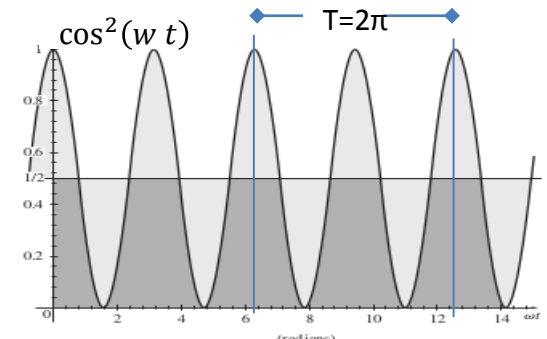
**Irradiancia:** Energía transmitida por unidad de área por unidad de tiempo

$$I = \varepsilon_0 c \langle E(z, t)^2 \rangle_t$$



$$I = \varepsilon_0 c \langle E_x(z = p, t)^2 + E_y(z = p, t)^2 \rangle_t$$

$$= \varepsilon_0 c E_{0x}^2 \langle \cos^2(kp - \omega t) \rangle_t + \varepsilon_0 c E_{0y}^2 \langle \cos^2(kp - \omega t) \rangle_t$$



$$\left\langle \cos^2 \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right\rangle_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \cos^2 \left( \frac{2\pi}{T} t \right) dt = \frac{1}{2}$$

# Hablemos de energía transportada

$$\vec{E}(z, t) = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - w t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - w t + \varepsilon)}_{E_y} \hat{y}$$

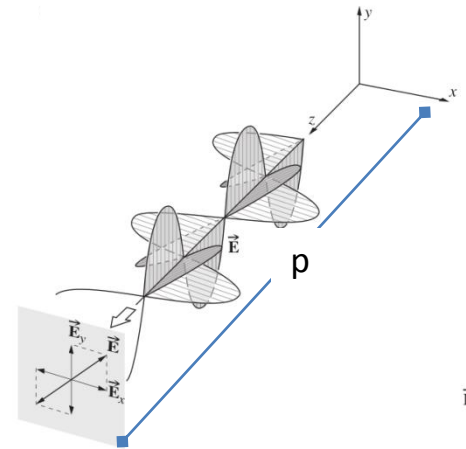
**Energía** transmitida por una onda, por unidad de área

Cte dipolar electrica

$$\varepsilon_0 c E(z, t)^2$$

**Irradiancia:** Energía transmitida por unidad de área por unidad de tiempo

$$I = \varepsilon_0 c \langle E(z, t)^2 \rangle_t$$



$$I = \varepsilon_0 c \langle E_x(z = p, t)^2 + E_y(z = p, t)^2 \rangle_t$$

$$= \varepsilon_0 c E_{0x}^2 \langle \cos^2(kp - w t) \rangle_t + \varepsilon_0 c E_{0y}^2 \langle \cos^2(kp - w t + \varepsilon) \rangle_t$$

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \cos^2(kp - w t) dt = \frac{1}{2}$$

$$I = \varepsilon_0 c \frac{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}{2}$$

$$\left\langle \cos^2 \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right\rangle_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \cos^2 \left( \frac{2\pi}{T} t \right) dt = \frac{1}{2}$$

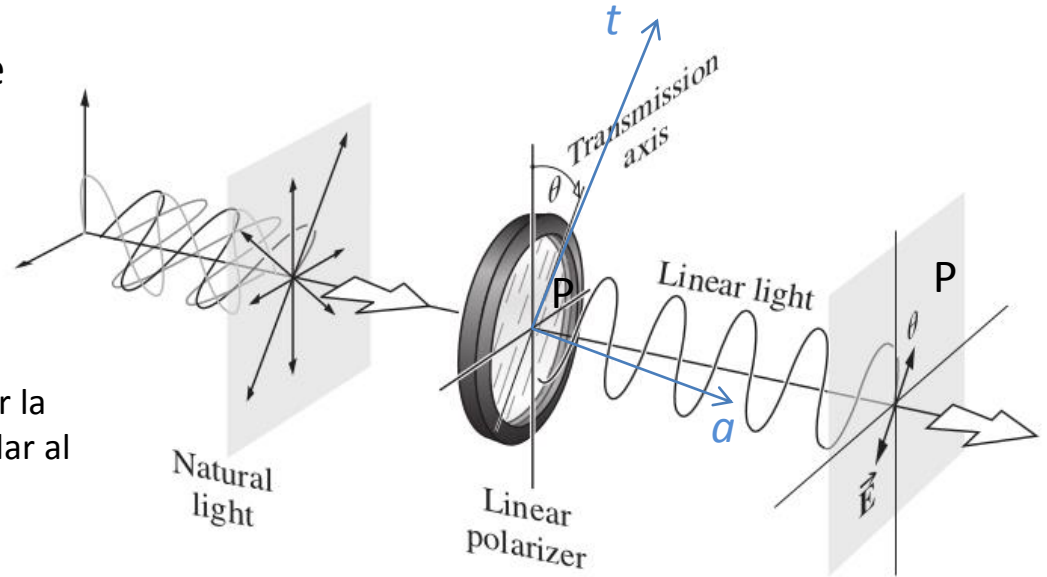


# Luz natural sobre polarizador

Cuanta intensidad es detectada sobre el plano P?

Describo polarización utilizando ejes de transmisión  $\hat{t}$  y absorción  $\hat{a}$  del polaroid

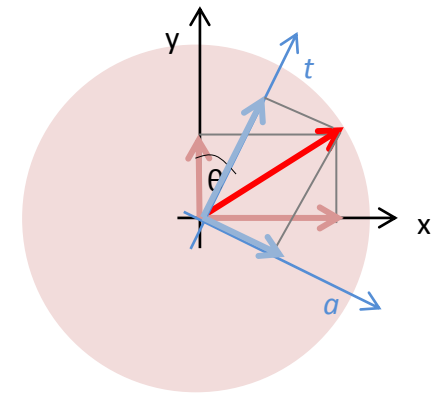
(desde este sistema de ref. es muy facil describir la extinción que ocurre en la dirección perpendicular al eje de transmisión)



$$\vec{E}(z, t)^{in} = \underbrace{E_{0x} \cos(kz - \omega t)}_{E_x} \hat{x} + \underbrace{E_{0y} \cos(kz - \omega t + \epsilon(t))}_{E_y} \hat{y}$$

$$\vec{E}(z, t)^{in} = \underbrace{E_{0t} \cos(kz - \omega t)}_{E_t} \hat{t} + \underbrace{E_{0a} \cos(kz - \omega t + \epsilon(t))}_{E_a} \hat{a}$$

$$\vec{E}(z, t)^{out} = \underbrace{E_{0t} \cos(kz - \omega t + \epsilon_t)}_{E_t} \hat{t}$$

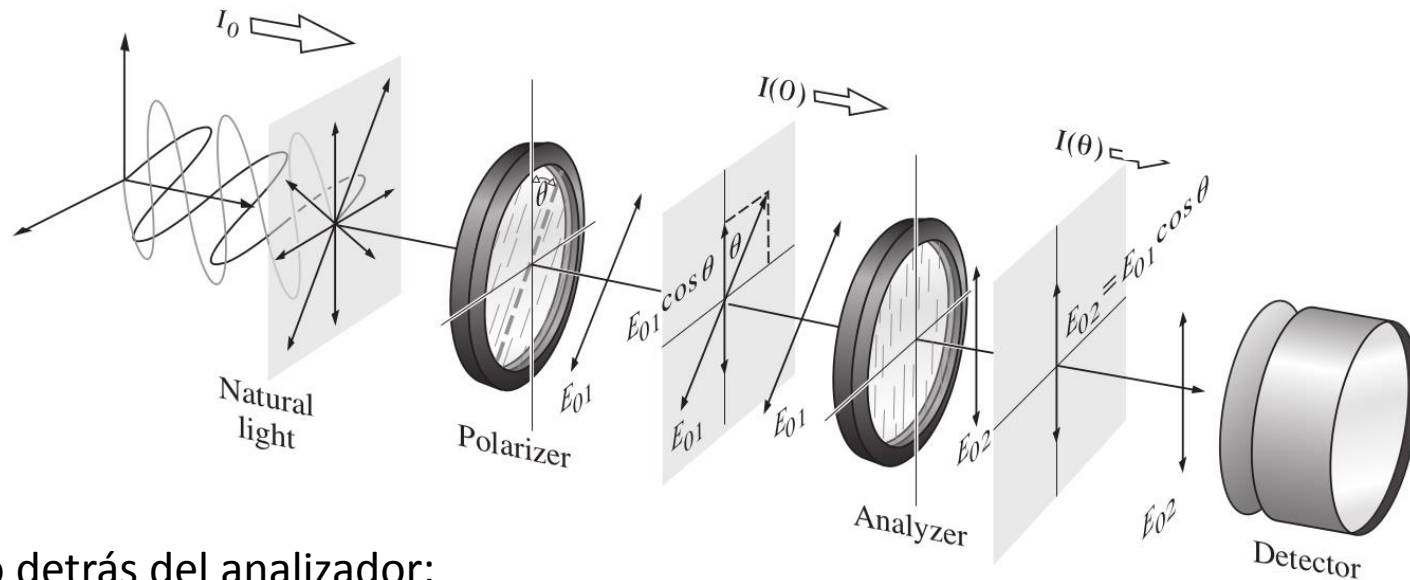


$$I = \epsilon_0 c \langle E(t)^2 \rangle_T = \epsilon_0 c \frac{E_{0t}^2}{2} \xrightarrow[\substack{E_{0x} = E_{0y} \\ E_{0t} = E_{0a}}]{\text{Si fuese natural}} \epsilon_0 c \frac{E_{0t}^2}{2}$$

$$I = \epsilon_0 c \langle E(t)^2 \rangle_t = \frac{I_{in}}{2}$$

# Cuanta energia llega al detector si sobre el incide luz LP...

...si el ET del segundo polarizador (a.k.a. *analizador*) forma un ángulo  $\theta$  con el primero?



