

# Magnetismo y Óptica



Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

E-mail: [roberto.duarte@didactica.fisica.uson.mx](mailto:roberto.duarte@didactica.fisica.uson.mx)

Webpage: <http://rpduarte.fisica.uson.mx>

© 2016 Departamento de Física Universidad de Sonora

---

# Temario

## A. Magnetismo

1. Campo magnético. [Enell-Ene29] (7.5 horas)
2. Leyes del Magnetismo [Feb01-Feb19] (7.5 horas)
3. Propiedades magnéticas de la materia. [Feb22-Feb26] (3horas)

## B. Óptica

1. Naturaleza y propagación de la luz. [Feb29-Mar04] (3horas)
  2. Leyes de la reflexión y refracción. [Mar07-Mar15] (4.5horas)
  3. Óptica geométrica. [Mar26-Abr15] (9horas)
  4. Difracción. [Abr18-Abr22] (3horas)
  5. **Polarización óptica.** [Abr25-Abr29] (3horas)
  6. Propiedades ópticas de la materia. [May02-May06] (3horas)
-

---

# Magnetismo y óptica

## Parte II: Óptica (Tiempo aproximado: 27 horas)

5. Polarización óptica. [Abr25-Abr29] (3 horas).
    - a. Polarización de la luz. Filtros polarizadores.
    - b. Polarización mediante absorción selectiva. Ley de Malus.
    - c. Polarización por reflexión. Ley de Brewster.
    - d. Polarización circular y elíptica.
    - e. Polarización por doble refracción.
    - f. Polarización por dispersión.
    - g. Actividad óptica de moléculas.
-

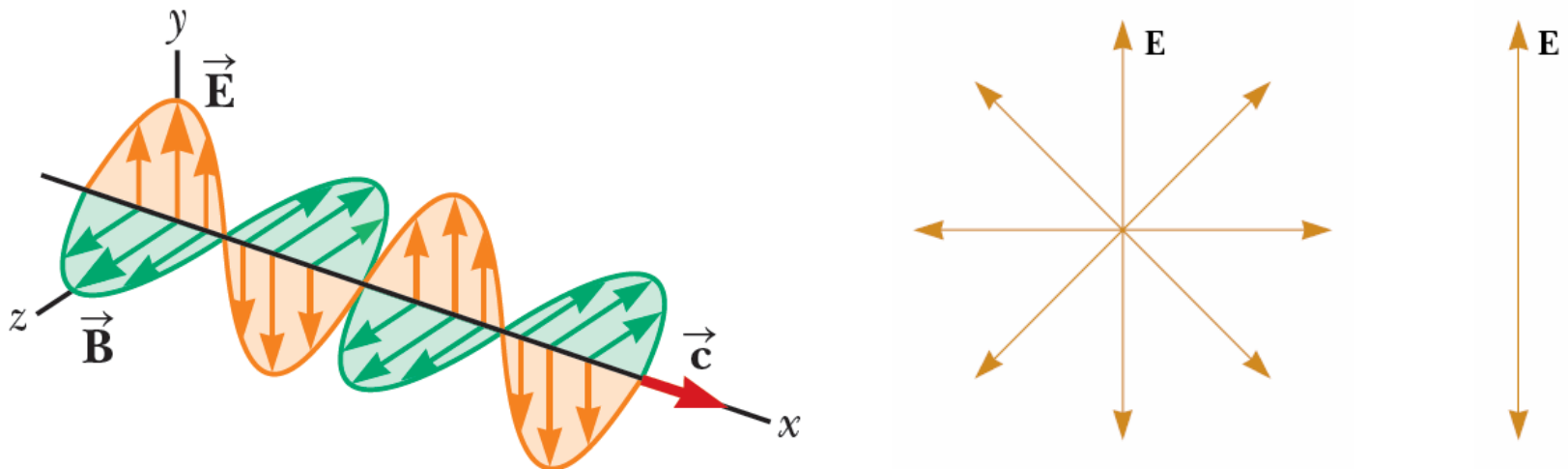
# Polarización de la luz. Filtros polarizadores.

## Polarización de la luz.

Un haz ordinario de luz consta de un gran número de ondas electromagnéticas emitidas por los átomos de una fuente de luz, cada una con su propia orientación en la que vibran sus campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ .

La **dirección de polarización** de cada onda individual está definida como la dirección en la cual el campo eléctrico está vibrando.

Se dice que una onda está polarizada linealmente si el campo eléctrico  $\vec{E}$  vibra en la misma dirección todo el tiempo en un punto en particular.



# Polarización de la luz. Filtros polarizadores.

## Filtros polarizadores

La forma de polarizar un haz luminoso consiste en eliminar todas las ondas del haz, excepto aquellas cuyos vectores de campo eléctrico oscilan en un mismo plano.

Los filtros polarizadores son los instrumentos ópticos que permiten seleccionar una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de la luz.



---

# Polarización de la luz. Filtros polarizadores.

## Procesos o formas de polarizar la luz.

Existen varias formas de polarizar un haz luminoso, entre estos procesos podemos considerar los siguientes:

- Polarización mediante absorción selectiva
- Polarización por reflexión
- Polarización por doble refracción
- Polarización por dispersión

En lo que sigue haremos una breve descripción de cada uno de los procesos mencionados, quedando para el estudiante revisarlos con mayor profundidad.

Para concluir, también revisaremos la llamada actividad óptica que consiste en girar la dirección de polarización de la luz producido por la llamada **quiralidad** que presentan algunas moléculas, como el azúcar.

