

# Naturaleza y Propagación de la luz

José Paúl Calderón Magallón

## Óptica

paul.calderon@academicos.udg.mx

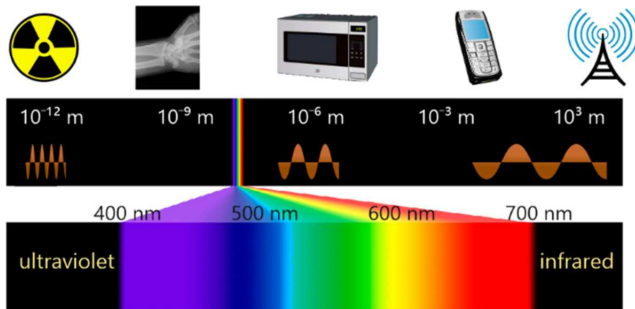
19 de febrero de 2024

- 1 Naturaleza de la luz
- 2 Reflexión y Refracción de la Luz
  - Índice de refracción
- 3 Leyes de Reflexión y Refracción
  - Índice de refracción y aspectos ondulatorios de la luz
- 4 Reflexión total interna de la luz
- 5 Dispersión de la luz
- 6 Polarización
  - Filtros Polarizadores
  - Polarización por reflexión

¿Qué es la luz?

## ¿Qué es la luz?

- La luz es la parte del espectro electromagnético entre el infrarrojo y el ultravioleta.
- La luz visible es solamente una fracción de lo que en física se conoce como luz.



**Figura 1:** La luz visible como parte del espectro electromagnético. Es percibida como los colores del arcoiris, cada uno de los cuales corresponde a una longitud de onda específica.

- La naturaleza de la luz ha sido sujeta a debates durante mucho tiempo.
- Como una entidad física, mucha gente ha sugerido que la luz tiene una naturaleza corpuscular, otros, como una onda.
- Las entidades físicas pueden clasificarse como **ondas** o **partículas**.
- Las ondas se dispersan en el espacio, pueden pasar a través de obstáculos y se pueden agregar a otras ondas.
- Las partículas, sin embargo, se mueven en línea recta a falta de una fuerza externa que actúe en ellas.
- La luz, tiene una naturaleza ambivalente que requiere de dos modelos aparentemente contradictorios, sin embargo, estos modelos son complementarios.

## ¿Qué es una onda?

- La noción de onda involucra la descripción del proceso de propagación de una perturbación, que es una variación espacial y temporal de una entidad física que se extiende en el espacio y en el tiempo.

### ONDA ELECTROMAGNÉTICA

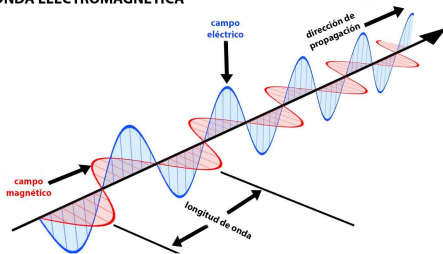


Figura 2: Diferentes tipos de ondas.

- Un campo es una distribución de valores de una entidad física en el espacio y en el tiempo.
- Pueden ser escalares o vectoriales dependiendo de la naturaleza física de la entidad presente. Por ejemplo, la distribución de la temperatura sobre un área es un campo escalar; la temperatura no tiene dirección, solamente magnitud.
- El campo magnético por el contrario es un campo vectorial, tiene magnitud y dirección.
- Algunos campos son llamados dinámicos; el tales campos, pueden ejercerse fuerzas, por ejemplo, una esfera cargada positivamente, crea un campo eléctrico estático. Otra carga positiva o negativa puede ser repelida o atraída por una fuerza eléctrica ejercida dentro del campo.

- Las ondas electromagnéticas son descritas como perturbaciones del campo magnético y del campo eléctrico, que son oscilaciones mutuamente dependientes en planos normales.
- Si una fuente (una esfera cargada) comienza a oscilar (en general, acelerar), entonces, no solamente perturba el campo eléctrico alrededor de ella sino que simultáneamente crea un campo magnético, es decir, el cambio en el campo magnético también causa un cambio en el campo eléctrico.
- Un campo eléctrico pulsante genera un campo magnético pulsante y viceversa. Este es el campo electromagnético: interdependiente, campos eléctricos y magnéticos no estáticos.



# Reflexión y Refracción de la Luz

## Ondas, frentes de ondas y rayos

A menudo se utiliza el concepto de **frente de onda** para describir la propagación de las ondas. De manera más general, un frente de onda se define como *el lugar geométrico de todos los puntos adyacentes en los cuales la fase de vibración de una cantidad física asociada con la onda es la misma*. Es decir, en cualquier instante, todos los puntos del frente de onda están en la misma parte de su ciclo de vibración.