Campo detrás del analizador:

$$\vec{E}(z, t) = E_{02} \cos(kz - \omega t) \hat{y} = E_{01} \cos \theta \cos(kz - \omega t) \hat{y}$$

Al detector llega una irradiancia

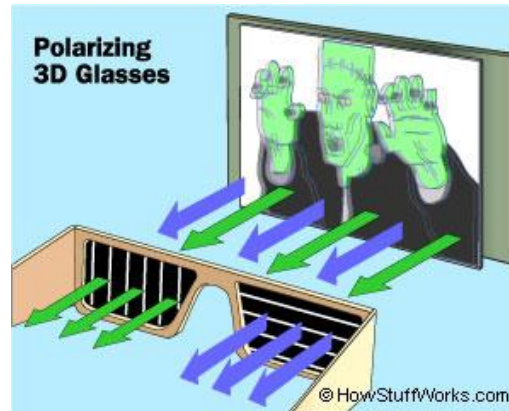
$$I = \varepsilon_0 c \langle E(t)^2 \rangle_t = \frac{\varepsilon_0 c E_{01}^2 \cos^2 \theta}{2}$$

Ley de Malus

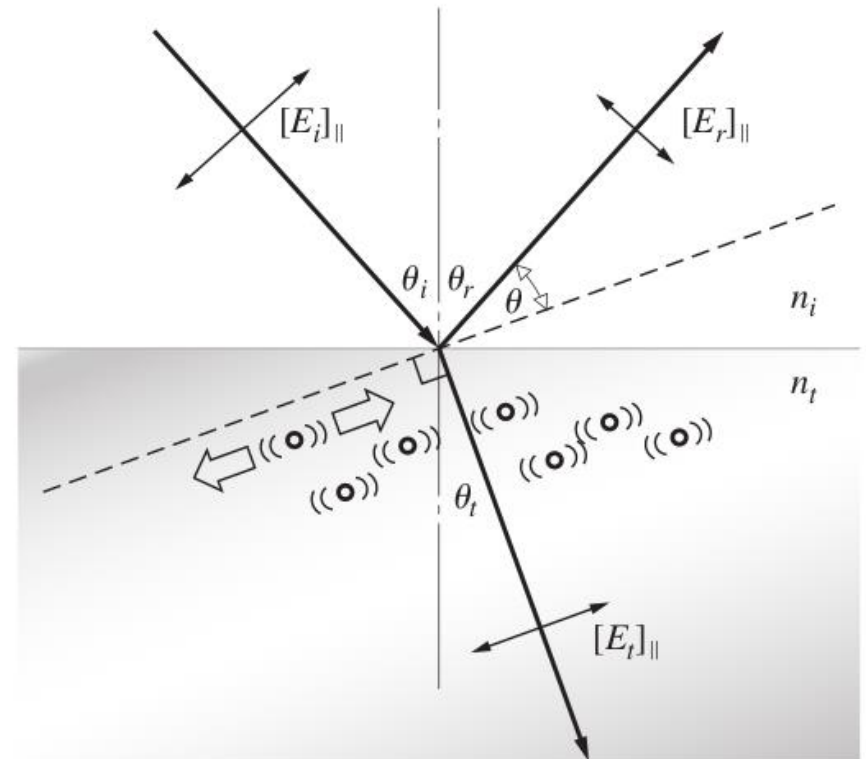
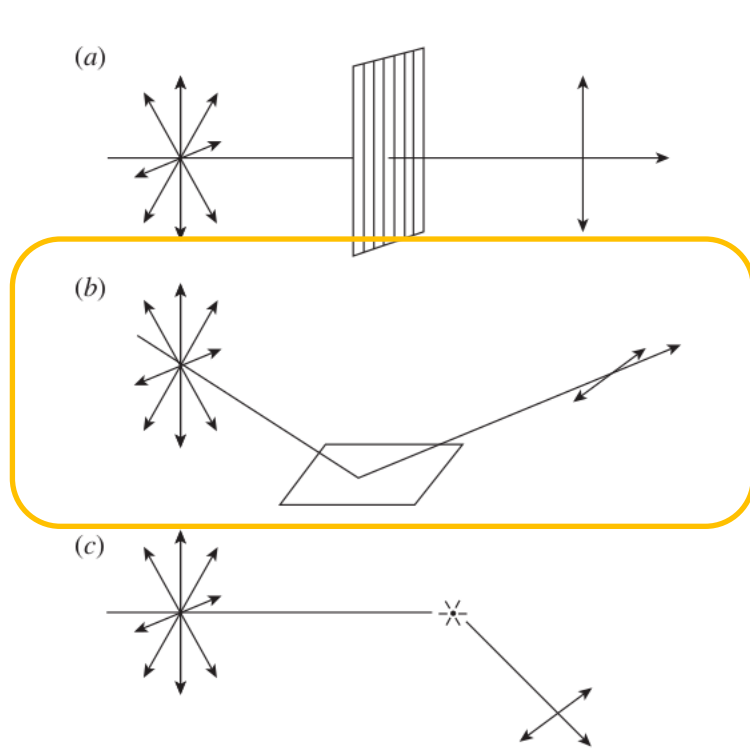
$$I(\theta) = I(0) \cos^2 \theta$$



# Cine 3D



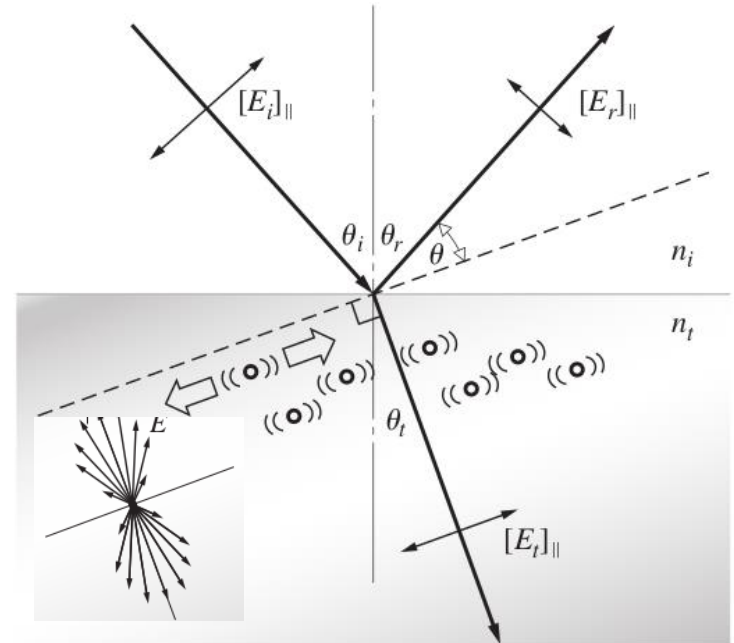
# Polarización por reflexión



Onda incide sobre dielectrico (material no conductor)

# Polarización por reflexión: ángulo de Brewster

- Onda polarizada linealmente en dirección paralela al plano de incidencia incide sobre un dieléctrico
- $E_r$  y  $E_t$  (ley de Snell y reflexión) generados por radiación emitida por las cargas aceleradas dentro del material por la onda incidente.
- Como sabemos, ésta emisión no es isotrópica. Es máxima hacia la dirección de transmisión (Snell) y nula sobre la dirección de movimiento
- Esto hace, por ejemplo que la intensidad de las ondas reflejada y transmitida dependan del ángulo de incidencia...