---

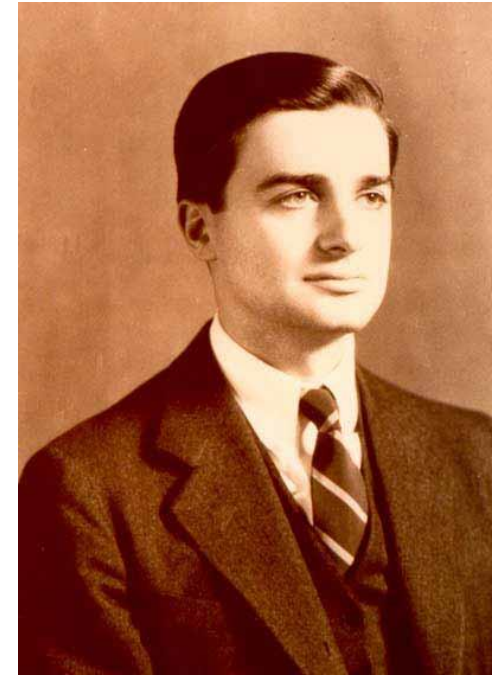
# Polarización mediante absorción selectiva.

## Absorción selectiva y el polaroide

En 1928, el químico estadounidense Edwin Herbert Land (1909-1991) descubrió un material al que llamó **polaroide** y el cual se fabrica en láminas delgadas de hidrocarburos en cadenas largas.

Este descubrimiento fue la base para que en 1932 Land, junto a su profesor de Física, George Wheelwright III, establecieran en Boston los Laboratorios Land-Wheelwright (con la finalidad de continuar su trabajo de investigación) y que más tarde se convertirían en la compañía Polaroid.

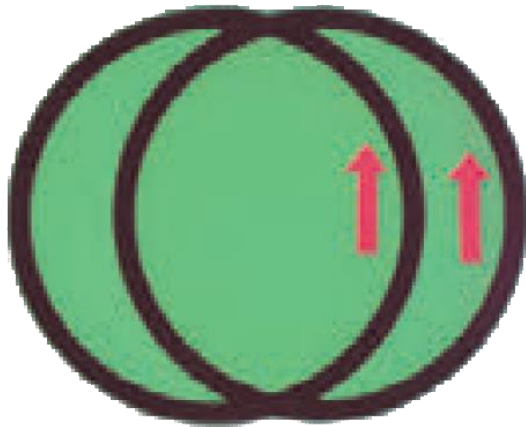
En este proceso, las láminas son estiradas durante su fabricación, de modo que las moléculas se alineen en cadenas largas; posterior a una inmersión en una solución que contiene yoduro, las moléculas vuelven buenos conductores, principalmente a lo largo de la cadena de hidrocarburos. De tal forma que absorben la luz en esa dirección y permiten el paso de aquella que viaja en forma perpendicular a su longitud.



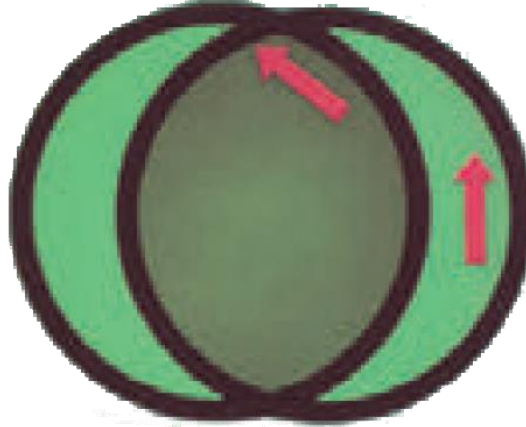
# Polarización mediante absorción selectiva.

## Absorción selectiva y el polaroide

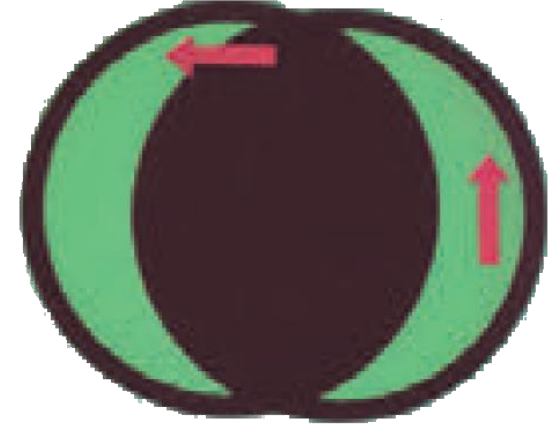
Es común referirse a la dirección perpendicular a las cadenas moleculares como el eje de transmisión.



Cuando los ejes de transmisión están alineados la intensidad de luz transmitida tiene un valor máximo



Conforme los ejes de transmisión dejan de estar alineados la intensidad de luz transmitida empieza a disminuir



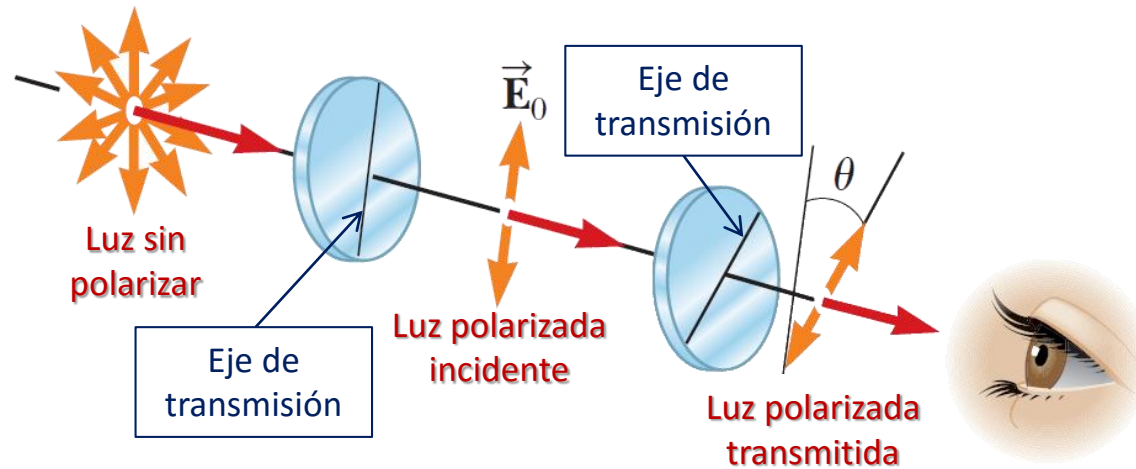
Cuando los ejes de transmisión están perpendiculares la intensidad de luz transmitida tiene un valor mínimo



# Polarización mediante absorción selectiva.

## Ley de Malus.

Se puede relacionar el giro de los ejes de transmisión con la intensidad de luz que se transmite, para ello consideremos el siguiente esquema.