- Lejos de la fuente, donde los rayos de las esferas son muy grandes, una sección de la superficie esférica se puede considera como un plano y así surge una **onda plana** (Figura 3).

# Ondas, frente de onda y rayos

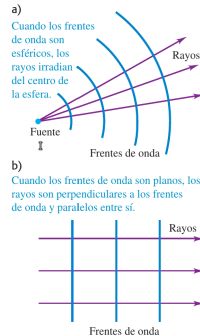
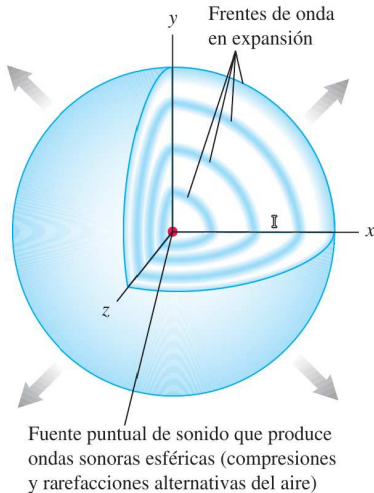


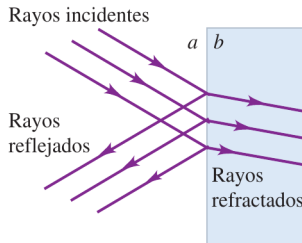
Figura 3: Diferentes tipos de ondas.

Para describir las direcciones en las que se propaga la luz, a menudo conviene representar una onda luminosa por medio de **rayos** y no por frentes de onda.

- En la teoría corpuscular de la luz, los rayos son trayectorias de partículas.
- Cuando las ondas viajan en un material isotrópico homogéneo (un material que tiene las mismas propiedades en todas las regiones y direcciones), los rayos siempre son líneas rectas normales a los frentes de onda.
- En una superficie frontera entre dos materiales, como la superficie de una placa de vidrio en el aire, la rapidez de la onda y la dirección de un rayo pueden cambiar, pero los segmentos de rayo en el aire y en el vidrio son líneas rectas.

## Reflexión y Refracción

Cuando una onda luminosa incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes (como el aire y el vidrio o el agua y el vidrio), la onda general es *reflejada* parcialmente y también *refractada* (transmitida) parcialmente hacia el segundo material (ver Figura 4). La representación de estas ondas en términos de rayos es la base de la *óptica geométrica*.



c) Representación simplificada para ilustrar sólo un conjunto de rayos

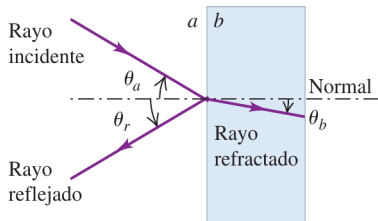
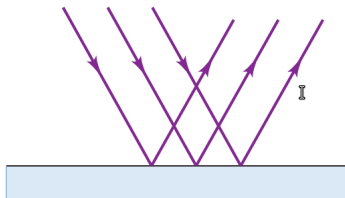


Figura 4: Ondas en el aire y en el vidrio representadas por rayos.

- Describimos las direcciones de los rayos incidentes, reflejados y refractados (transmitidos) en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos en términos de los ángulos que forman con la *normal* (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia como se ve en la Figura 4.
- Si la interfaz es rugosa, tanto la luz transmitida como la reflejada se dispersan en varias direcciones y no hay un ángulo único de transmisión o reflexión.
- La reflexión con un ángulo definido desde una superficie muy lisa se llama **reflexión especular**. La dispersión dispersa a partir de una superficie áspera se llama **reflexión difusa**. Esta diferencia se ilustra en la Figura 5.

a) Reflexión especular



b) Reflexión difusa

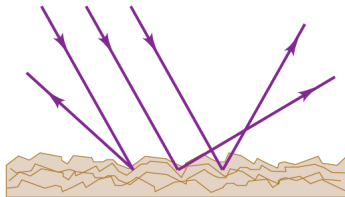


Figura 5: Reflexión especular y difusa.



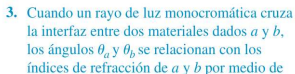
- Ambas clases de reflexión ocurren con materiales transparentes o con materiales *opacos* que no transmiten la luz. La gran mayoría de los objetos en el ambiente son visibles porque reflejan la luz en una forma difusa desde sus superficies.