# Polarización por reflexión: ángulo de Brewster

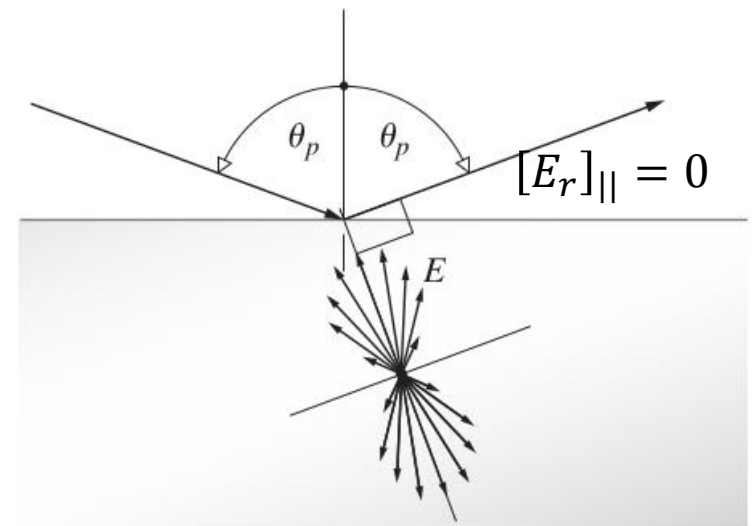
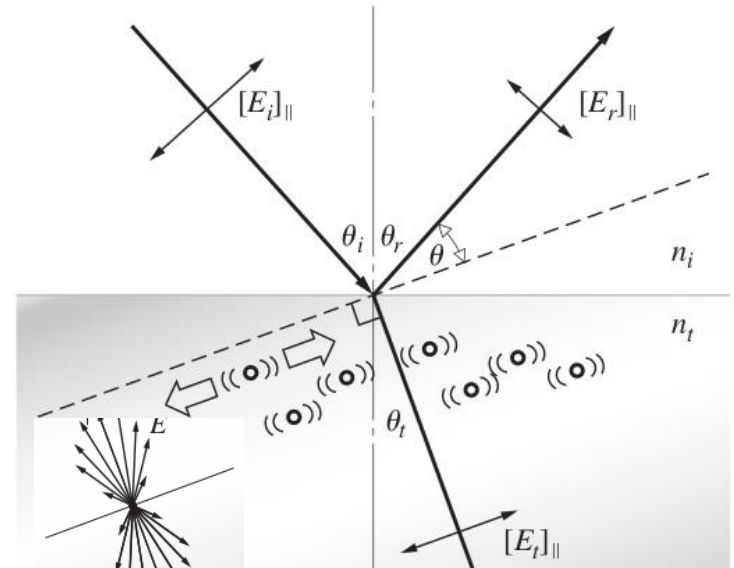
- Onda polarizada linealmente en dirección paralela al plano de incidencia incide sobre un dieléctrico
- $E_r$  y  $E_t$  (ley de Snell y reflexión) generados por radiación emitida por las cargas aceleradas dentro del material por la onda incidente.
- Como sabemos, ésta emisión no es isotrópica. Es máxima hacia la dirección de transmisión (Snell) y nula sobre la dirección de movimiento
- Que pasaría entonces si para algún ángulo  $\theta_i \equiv \theta_p$ :  
 $\theta_p + \theta_t = \pi/2$

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

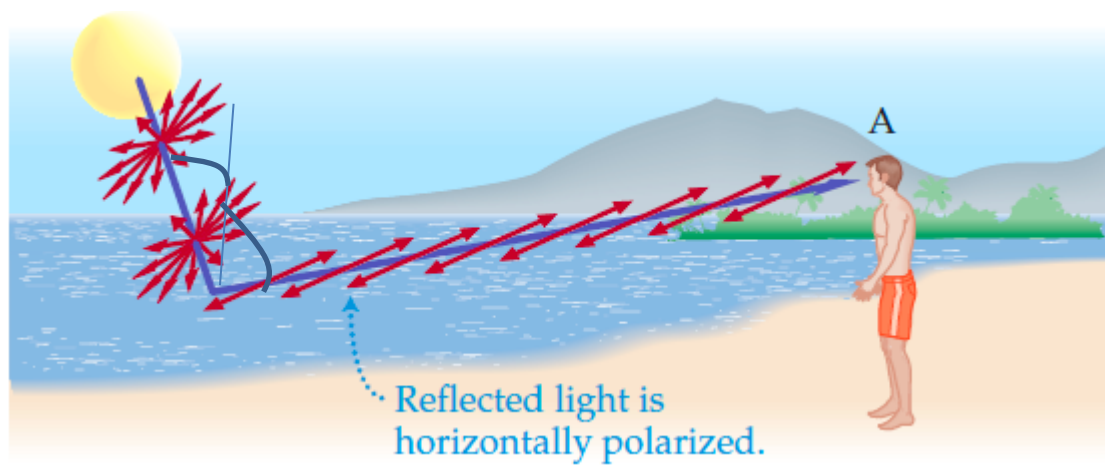
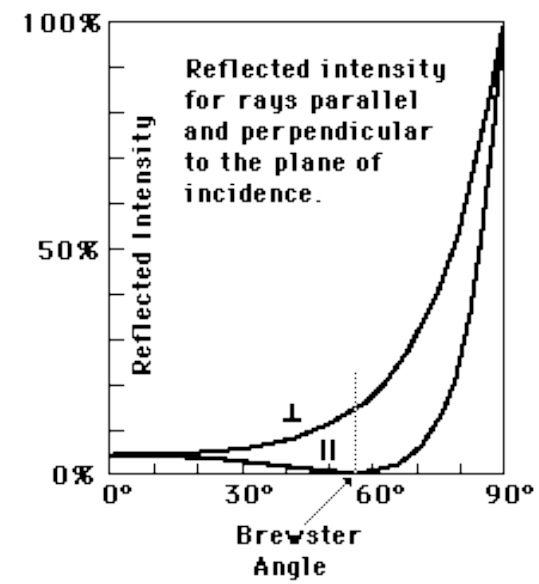
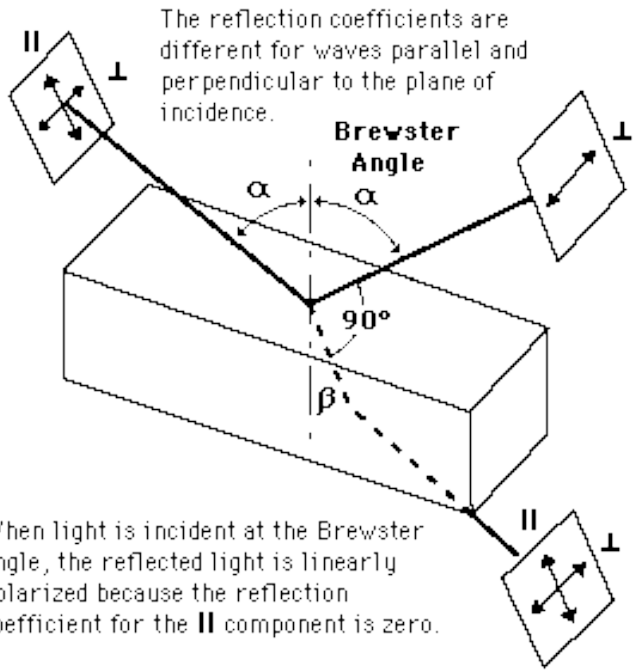
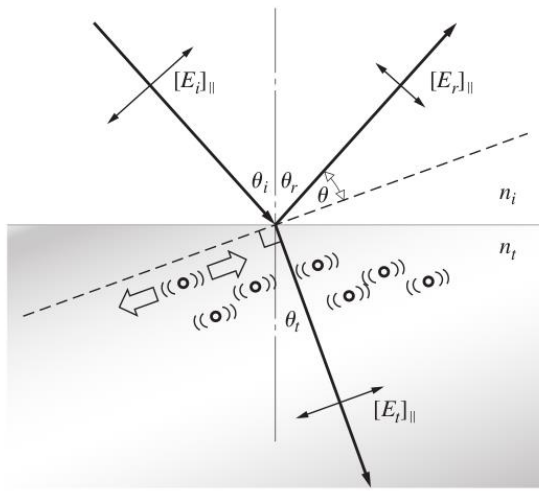
$$n_i \sin \theta_p = n_t \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_p \right) = n_t \cos(\theta_p)$$

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

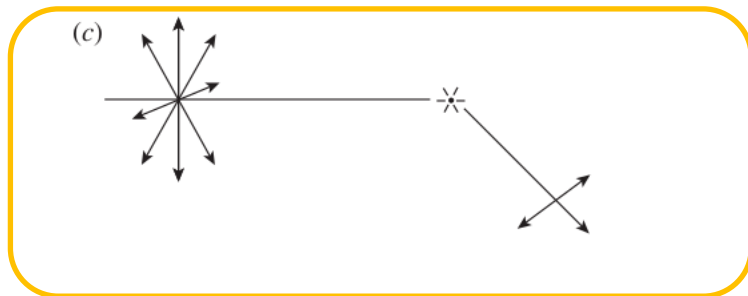
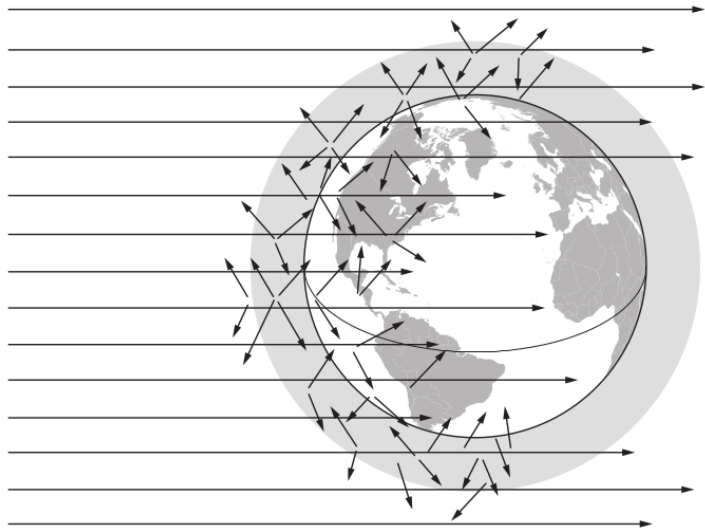
→ Define el ángulo para el cual  $[E_r]_{\parallel} = 0$