La relación de intensidades entre el haz transmitido ( $I_{max}$ ) cuando los polarizadores están alineados ( $\theta = 0$ ) y el haz que se transmite ( $I$ ) al girar el polarizador un ángulo  $\theta$  satisfacen la **Ley de Malus** que se escribe como

$$I = I_{max} \cos^2 \theta$$

# Polarización mediante absorción selectiva.

## Ley de Malus. Ejemplo.

**Ejemplo.** Se hace pasar luz no polarizada a través de dos hojas Polaroid. Si el eje de transmisión de la primera hoja está vertical, y el eje de la segunda hoja forma un ángulo de  $30^\circ$  con la vertical, ¿qué fracción de la luz incidente se transmite?

**Solución.**

A partir de la Ley de Malus

$$I = I_{max} \cos^2 \theta$$

podemos escribir la fracción transmitida como

$$\frac{I}{I_{max}} = \cos^2 \theta$$

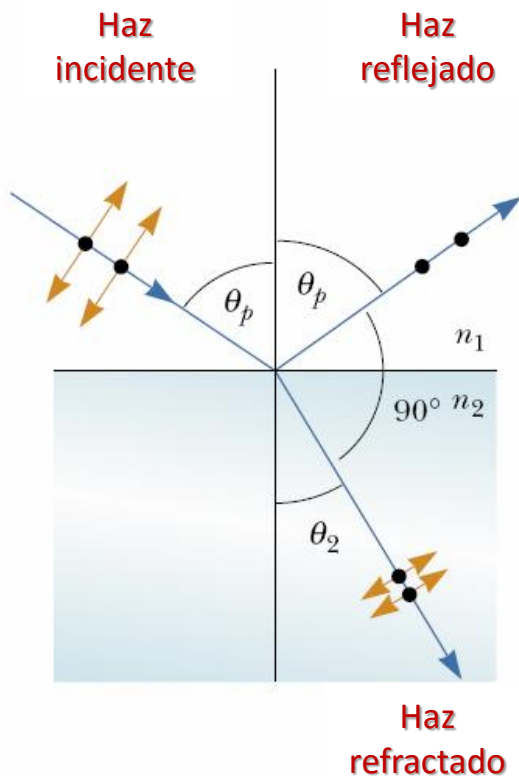
Por lo que

$$\frac{I}{I_{max}} = \cos^2 30^\circ = 0.75$$

# Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

## Angulo de polarización y la Ley de Brewster

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada puede ser completamente polarizada, parcialmente polarizada o no polarizada, lo cual depende del ángulo de incidencia.



El ángulo al cual ocurre la polarización total se le conoce como **ángulo de polarización  $\theta_p$** , y está dado por la Ley de Brewster que se escribe como

$$n = \tan \theta_p$$

donde  $n$  es el cociente entre los índices de refracción, es decir  $n = n_2/n_1$ .

Es importante recordar que para una sustancia  $n$  varía con la longitud de onda, por lo que el ángulo de polarización o de Brewster también es una función de la longitud de onda.

# Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

## Angulo de polarización y la Ley de Brewster

El fenómeno de polarización por reflexión es muy común, la luz solar reflejada por el agua, el vidrio y la nieve, por ejemplo, está parcialmente polarizada por la superficie de tales materiales.

Si la superficie es horizontal, el campo eléctrico de la luz reflejada tiene una fuerte componente horizontal, por lo que se usan lentes polarizados para reducir este reflejo.

Los ejes de transmisión de estos lentes deben estar orientados verticalmente para que absorban esta componente horizontal de la luz polarizada reflejada.



Fotografía tomada sin filtro polarizador (izquierda) y con filtro polarizador (derecha).

# Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

## Angulo de polarización y la Ley de Brewster. Un ejemplo

**Ejemplo.** El ángulo de incidencia sobre una superficie reflejante cambia de manera continua para un haz de luz sin polarizar. El rayo reflejado en aire está completamente polarizado cuando el ángulo de incidencia es de  $48.0^\circ$ . ¿Cuál es el índice de refracción del material reflejante?

**Solución.**

A partir de la Ley de Brewster

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

Podemos despejar el índice de refracción del material ( $n_2$ ):

$$n_2 = n_1 \tan \theta_p$$

Con lo que

$$n_2 = (1.00) \tan 48.0^\circ = 1.11$$

---

# Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

## Angulo de polarización y la Ley de Brewster. Ejercicio

Ejercicio. ¿A qué ángulo sobre el horizonte se encuentra el Sol si la luz reflejada en la superficie de un lago, en una tarde agradable, está completamente polarizada?

Respuesta.

El ángulo sobre el horizonte es  $36.94^\circ$ .