El **índice de refracción** de un material óptico, denotado por  $n$ , es la razón de la rapidez de la luz  $c$  en el vacío y la rapidez de la luz  $v$  en el material:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1)$$

La luz siempre viaja con *más lentitud* en un material que en el vacío, por lo que el valor de  $n$  en cualquier material que no sea vacío siempre es mayor que la unidad. Para el vacío  $n = 1$ . Como  $n$  es una razón entre dos valores de rapidez por lo que es adimensional.

- Los ángulos  $\theta_a$ ,  $\theta_b$  y  $\theta_r$  se miden a partir de la normal.



$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

**Figura 6:** Las leyes de la reflexión y refracción.

- 1 Los rayos incidente, reflejado y refractado así como la normal a la superficie, yacen todos en el mismo plano. El plano de los tres rayos es perpendicular al plano de la superficie de frontera o límite entre los dos materiales.
- 2 El ángulo de reflexión  $\theta_r$  es igual al ángulo de incidencia  $\theta_a$  para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales,

$$\theta_r = \theta_a. \quad (2)$$

Esta relación, junto con la observación de que los rayos incidente, reflejado y la normal yacen en el mismo plano, se conoce como **ley de reflexión**.

①

②

- ③ Para la luz monocromática y un par dado de materiales,  $a$  y  $b$  en lados opuestos de la interfaz, la **razón de los senos de los ángulos  $\theta_a$  y  $\theta_b$ , donde los dos ángulos están medidos a partir de la normal a la superficie, es igual al inverso de la razón de los dos índices de refracción:**

$$\frac{\text{sen}\theta_a}{\text{sen}\theta_b} = \frac{n_b}{n_a}, \quad (3)$$

o bien

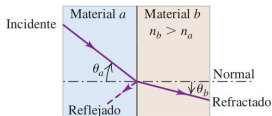
$$n_a \text{sen}\theta_a = n_b \text{sen}\theta_b. \quad (4)$$

Este resultado experimental, junto con la observación de que los rayos incidente y refractado, así como la norma se encuentran en el mismo plano se llama **ley de refracción** o **ley de Snell**.

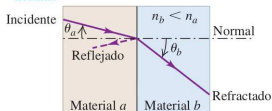
- Las ecuaciones (3) y (4) indican que cuando un rayo pasa de un material  $a$  hacia otro material  $b$  que tiene mayor índice de refracción ( $n_b > n_a$ ), y por lo tanto, tiene una menor rapidez de onda, el ángulo  $\theta_b$  que forma con la normal es más pequeño en el segundo material que el ángulo  $\theta_a$  en el primero; por consiguiente el ángulo se desvía hacia la normal (Figura 7.a).
- Cuando el segundo material tiene un *menor* índice *de refracción* que el primero ( $n_b < n_a$ ), y por lo tanto, una mayor rapidez de onda, el rayo se desvía de *alejándose* de la normal (Figura 7.b).

# Leyes de la reflexión y refracción

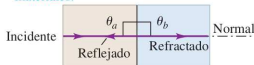
a) Un rayo que entra a un material con *mayor* índice de refracción se desvía *hacia* la normal.



b) Un rayo que entra a un material con *menor* índice de refracción se desvía *alejándose* de la normal.



c) Un rayo orientado a lo largo de la normal no se desvía, sin importar cuáles sean los materiales.



**Figura 7:** Reflexión y refracción en tres casos: a) el material *b* tienen un índice de refracción menor que el material *a*; b) el material *b* tiene un índice de refracción menor que el material *a* y c) el rayo de luz incidente es normal a la interfaz entre los materiales.

- La ley de la refracción explica por qué una regla parcialmente sumergida parece estar doblada; los rayos de luz que provienen de un lugar por debajo de la superficie, cambian de dirección al pasar por la interfaz aire-agua, de manera que los rayos parecen provenir de una posición por arriba de su punto de origen real. Un efecto similar explica la aparición de los atardeceres (ver Figura 8).



a) Una regla recta sumergida a la mitad en agua



b) ¿Por qué se ve doblada la regla?

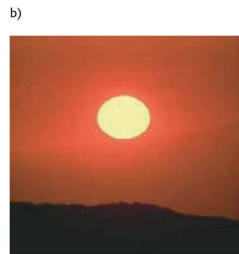
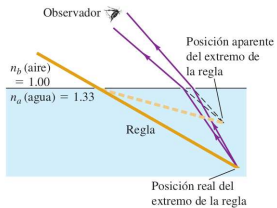


Figura 8: Refracción de la luz en el agua y en la atmósfera.

También es importante ver lo que ocurre con las características *ondulatorias* de la luz cuando eso sucede.