# Polarización por reflexión: ángulo de Brewster

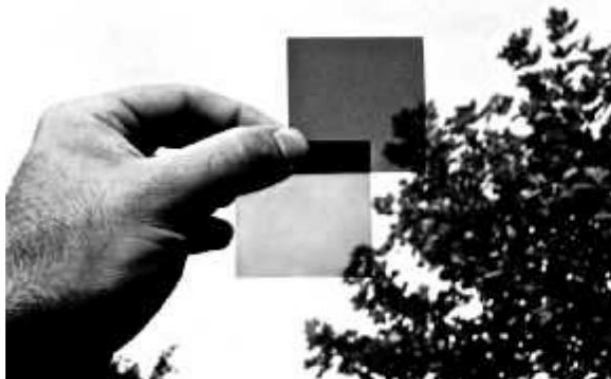
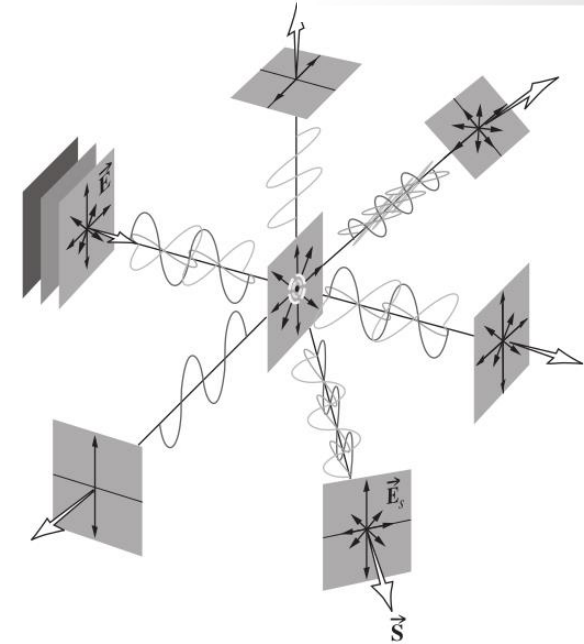
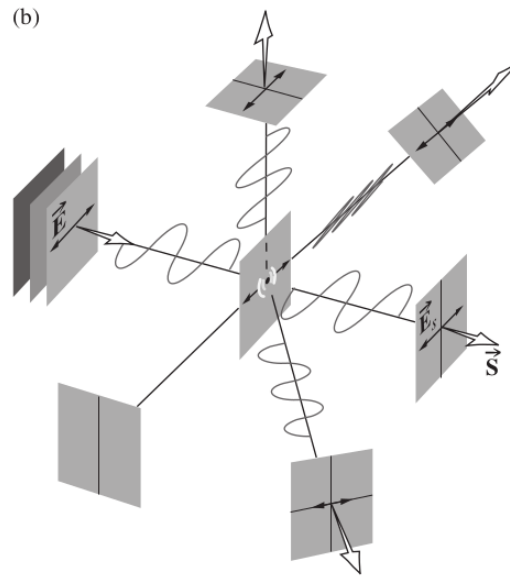
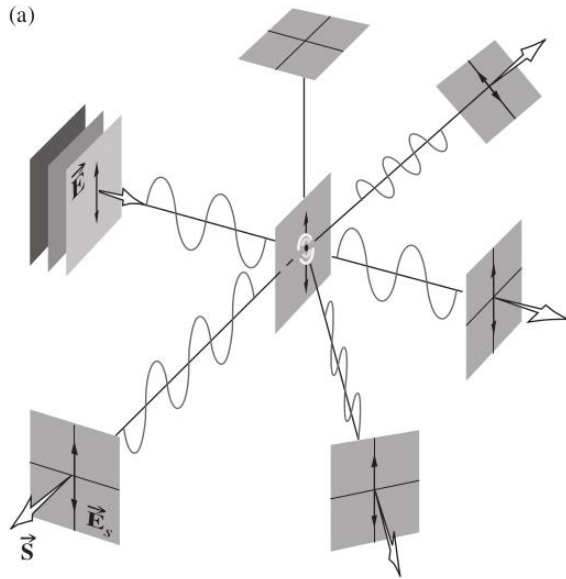
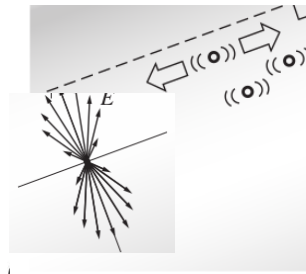


# Polarización por scattering



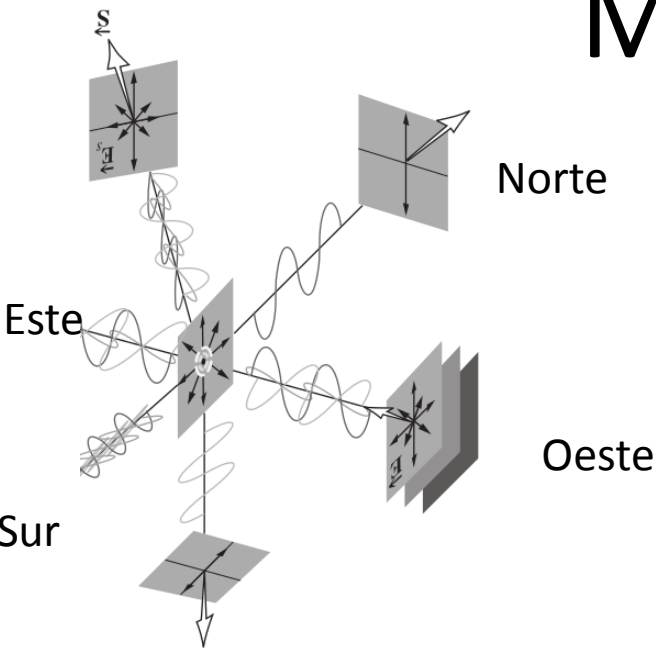


# Polarización por scattering

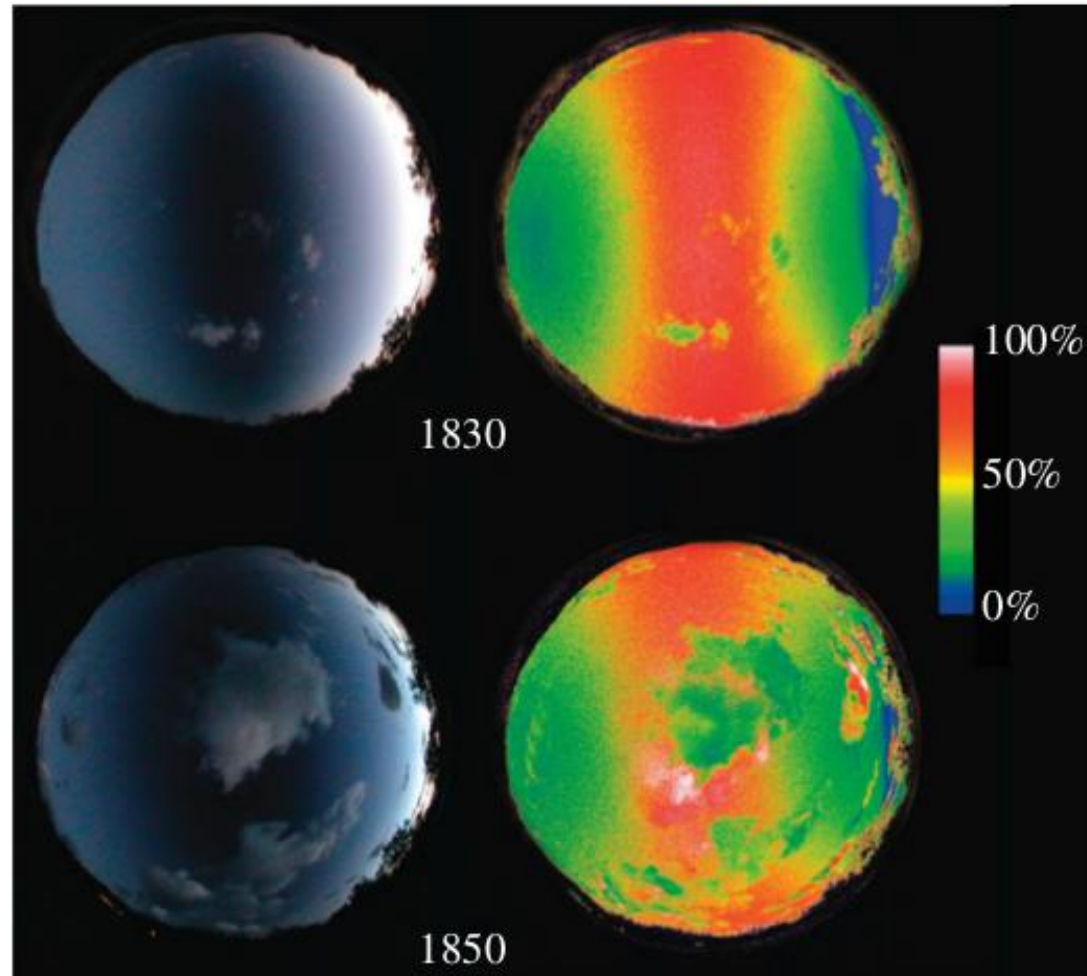


- Cuando observo una región a  $90^\circ$  de los rayos solares no espero encontrar la componente (a) .
- En la practica la polarización no es perfecta...sino que esta parcialmente polarizada porque hay scattering multiple y otros efectos