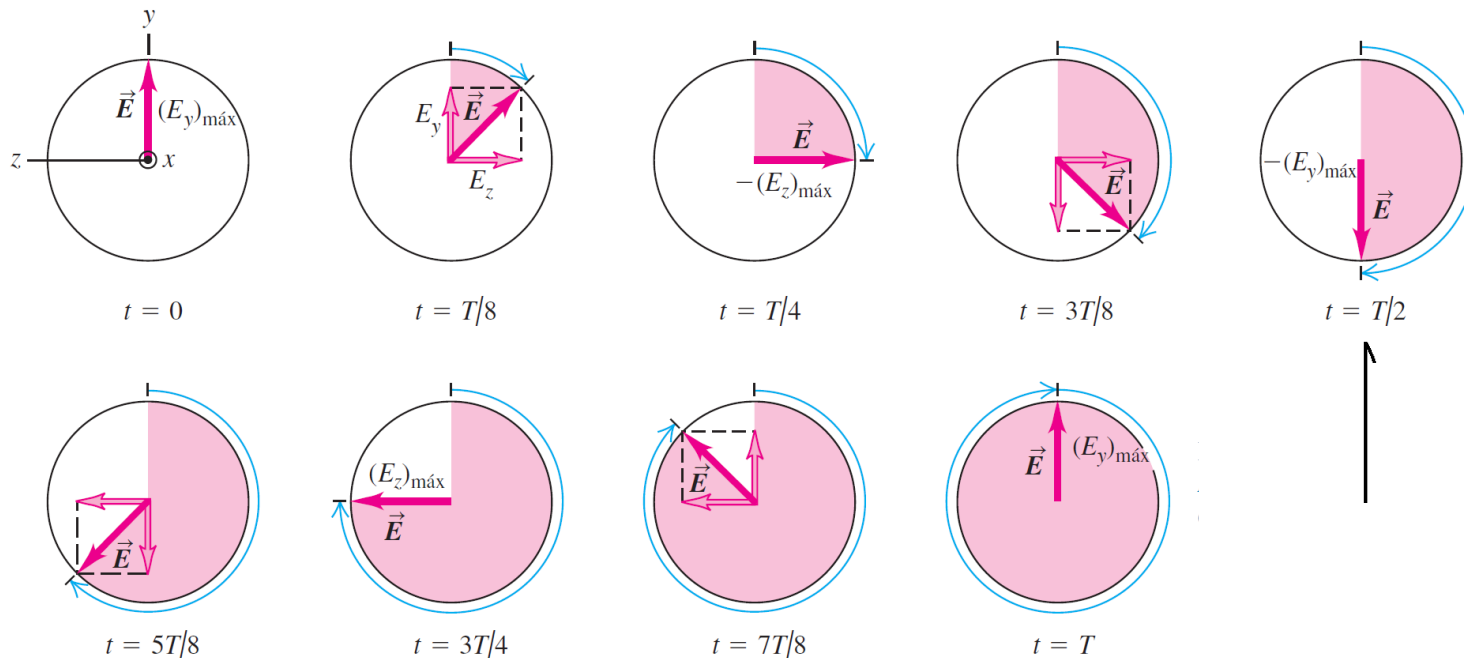
---

# Polarización circular y elíptica.

## Superposición de dos campos linealmente polarizados

La superposición de dos ondas linealmente polarizadas se llama **polarización circular** si las amplitudes de ambas ondas son iguales, sus ejes de polarización son perpendiculares y están desfasadas un cuarto de ciclo.

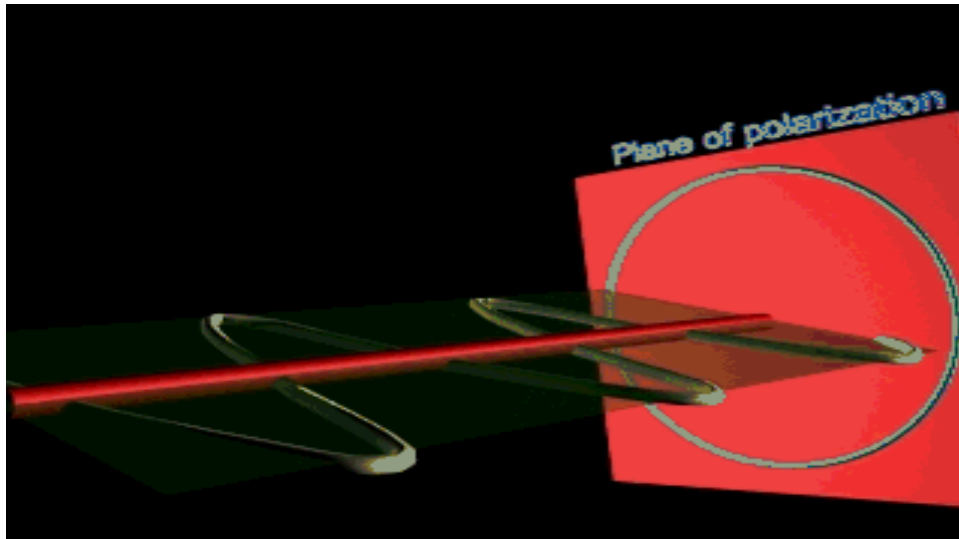
En el esquema mostrado, la onda resultante se propaga en dirección  $+x$  (saliendo de la pantalla) y se dice que está polarizada circularmente por la derecha.



# Polarización circular y elíptica.

## Superposición de dos campos linealmente polarizados

Por convención, se dice que la onda está circularmente polarizada por la derecha cuando el sentido del movimiento del plano de la onda resultante, para un observador que mira hacia atrás a lo largo de la dirección de propagación, es el sentido horario; y se dice que la onda está circularmente polarizada por la izquierda si el sentido del movimiento es el inverso.



Si en la animación consideramos que la onda polarizada circularmente se propaga hacia la derecha, entonces hablamos de tener una onda circularmente polarizada por la derecha.

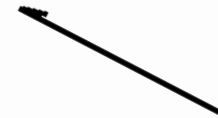
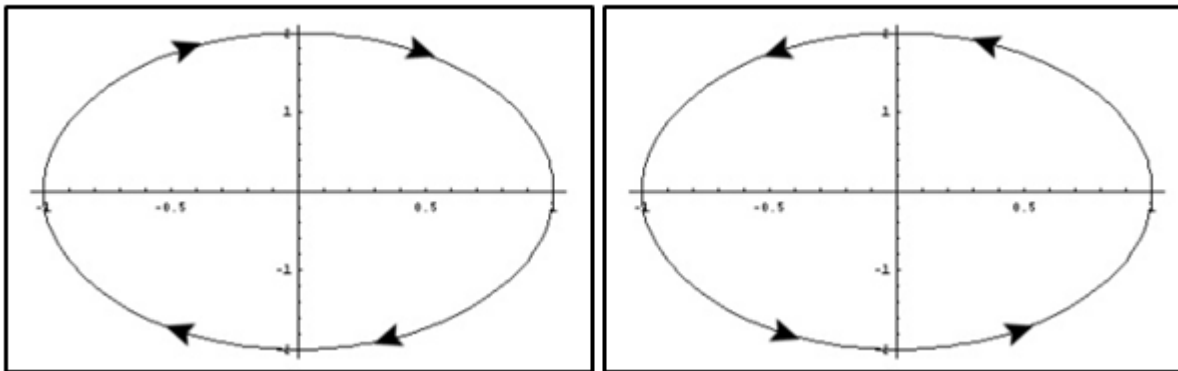
En cambio, si en la animación la propagación es a la izquierda, hablamos de una onda circularmente polarizada por la izquierda.