- 1 La frecuencia  $f$  de la onda no cambia cuando pasa de un material a otro. Es decir, el número de ciclos de la onda que llegan por unidad de tiempo debe ser igual al número de ciclos que salen por unidad de tiempo; esto significa que la superficie de frontera no puede crear ni destruir ondas.
- 2 La longitud de onda  $\lambda$  en general, es diferente en distintos materiales. Esto se debe a que en cualquier material  $v = \lambda f$ ; como  $f$  es la misma en cualquier material que en vacío y  $v$  siempre es menor que la rapidez  $c$  de la onda en el vacío,  $\lambda$  se reduce en forma correspondiente.

- Así, la longitud de onda  $\lambda$  de la luz en un material es *menor que* la longitud de onda  $\lambda_0$  de la misma luz en el vacío. De acuerdo con el análisis anterior,  $f = c/\lambda_0 = v/\lambda$ . Al combinar esto con la ecuación (1),  $n = c/v$ , se encuentra que

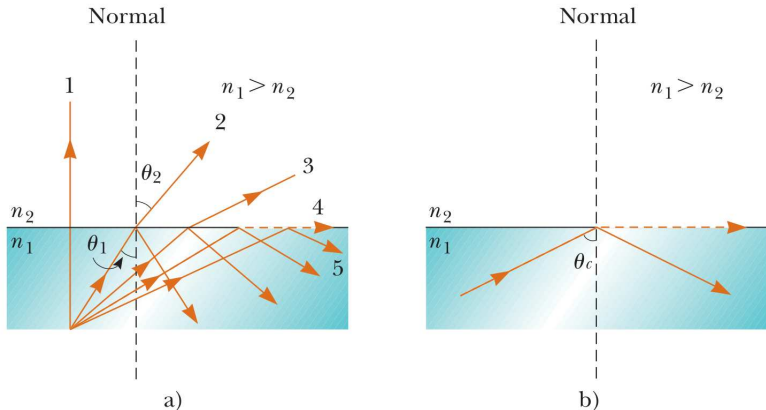
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (5)$$

- Cuando una onda pasa de un material a otro con mayor índice de refracción, de manera que  $n_b > n_a$ , la rapidez de la onda disminuye. La longitud de onda  $\lambda_b = \lambda_0/n_b$  en el segundo material es por consiguiente, más corta que la longitud de onda  $\lambda_a = \lambda_0/n_a$  del primer material.

- Si el segundo material tiene un índice de refracción menor que el primero, de manera que  $n_b < n_a$ , entonces la rapidez de la onda se incrementa. Así, la longitud de onda  $\lambda_b$  en el segundo material es más larga que la longitud de onda  $\lambda_a$  en el primero. Esto tiene sentido intuitivamente: las ondas se *comprimen* (la longitud de onda se acorta) si la rapidez de onda disminuye y se *estiran* (la longitud de onda se alarga) si la rapidez de la onda aumenta.

# Reflexión total interna de la luz

- El fenómeno denominado *Reflexión total interna* se presenta al dirigir luz desde un medio con un índice de refracción determinado hacia otro que tenga un índice de refracción menor.
- Considere la Figura 9a. en la que un rayo de luz se desplaza en el medio 1 y se encuentra la frontera entre el medio 1 y el medio 2, donde  $n_1$  es mayor que  $n_2$ .
- En la Figura los niveles 1 al 5 indican varias posibles direcciones del rayo, consistente con el modelo de una onda bajo refracción.
- Los rayos refractados están doblados alejándose de la normal porque  $n_1 > n_2$ .



**Figura 9:** a) Los rayos se desplazan de un medio de índice de refracción  $n_1$  hacia un medio de índice de refracción  $n_2$ , donde  $n_2 < n_1$ . Cuando el ángulo de incidencia  $\theta_1$  aumenta, el ángulo de refracción  $\theta_2$  aumenta hasta que  $\theta_2$  es de  $90^\circ$  (rayo 4). Para ángulos de incidencia incluso mayores, se presenta reflexión interna total (rayo 5). b) El ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción igual a  $90^\circ$  es el ángulo crítico  $\theta_c$ . Con este ángulo de incidencia se refleja toda la energía de la luz incidente.