# Mapa del cielo polarizado



Eje transmision del polarizador (direccion Este-Oeste)



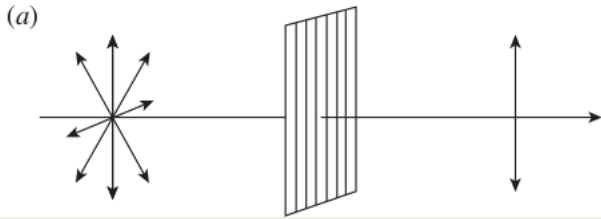




# Polarizando (i.e. favoreciendo direcciones)

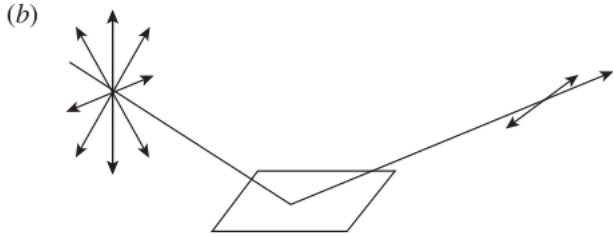
Absorviendo componentes

Dicroísmo

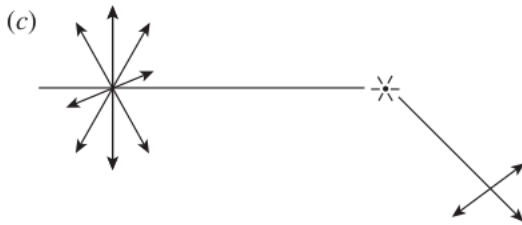


Direcciones de emision *prohibidas*

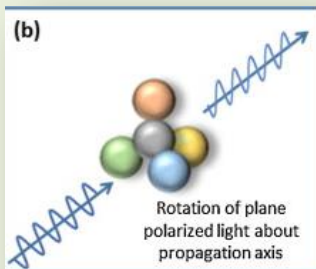
Reflexion



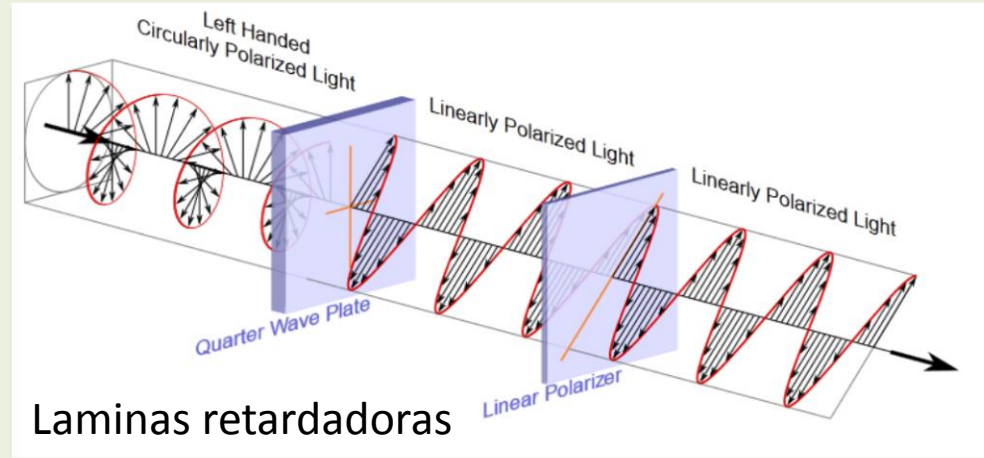
Scattering



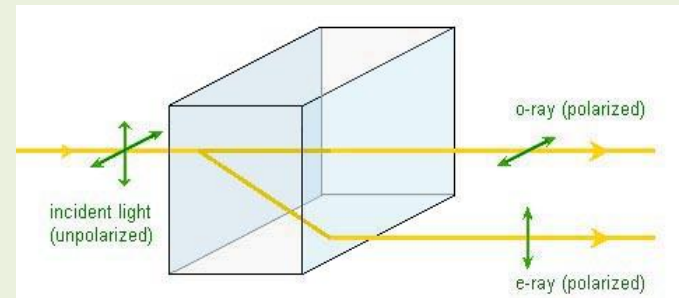
Actividad  
optica



Introduciendo desfases (Bi-refringencia)



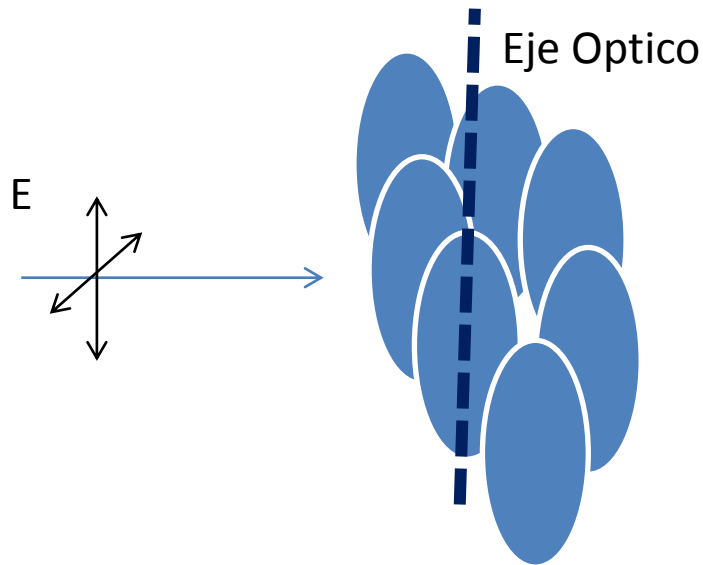
Laminas retardadoras



# Birrefringencia

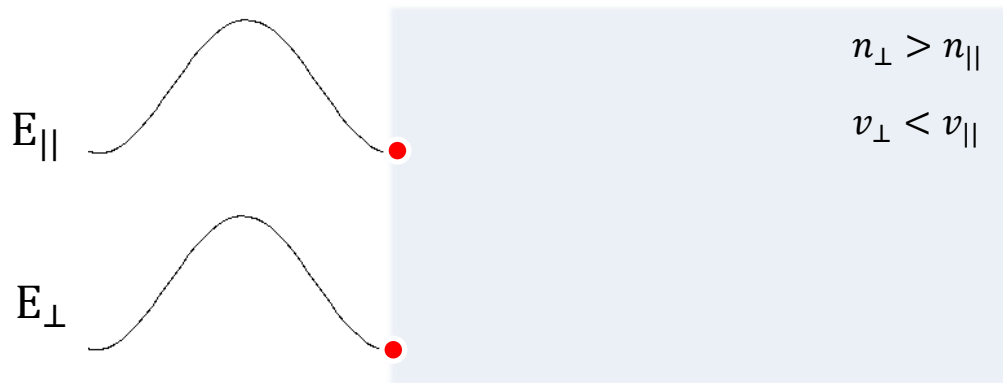
Otra vez la anisotropía...

- Hay sustancias (e.g. compuesto por moléculas alineadas más largas que anchas) para las cuales el índice de refracción es diferente en una dirección y otra.



- Las cargas responden más fácilmente al forzado en  $\hat{y}$  que en  $\hat{x}$
- Esperamos una **respuesta diferente** en función de la **dirección** de polarización de la onda incidente
- Vamos a tener un  $n_{||}$  y un  $n_{\perp}$
- O lo que es lo mismo...diferentes velocidades de propagación dentro del medio:

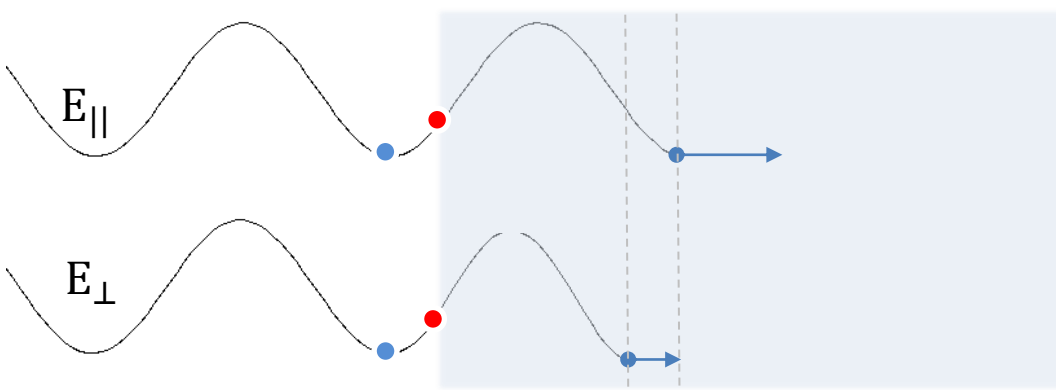
$$v_{||} = c/n_{||} \quad v_{\perp} = c/n_{\perp}$$