# Polarización circular y elíptica.

## Superposición de dos campos linealmente polarizados

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 ya no traza un círculo, sino que ahora sigue el trazo de una elipse. En este caso, se dice que la onda está **elípticamente polarizada**.



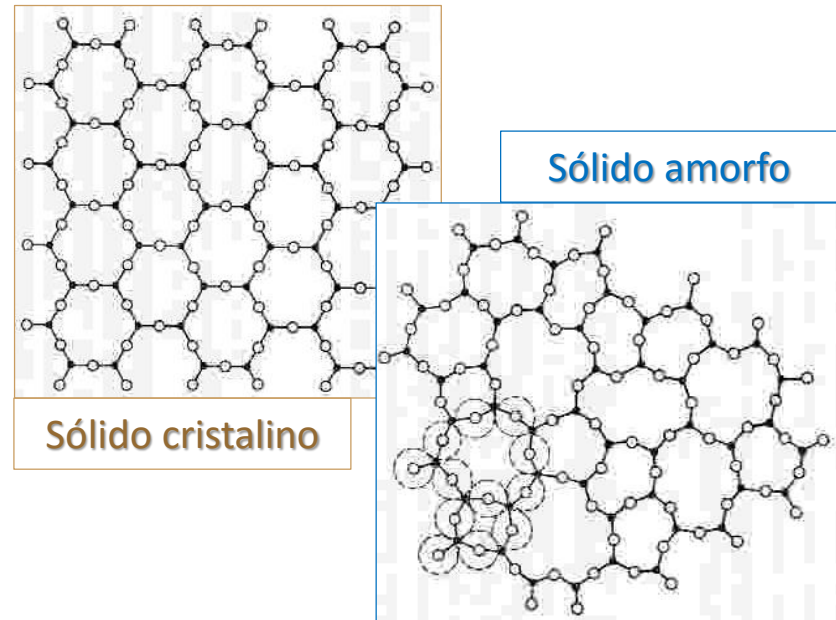
En el caso de ondas electromagnéticas con frecuencias de radio, se puede crear una polarización circular o elíptica mediante dos antenas situadas en ángulo recto alimentadas por el mismo transmisor, pero con un circuito que introduce la diferencia de fase apropiada.

# Polarización por doble refracción.

## Sólidos cristalinos y amorfos

Los sólidos pueden clasificarse en cristalinos y amorfos dependiendo de su estructura interna.

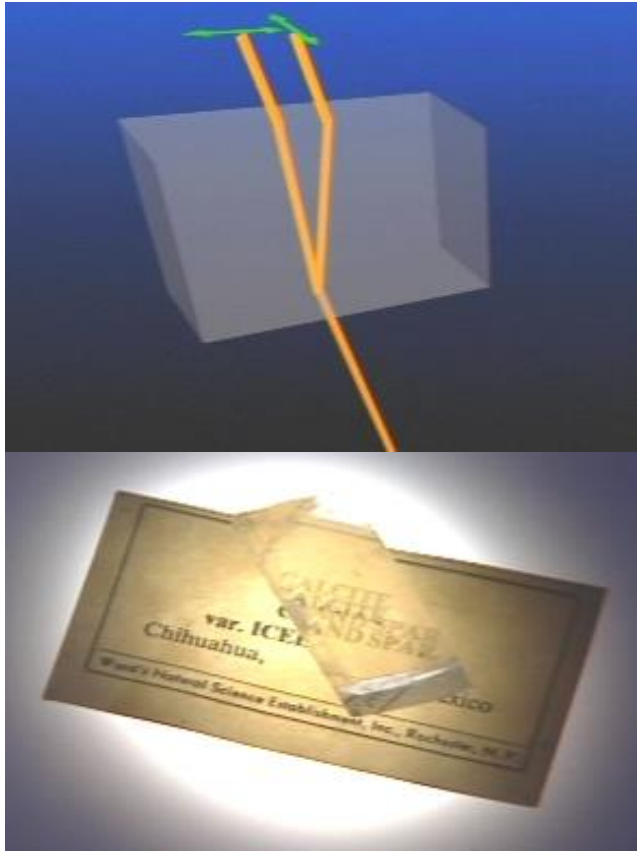
Los sólidos cuyos átomos se acomodan en un orden específico se llaman **sólidos cristalinos**, o simplemente cristales; mientras que aquellos sólidos en los que los átomos se acomodan de forma aleatoria son llamados **sólidos amorfos**.



Cuando la luz viaja a través de un sólido amorfo, como el vidrio, lo hace con una rapidez que es la misma en cualquier dirección por lo que el índice de refracción es el mismo y se dice que es un **material isotrópico**. En cambio, para ciertos materiales cristalinos (como la calcita y el cuarzo), la rapidez de la luz no es la misma en todas las direcciones, es decir, la transmisión de luz no es isotrópica y se tiene un **material anisotrópico**.

# Polarización por doble refracción.

## Sólidos cristalinos y la birrefringencia



Los sólidos cristalinos que presentan dos valores diferentes para el índice de refracción dependiendo de la dirección de propagación se les llama **birrefringentes**.