- En algún ángulo particular de incidencia  $\theta_c$ , denominado **ángulo crítico**, el rayo de luz refractado se mueve paralelo a la frontera, de modo que  $\theta_2 = 90^\circ$  (Figura 9b.).
- Para ángulos de incidencia mayores de  $\theta_c$ , el rayo se refleja por completo en la frontera, como lo muestra el rayo 5 de la Figura 9a.
- Usando la Ley de Snell, cuando  $\theta_1 = \theta_c$ ,  $\theta_2 = 90^\circ$  tenemos

$$n_1 \text{sen} \theta_c = n_2 \text{sen} 90^\circ = n_2,$$

es decir,

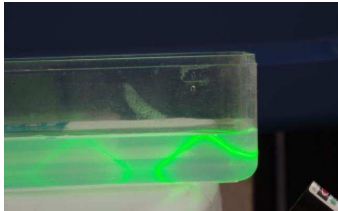
$$\boxed{\text{sen} \theta_c = \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{para } n_1 > n_2)}, \quad (6)$$

que es la ecuación de la **reflexión total interna** para  $n_1 > n_2$ .

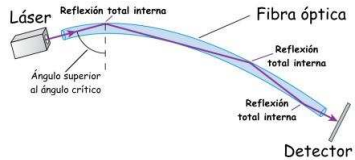


Algunas consideraciones que podemos hacer de la ecuación anterior son:

- La ecuación (6) sólo se usa cuando  $n_1 > n_2$ .
- Es decir, *la reflexión total interna se presenta sólo cuando la luz se dirige de un medio de índice de refracción conocido hacia un medio de índice de refracción menor*
- Si  $n_1$  fuera menor que  $n_2$ , la ecuación (6) daría  $\sin \theta_c > 1$ , lo que no tiene sentido pues el seno tiene valores entre  $-1 < \sin \theta < 1$ .



a)

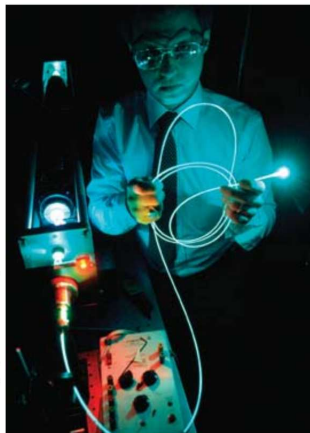


b)

**Figura 10:** a) Reflexión total interna de un láser en un tanque de agua; b) Diagrama del funcionamiento de la fibra óptica.



Dennis O'Clair/Tony Stone Images.



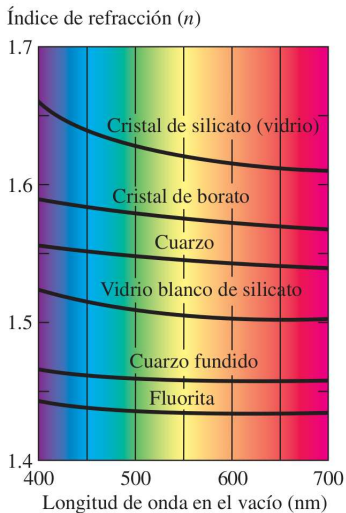
Hank Morgan/Photo Researchs, Inc.

**Figura 11:** Cables de fibra óptica (izquierda) y cables de fibra óptica iluminadas por un láser.

# Dispersión de la luz

- La luz blanca es una superposición de ondas con longitudes que se extienden a través de todo el espectro visible.
- La rapidez de la luz en el vacío es la misma para todas las longitudes de onda.
- En consecuencia, **el índice de refracción de un material depende de la longitud de la onda.**
- La **dispersión de la luz** es la dependencia de la rapidez de onda y del índice de refracción con respecto a la longitud de onda.
- La Figura 12 muestra la variación del índice de refracción  $n$  con la longitud de onda en algunos materiales ópticos comunes.

# Dispersión de la luz



**Figura 12:** Variación del índice de refracción  $n$  con la longitud de onda en distintos materiales transparentes. El eje horizontal muestra la longitud de onda  $\lambda_0$  de la luz en el vacío; la longitud de onda en el material es igual a  $\lambda = \lambda_0/n$ .

- La longitud de onda en el material está dado por la ecuación (5),  
 $\lambda = \lambda_0/n$ .
- En la mayoría de los materiales el valor de  $n$  *disminuye* al aumentar la longitud de onda y disminuir la frecuencia; por lo tanto,  $n$  *aumenta* al disminuir la longitud de onda y aumentar la frecuencia.
- En un material de este tipo, la luz de mayor longitud de onda tiene una rapidez mayor que la longitud de onda más corta.

- La Figura 13 muestra un rayo de luz blanca que incide sobre un prisma. La desviación producida por el prisma aumenta al incrementarse el índice de refracción y la frecuencia y al disminuir la longitud de onda.
- La luz violeta es la que se desvía en mayor grado, y la roja es la que se desvía menos; otros colores están en posiciones intermedias.
- Cuando sale del prisma, la luz se dispersa en un rayo con forma de abanico. Se dice que la luz se *dispersa* en un espectro.
- La cantidad de dispersión depende de la *diferencia* entre los índices de refracción para la luz violeta y la luz roja.