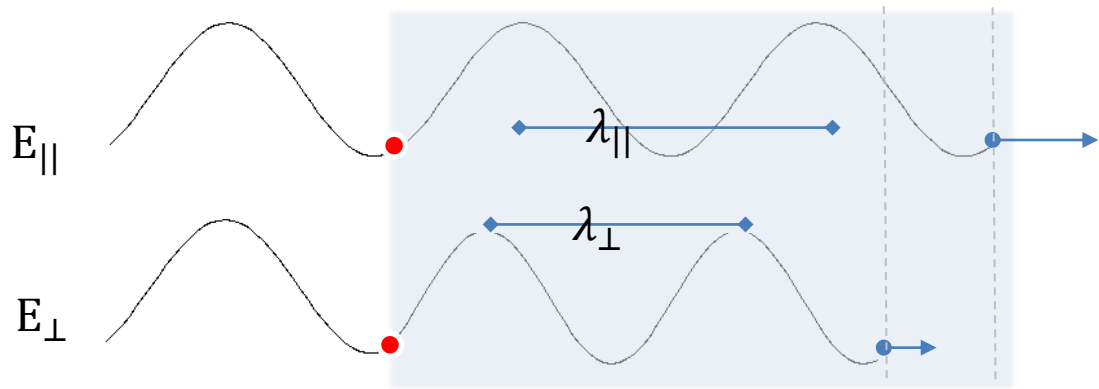
$$v_{\parallel} = c/n_{\parallel} \quad v_{\perp} = c/n_{\perp}$$

...recordemos que  $v = \lambda \nu$  ↙ freq

La frecuencia  $\nu$  es la misma fuera y dentro del material (pensemos en el punto  $\bullet$ , esta en la interfase y presenta una frecuencia de oscilacion bien definida)



$$\begin{aligned} \longrightarrow & v_{\parallel} = \lambda_{\parallel} \nu \\ & v_{\perp} = \lambda_{\perp} \nu \end{aligned}$$

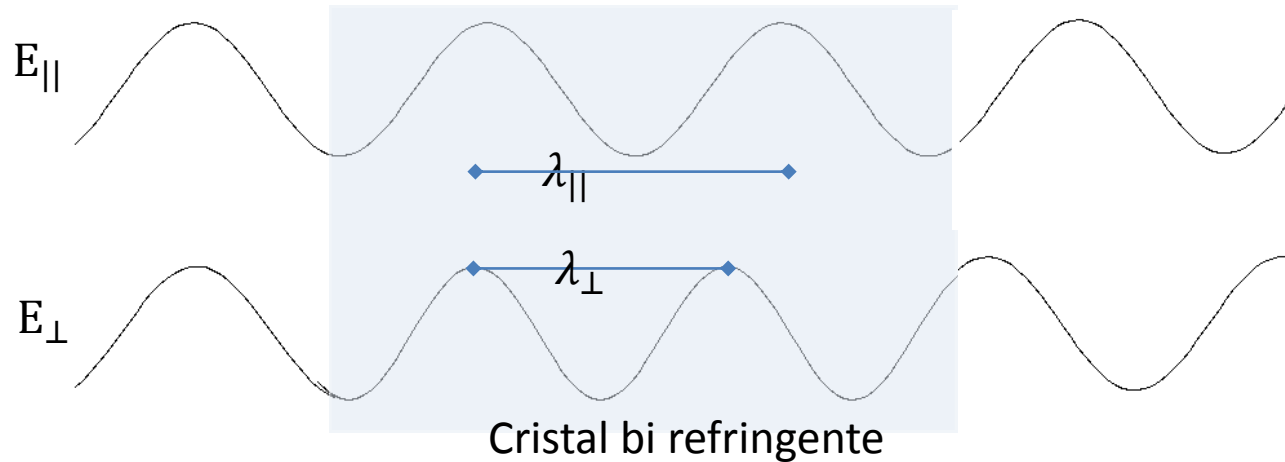


$$\begin{aligned} \longrightarrow & \lambda_{\parallel} = \frac{c}{n_{\parallel} \nu} \\ & \lambda_{\perp} = \frac{c}{n_{\perp} \nu} \end{aligned}$$

- Dentro del material las oscilaciones en las dos direcciones tendran longitudes de onda diferentes

# Laminas retardadoras

En definitiva



Nota matematica:

$$\cos(kz - \omega t + \varepsilon)$$

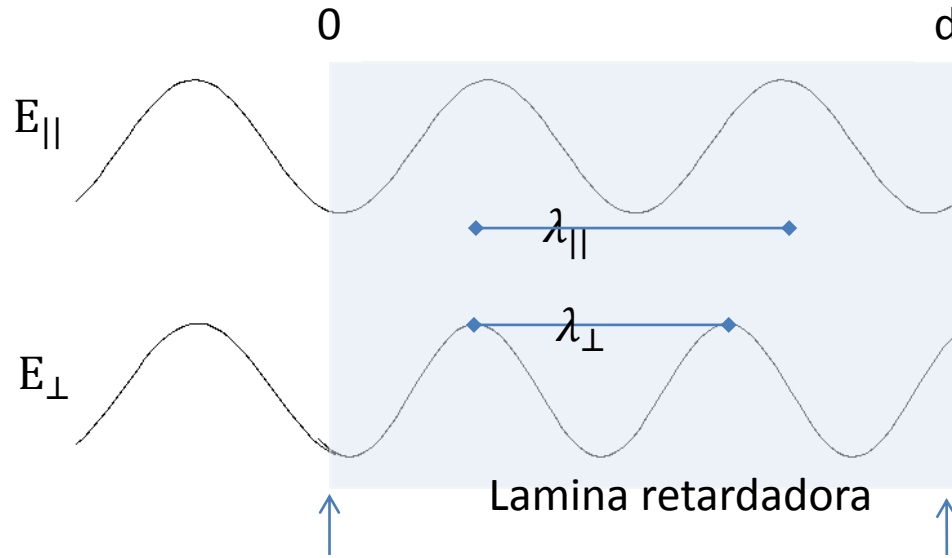


$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

tiene el efecto de alargar o acortar la escala de  $z$

- Dentro del material las oscilaciones en las dos direcciones tendran longitudes de onda diferentes
- A la salida del cristal aparece un desfase entre componentes!

# Calculamos el desfase que agrega la lamina



$$\lambda_{||} = \frac{c}{n_{||}v}$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{c}{n_{\perp}v}$$

$$E_{||}(z=0) = E_{0||} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{||}} 0 - \omega t + \varepsilon_{||}\right)$$

$$E_{||}(z=d) = E_{0||} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{||}} d - \omega t + \varepsilon_{||}\right)$$

$$E_{\perp}(z=0) = E_{0\perp} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\perp}} 0 - \omega t + \varepsilon_{\perp}\right)$$

$$E_{\perp}(z=d) = E_{0\perp} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\perp}} d - \omega t + \varepsilon_{\perp}\right)$$

$\varphi_{||}(d, t)$

$\varphi_{\perp}(d, t)$

$$\varphi_{||} - \varphi_{\perp} = \left(\frac{1}{\lambda_{||}} - \frac{1}{\lambda_{\perp}}\right) 2\pi d + (\varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp}) = (n_{||} - n_{\perp}) 2\pi d \frac{v}{c} + (\varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp})$$

$$\varphi_{||} - \varphi_{\perp} = (n_{||} - n_{\perp}) \frac{2\pi d}{\lambda_0} + (\varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp})$$

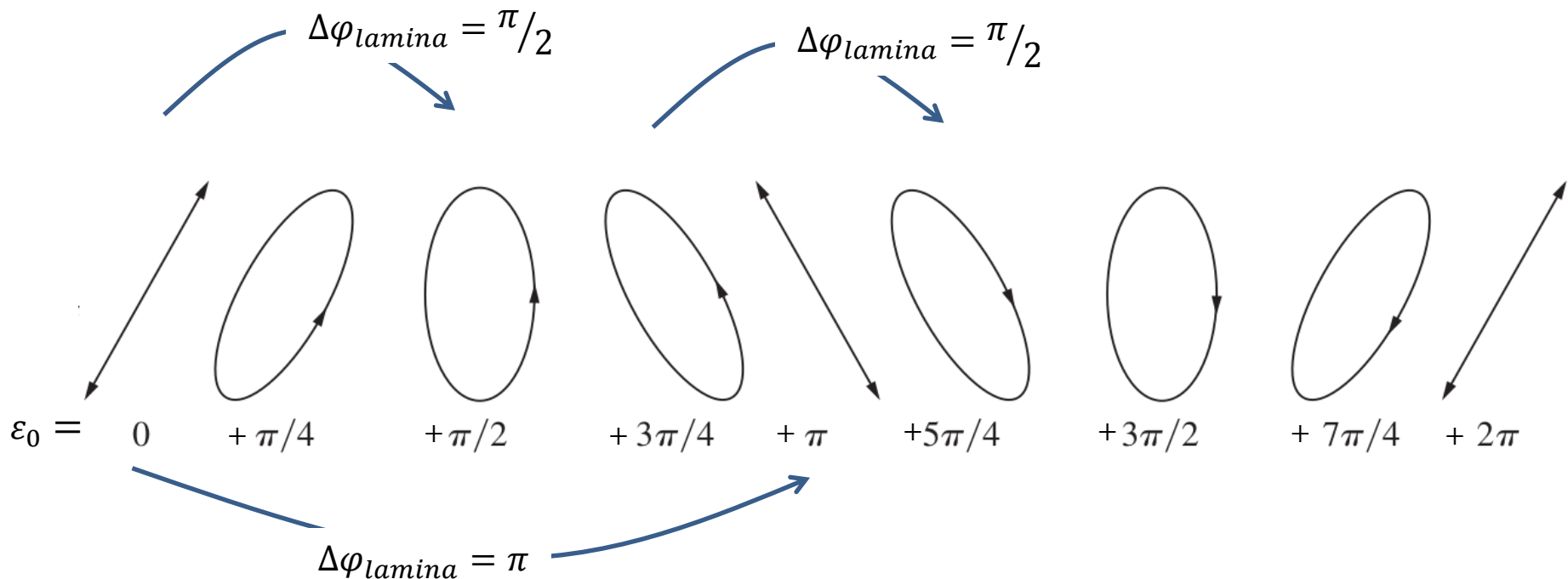
$$\Delta\varphi_{lamina} = (n_{||} - n_{\perp}) \frac{2\pi d}{\lambda_0}$$