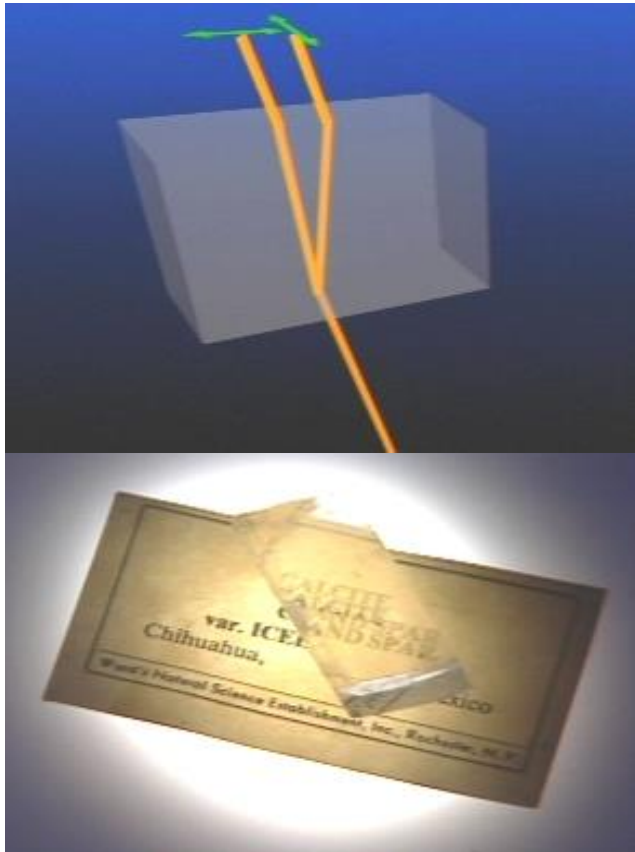
Como se mencionó anteriormente, la calcita es un material con esta característica de birrefringencia.

Cuando entra luz sin polarizar a un material birrefringente, esta se divide en dos rayos (ordinario y extraordinario) que poseen polarizaciones lineales mutuamente perpendiculares y que viajan a diferentes rapidezces.

Si el cristal tiene el espesor justo para introducir una diferencia de fase de un cuarto de ciclo, entonces el cristal convierte la luz linealmente polarizada en luz circularmente polarizada.

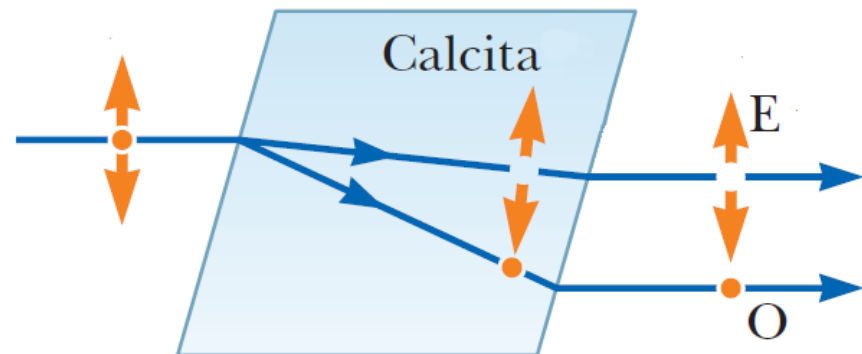
# Polarización por doble refracción.

## Sólidos cristalinos y la birrefringencia



Hay una dirección, llamada eje óptico, a lo largo de la cual, los rayos ordinario (O) y extraordinario (E) tienen la misma rapidez.

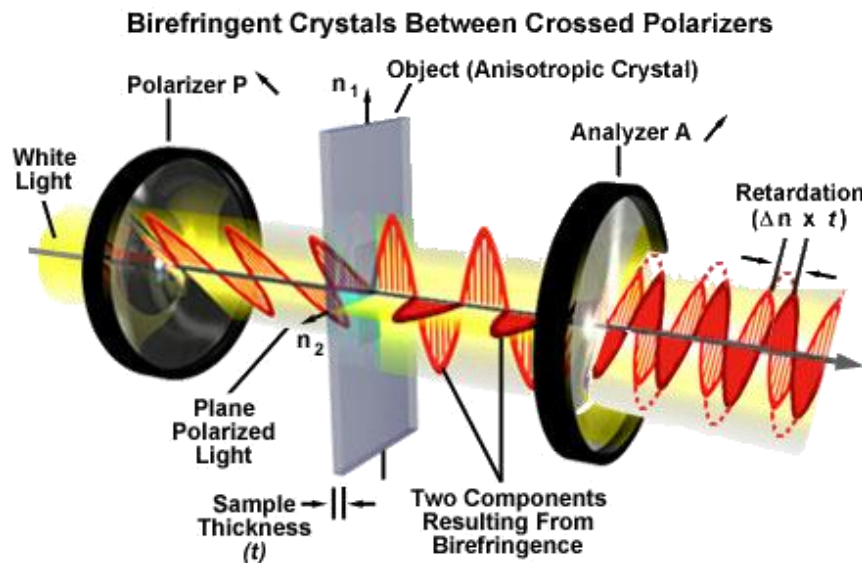
Sin embargo, la existencia de estos dos rayos en estos materiales es la responsable de que se formen dos imágenes: la del rayo ordinario (O) y la del rayo extraordinario (E).



Ambas están linealmente polarizadas, aunque en planos diferentes. La imagen del rayo ordinario está fija, mientras la del extraordinario cambia de posición al rotar el cristal (eje óptico).

# Polarización por doble refracción.

## Sólidos cristalinos y la birrefringencia



Incidencia normal formando un cierto ángulo  $\alpha$  con el eje óptico, paralelo a la superficie del cristal y perpendicular a la dirección de propagación

Los rayos ordinario (O) y el extraordinario (E) al atravesar un material anisotrópico de espesor  $d$  quedan desfasados una fase  $\delta$  dada por

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_E - n_O)d$$

donde  $n_E$  es el índice de refracción para el rayo extraordinario; y  $n_O$  es el índice de refracción para el rayo ordinario.