**Figura 13:** Dispersión de la luz a través de un prisma. La banda de luz se llama espectro.



Hidrógeno H

Espectro de absorción



Espectro de emisión



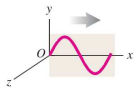
Figura 14: Dispersión de la luz: arcoiris (izquierda) y espectro de absorción y dispersión del hidrógeno (derecha).

**TAREA:** Explicar el proceso de la formación del arcoiris.

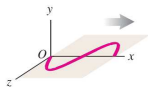
# Polarización

- La **polarización** es una característica de las ondas transversales.
- Por ejemplo, en el caso de una cuerda que esté en equilibrio a lo largo del eje  $x$ , los desplazamientos pueden ocurrir a lo largo de la dirección  $y$ , como en la Figura 15a. En este caso, la cuerda siempre queda en el plano  $xy$ .

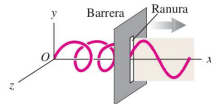
a) Onda transversal linealmente polarizada en la dirección  $y$



b) Onda transversal linealmente polarizada en la dirección  $z$



c) La ranura funciona como filtro polarizador dejando pasar solamente los componentes polarizados en la dirección  $y$ .



**Figura 15:** a) y b) Ondas polarizadas en una cuerda. c) Formación de una onda polarizada en una cuerda a partir de otra no polarizada por medio de un filtro polarizador.

- Pero los desplazamientos pueden ser a lo largo del eje  $z$  como en la Figura 15b; en tal caso, la cuerda siempre se encuentra en el plano  $xz$ .
- Cuando una onda sólo tiene desplazamientos en  $y$ , se dice que está **linealmente polarizada** en la dirección  $y$ ; una onda con desplazamientos sólo en  $z$  está *linealmente polarizada* en esa dirección.
- Para las ondas mecánicas es posible construir un **filtro polarizador** o **polarizador** simplemente, que permita que sólo pasen ondas con cierta dirección de polarización.

- En la figura 15c la cuerda puede deslizarse verticalmente en la ranura sin fricción, pero no es posible ningún movimiento horizontal. Este filtro deja pasar ondas polarizadas en la dirección  $y$ , pero bloquea las ondas polarizadas en la dirección  $z$ .

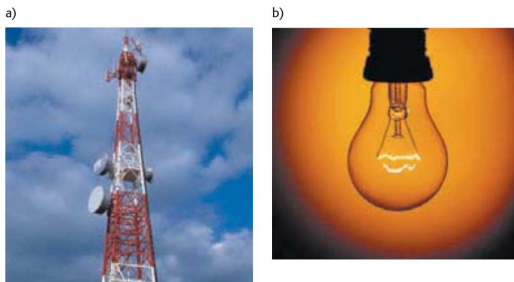
- Esto mismo se puede aplicar a las ondas electromagnéticas, las cuales también presentan polarización.
- Una onda electromagnética es *transversal*; los campos eléctrico y magnético fluctuantes son perpendiculares entre sí y con respecto a la dirección de propagación.
- Siempre se define la dirección de polarización de una onda electromagnética como la dirección del vector de campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , no del campo magnético.
- Así, se dice que una onda está descrita por la ecuación:



$$\begin{aligned}\mathbf{E}(x, t) &= \hat{\mathbf{j}} E_{max} \cos(kx - \omega t) \\ \mathbf{B}(x, t) &= \hat{\mathbf{k}} B_{max} \cos(kx - \omega t)\end{aligned}\tag{7}$$

está polarizada en la dirección  $y$  porque el campo eléctrico sólo tiene componente  $y$ .

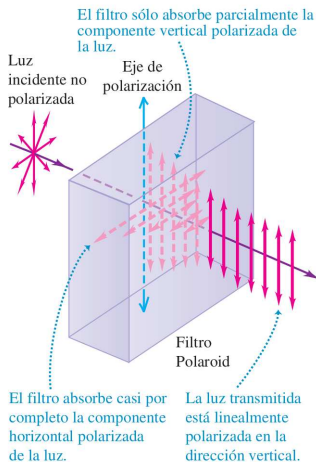
- Las ondas emitidas por un transmisor de radio, por lo general, están linealmente polarizadas.
- La situación es diferente para la luz visible. La luz de fuentes ordinarias, como los focos incandescentes y las lámparas fluorescentes, no está polarizada (Figura 16b).