# Cosas que podemos hacer con laminas

$$\vec{\psi}(z, t) = \mathbf{E}_{0x} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \omega t + \varphi_x\right) \hat{x} + \mathbf{E}_{0y} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \omega t + \varphi_x + \varepsilon_0\right) \hat{y}$$

$$\Delta\varphi_{lamina} = (n_{||} - n_{\perp}) \frac{2\pi d}{\lambda_0}$$

A la salida:  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varphi_{lamina}$



# Lamina de media onda

Diseñada para introducir una dif de fase de  $\pi$  radianes entre ambas componentes

$$\Delta\varphi_{\lambda/2} \equiv (n_{\parallel} - n_{\perp}) \frac{2\pi d}{\lambda_0} = \pi$$

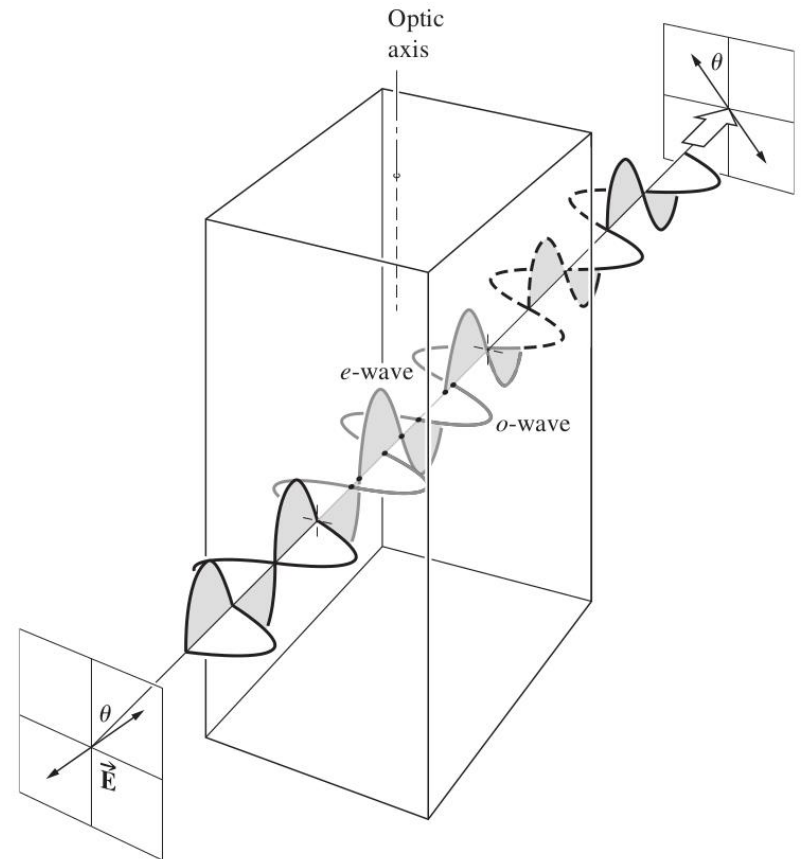
- Ej: una polarización lineal gira un ángulo  $2\theta$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varphi_{\lambda/2} = 0 + \pi$$



Dif de fase antes de la lamina

Dif de fase despues de la lamina

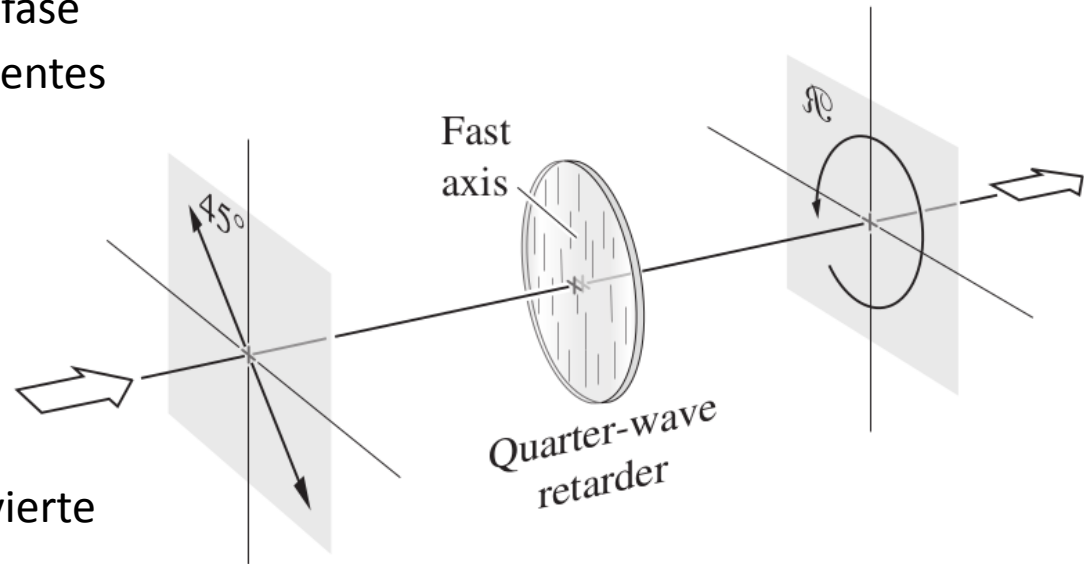




# Lamina de cuarto de onda

Diseñada para introducir una dif de fase de  $\frac{\pi}{2}$  radianes entre ambas componentes

$$\Delta\varphi_{\lambda/4} \equiv (n_{\parallel} - n_{\perp}) \frac{2\pi d}{\lambda_0} = \frac{\pi}{2}$$



- Ej: una polarización lineal la convierte en circular

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varphi_{\lambda/2} = 0 + \frac{\pi}{2}$$