Índices de refracción para cristales birrefringentes ( $\lambda = 589.3nm$ )

Crystal	$n_O$	$n_E$	$n_O/n_E$
Calcite ( $CaCO_3$ )	1.658	1.486	1.116
Quartz ( $SiO_2$ )	1.544	1.553	0.994
Sodium nitrate ( $NaNO_3$ )	1.587	1.336	1.188
Sodium sulfite ( $NaSO_3$ )	1.565	1.515	1.033
Zinc chloride ( $ZnCl_2$ )	1.687	1.713	0.985
Zinc sulfide ( $ZnS$ )	2.356	2.378	0.991

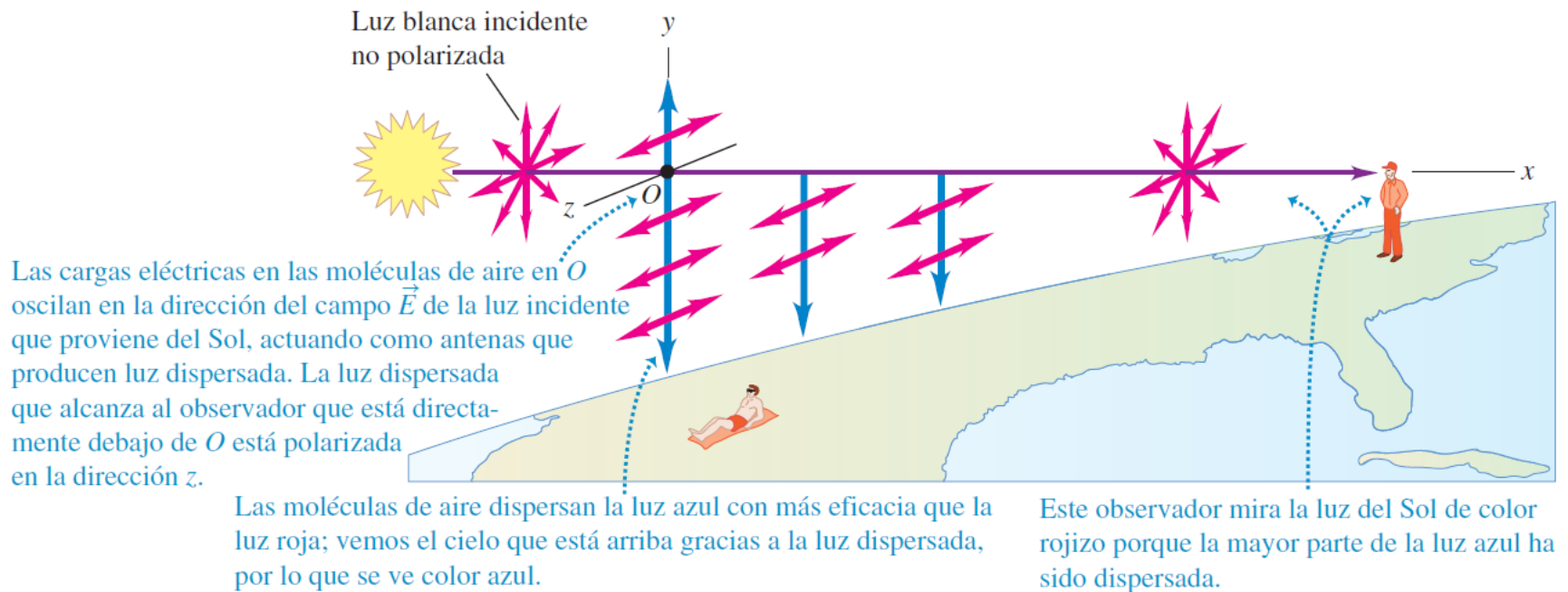
# Polarización por dispersión.

## ¿Por qué el cielo es azul?

- Las moléculas de aire son centros de dispersión para la luz solar. → La molécula absorbente actúa como una antena dipolar → emite luz polarizada en su plano de vibración.
- El análisis detallado del proceso de dispersión revela que la intensidad de la luz dispersada por las moléculas del aire se incrementa en proporción a la cuarta potencia de la frecuencia. Así, la razón de la intensidad para los dos extremos del espectro visible es  $(700nm/400nm =)$  9.4. En términos generales, la luz dispersada contiene nueve veces más luz azul que roja, y por eso el cielo es azul.
- Por otro lado, las nubes contienen una gran concentración de gotas de agua o cristales de hielo, que también dispersan la luz. Como esta concentración es elevada, la luz que pasa a través de una nube tiene muchas más oportunidades de dispersarse que la luz que pasa a través de un cielo despejado. En consecuencia, luz de todas las longitudes de onda termina por ser dispersada fuera de la nube, y por eso la nube es de color blanco.

# Polarización por dispersión.

## ¿Por qué el cielo es azul?



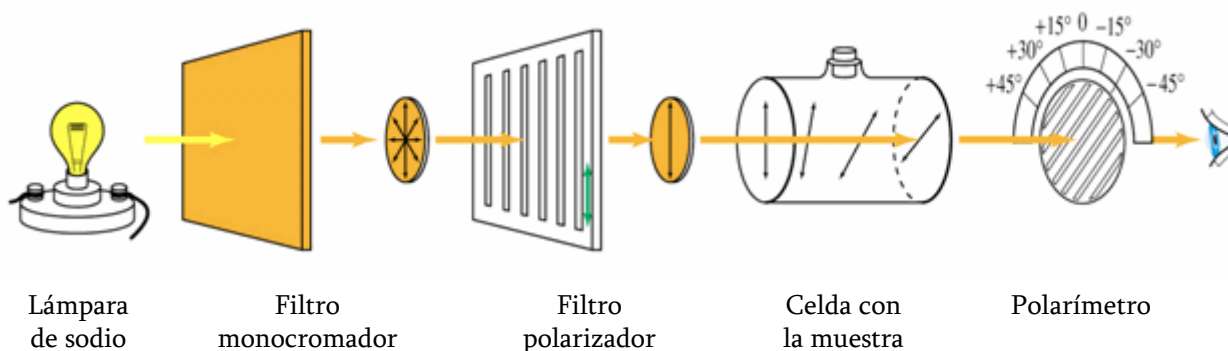
Cuando la persona que toma el sol a la izquierda de la ilustración mira hacia arriba, ve la luz solar polarizada, de color azul, que ha sido dispersada por las moléculas de aire.

El observador a la derecha ve luz rojiza, no polarizada, si mira hacia el Sol.