**Figura 16:** a) Los electrones en la antena oscilan verticalmente y producen ondas electromagnéticas verticalmente polarizadas que se propagan desde la antena en dirección horizontal. b) No importa cómo esté orientado el foco, el movimiento aleatorio de los electrones en el filamento produce ondas luminosas no polarizadas.

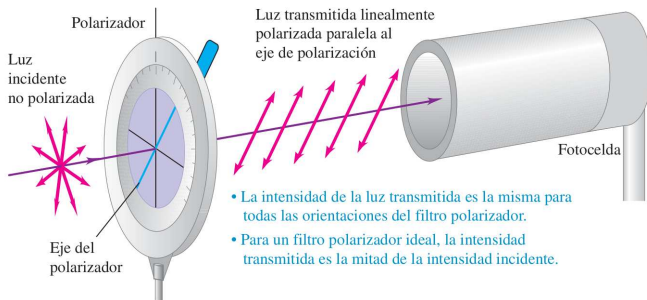
- Las “antenas” que irradian ondas luminosas son las moléculas que constituyen las fuentes.
- Las ondas emitidas por cualquier molécula pueden estar linealmente polarizadas, como las de una antena de radio.
- Pero cualquier fuente luminosa real contiene un número enorme de moléculas con orientaciones al azar, por lo que la luz emitida es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles.
- Esa luz se llama **luz no polarizada** o **luz natural**.
- Para crear luz polarizada a partir de luz no polarizada se requiere de un filtro análogo a la ranura de las ondas mecánicas de la Figura 15c.

- Los filtros polarizadores para las ondas electromagnéticas tienen diferentes detalles de construcción, dependiendo de la longitud de onda.
- El filtro polarizador más común para la luz visible es el material conocido con el nombre comercial de *Polaroid*, que se usa mucho en los lentes de sol y en los filtros polarizadores para lentes de cámaras fotográficas.
- Este material, incorpora sustancias que presentan **dicroísmo**, la absorción selectiva en la que una de las componentes polarizadas se absorbe con mucha más intensidad que la otra (Figura 17).



**Figura 17:** Un filtro Polaroid iluminado por luz natural no polarizada (ilustrado por los vectores  $\mathbf{E}$  que apuntan en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación). La luz transmitida está linealmente polarizada a lo largo del eje de polarización (ilustrado por los vectores  $\mathbf{E}$  a lo largo de la dirección de polarización solamente).

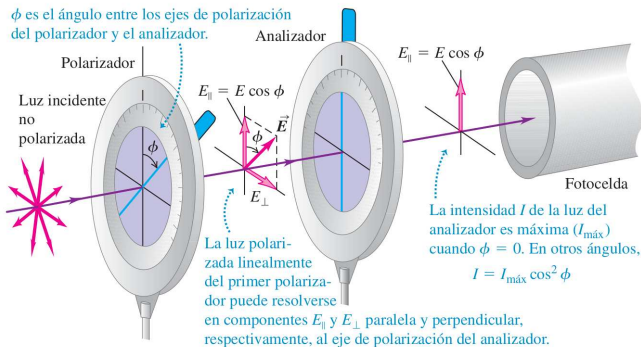
- Un filtro Polaroid transmite el 80 % o más de la intensidad de una onda que esté polarizada en forma paralela a cierto eje en el material, llamado eje de polarización, pero sólo el 1 % o menos de las ondas polarizadas perpendiculares a ese eje.



**Figura 18:** La luz no polarizada incide sobre el filtro no polarizador. La fotocelda mide la intensidad de la luz linealmente polarizada que se transmite.

- En la Figura 18 la luz no polarizada es incidente sobre un filtro polarizador plano.
- El eje de polarización está representado por la línea azul.
- Sólo se transmite la componente de  $\mathbf{E}$  paralela al eje de polarización. Así, la luz que sale del polarizador está linealmente polarizada en forma paralela al eje de polarización.
- Cuando la luz polarizada incide en un polarizador ideal como el de la Figura 18, la intensidad de la luz transmitida es *exactamente la mitad* que la de la luz incidente no polarizada, sin importar cómo se oriente el eje de polarización.

- ¿Qué pasa cuando la luz linealmente polarizada que sale de un polarizador pasa a través de un segundo polarizador, como se ilustra en la Figura 19?

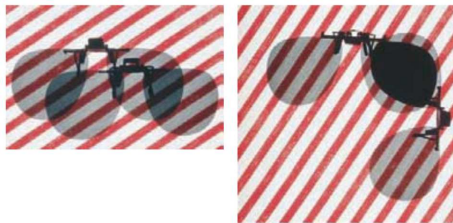


**Figura 19:** Un analizador ideal transmite sólo la componente del campo eléctrico paralela a su dirección de transmisión (es decir, su eje de polarización).