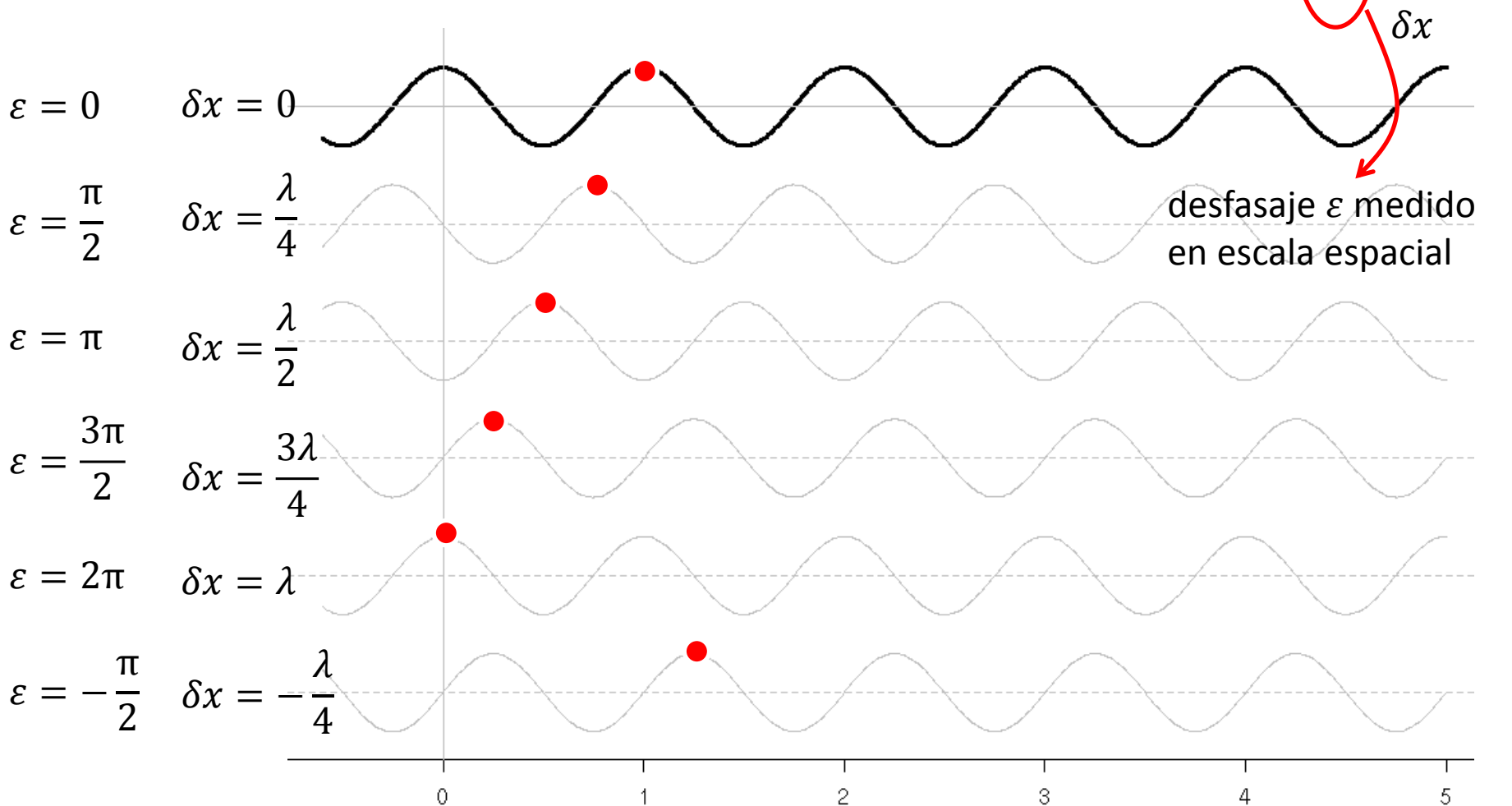


Dif de fase antes de la lamina

Dif de fase despues de la lamina

# La palabra clave...desfasaje

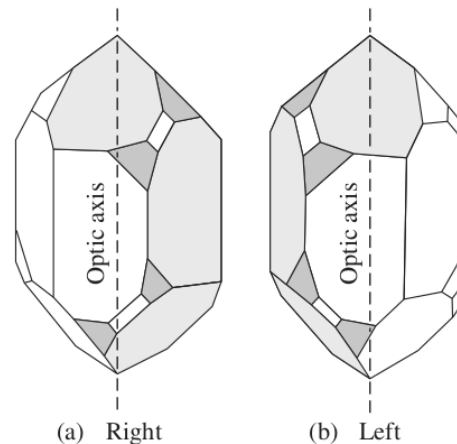
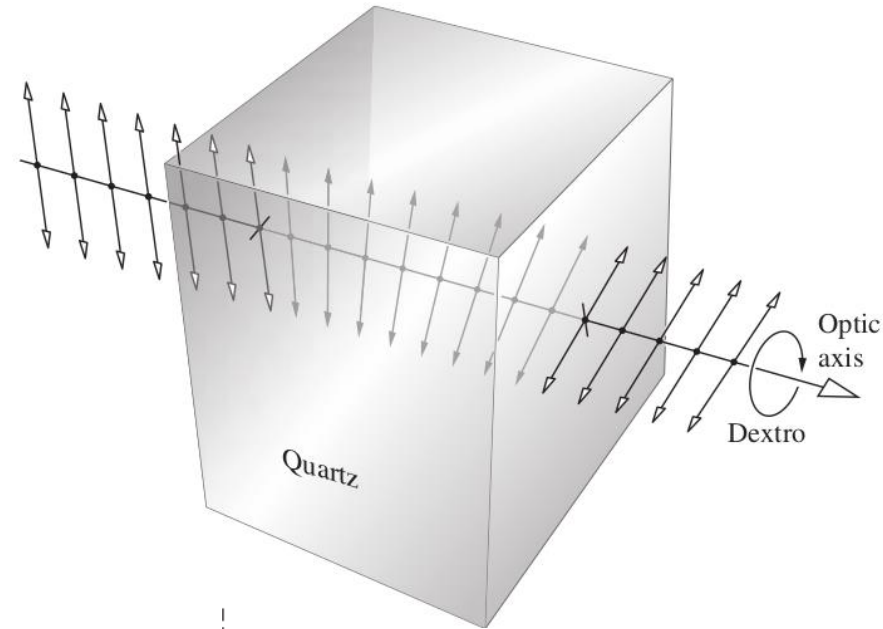
$$\psi(x, t) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \varepsilon\right) \longrightarrow \psi(x, t) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2\pi} \varepsilon\right)$$



# Actividad Optica

De como la luz puede decir cosas sobre las sustancias que atraviesa

- (Arago 1811) La dirección de vibración de una onda linealmente polarizada experimentaba un proceso de rotación continuo al propagarse paralelo al eje óptico de un cristal de cuarzo
- (Herschel 1822) Había dos tipos de cristales de cuarzo. Uno rotaba la luz LP hacia la derecha (poder **dextrógiro**) y otro hacia la izquierda (poder **levógiro**)



# Actividad Optica

De como la luz puede decir cosas sobre las sustancias que atraviesa

- Los dos tipos de cuarzo eran uno la imagen especular del otro.
- (Pasteur 1848) Solución de ácido racémico es ópticamente inactivo, pero en realidad presenta partes iguales de isómeros (i.e. constituyentes "zurdos" y "diestros", unos imagen especular de los otros).
- Si se los separa y disuelve por separado en agua, las soluciones presentan actividad óptica levógira una, y dextrógira otra.

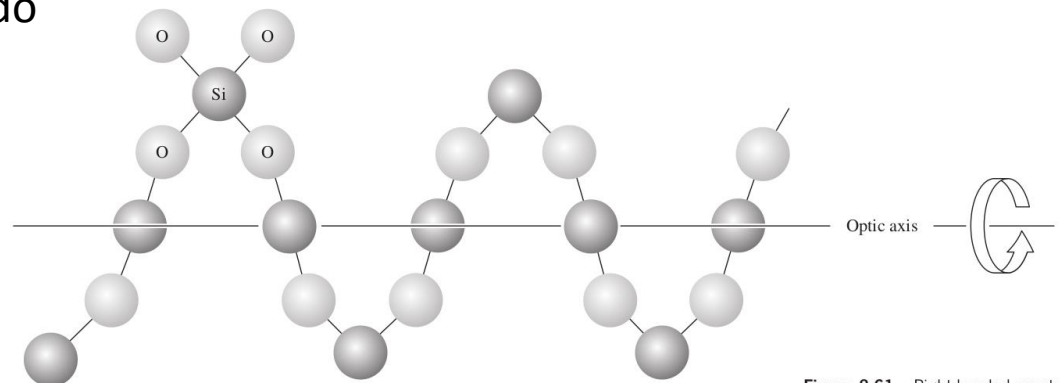
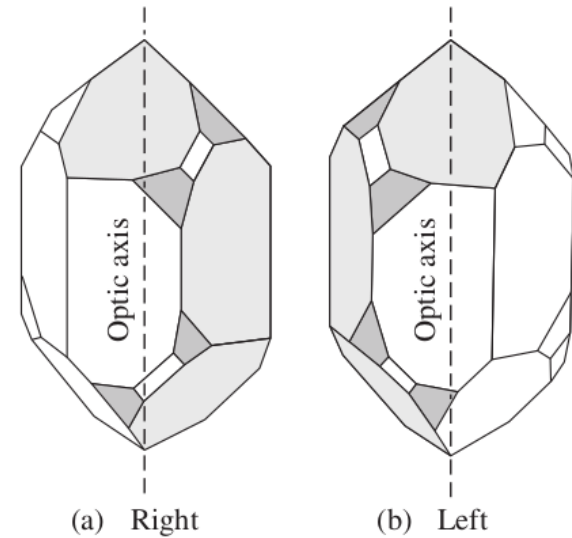
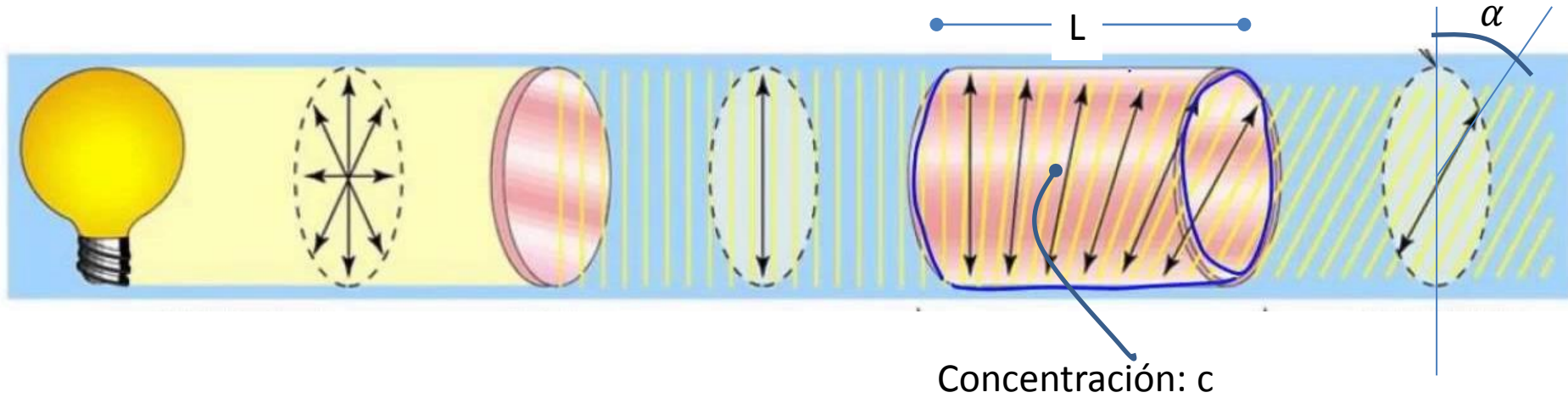


Figure 8.61 Right-handed quartz.

# Cuantificando el poder rotatorio



temperatura

$$[\alpha]_{\lambda}^T = \frac{\alpha}{L * c}$$

dm      g/ml

Compuesto	$[\alpha]_D^{20}$
D-sucrose	+66.37
D-lactose	+52.3
D-glucose	+52.7
Cholesterol	-31.5