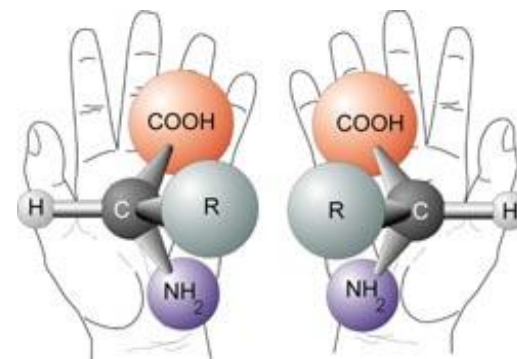
# Actividad óptica de moléculas.

## Quiralidad de moléculas

La actividad óptica es la rotación de la polarización lineal de la luz cuando viaja a través de ciertos materiales. Se mide usando un aparato llamado **polarímetro**.



Es un fenómeno que ocurre en soluciones que contienen **moléculas quirales** tales como el azúcar, sólidos con planos cristalinos rotados, tales como el cuarzo, y en la polarización circular de gases atómicos o moleculares.



**Moléculas quirales**

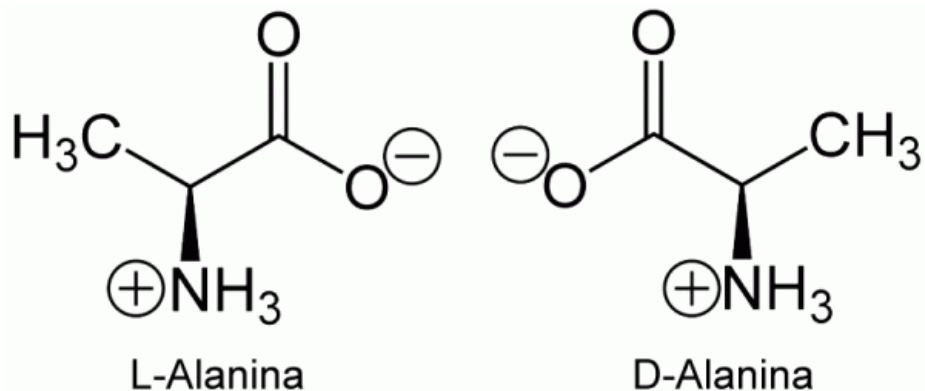


# Actividad óptica de moléculas.

## Quiralidad de moléculas

A las moléculas que poseen quiralidad se les antepone una letra (*L* ó *D*) para indicar el giro que poseen: *L* – para indicar quiralidad izquierda o levógira; y *D* – para indicar quiralidad derecha o dextrógira.

Por ejemplo, L-Alanina y D-Alanina.

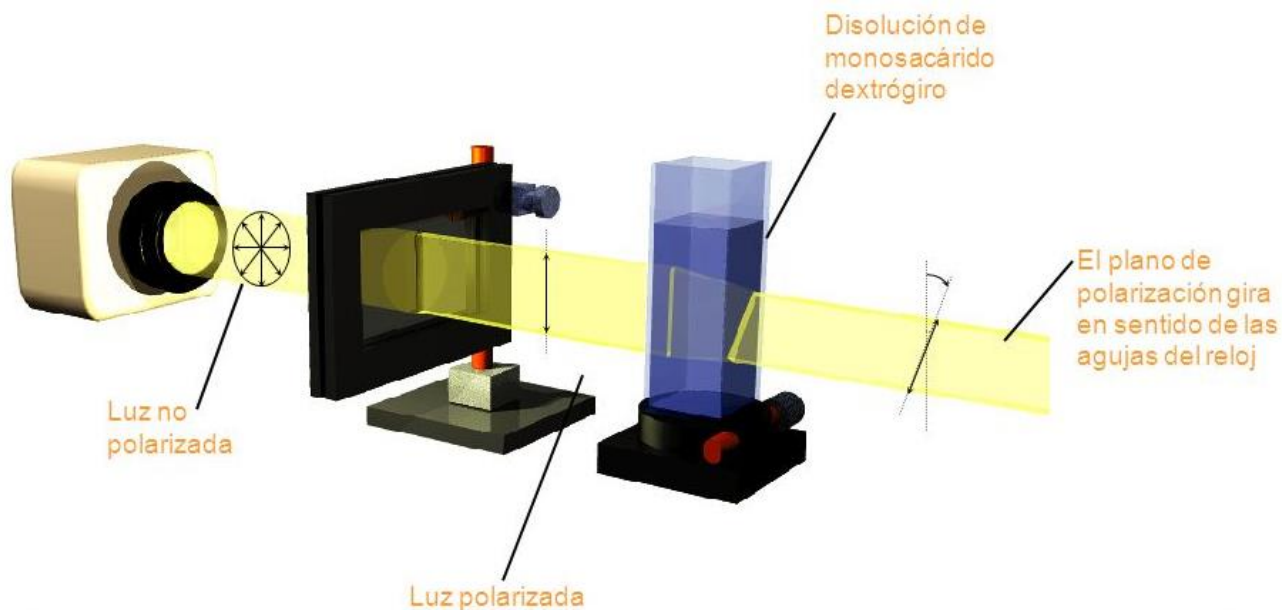


Este fenómeno, observado por primera vez en 1811 en el cuarzo por el físico francés François Jean Dominique Arago (1786–1853), es ampliamente usado hoy día; por ejemplo, se emplea en la industria de elaboración de azúcar para medir la concentración de azúcares, en óptica para manipular la polarización, en química para caracterizar sustancias en solución acuosa, entre otras aplicaciones.

# Actividad óptica de moléculas.

## Quiralidad de moléculas. Resumiendo

- Algunas sustancias son capaces de rotar el plano de polarización de la luz incidente (dextrógiras y levógiras)
- Pueden presentar actividad óptica sólo en estado sólido: cuarzo, benzil.
- En todos los estados: azúcar, alcanfor, ácido tartárico.
- Puede depender de la concentración: ácido láctico, levulosa, dextrosa.



# Actividad óptica de moléculas.

## Esquema para observar la actividad óptica



# Magnetismo y Óptica



Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

E-mail: [roberto.duarte@didactica.fisica.uson.mx](mailto:roberto.duarte@didactica.fisica.uson.mx)

Webpage: <http://rpduarte.fisica.uson.mx>

© 2016 Departamento de Física Universidad de Sonora