- Considere el caso general en el cual el eje de polarización del segundo polarizador, o *analizador*, forma un ángulo  $\phi$  con el eje de polarización del primer polarizador.
- Podemos resolver la luz linealmente polarizada que es transmitida por el primer polarizador en dos componentes, como se aprecia en la Figura 19, una paralela y la otra perpendicular al eje del analizador.
- Sólo la componente paralela, con amplitud  $E \cos \phi$ , es transmitida por el analizador.

- Para determinar la dirección de polarización de la luz transmitida por el primer polarizador, se hace girar el analizador hasta que la fotocelda de la Figura 19 mida una intensidad de cero; el eje de polarización del primer polarizador es, entonces, perpendicular al del analizador.
- La intensidad transmitida es máxima cuando  $\phi = 0$ , y es igual a cero cuando el polarizador y el analizador están *cruzados* de manera que  $\phi = 90^\circ$  (Figura 20).



**Figura 20:** Visión a través de lentes Polaroid cuyos ejes de polarización están alineados ( $\phi = 0^\circ$ , izquierda) y perpendiculares ( $\phi = 90^\circ$ , derecha). La intensidad transmitida es máxima cuando los ejes están alineados, y es cero cuando los ejes están perpendiculares.

- Para determinar la intensidad transmitida, recordemos que la intensidad de una onda electromagnética es proporcional al *cuadrado* de la amplitud de la onda. La razón entre la *amplitud* transmitida y la incidente es  $\cos \phi$ , por lo que la intensidad de la luz transmitida a través del analizador es

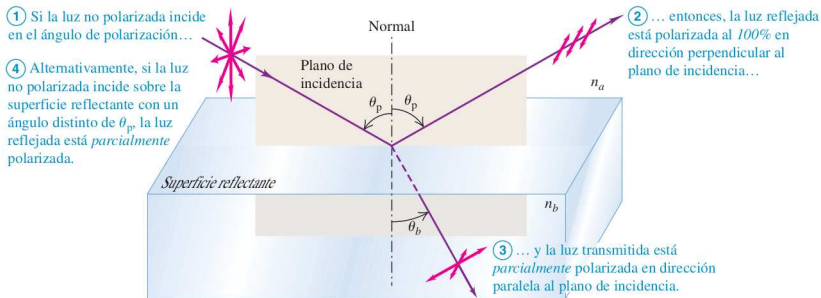
$$I = I_{max} \cos^2 \phi, \quad (8)$$

donde  $I_{max}$  es la intensidad máxima de la luz transmitida (en  $\phi = 0$ ),  $I$  es la cantidad transmitida con el ángulo  $\phi$ . Esta relación se llama **Ley de Malus** y sólo se aplica si la luz incidente que pasa a través del analizador ya está linealmente polarizada.

# Polarización por reflexión

## Polarización por reflexión

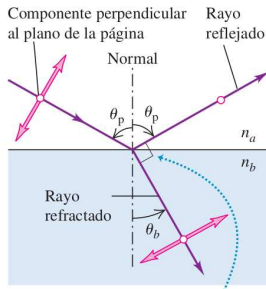
La luz no polarizada se puede polarizar por reflexión, ya sea en forma total o parcial. En la Figura 21, la luz natural no polarizada incide sobre una superficie reflectante entre dos materiales ópticos transparentes; el plano que contiene los rayos incidente y reflejado y la normal a la superficie se llama **plano de incidencia**.



**Figura 21:** Cuando la luz incide en una superficie reflectante en el ángulo de polarización, la luz reflejada está linealmente polarizada.

- Para la mayoría de los ángulos de incidencia, las ondas para las que el vector de campo eléctrico  $\mathbf{E}$  es perpendicular al plano de incidencia (es decir, es paralelo a la superficie reflectante) se reflejan con más intensidad que aquellas cuyo  $\mathbf{E}$  yace en el plano.
- En tal caso, la luz reflejada está *parcialmente polarizada* en la dirección perpendicular al plano de incidencia.
- Pero en cierto ángulo particular de incidencia, llamado el **ángulo de polarización**,  $\theta_p$ , la luz cuyo  $\mathbf{E}$  yace en el plano de incidencia *no se refleja en absoluto*, sino que se refracta por completo.
- Por consiguiente, la luz *reflejada* está completamente polarizada en forma perpendicular al plano de incidencia, como se ilustra en la Figura 21.

- En 1812 David Brewster descubrió que cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización  $\theta_p$ , el rayo reflejado y el rayo refractado son perpendiculares entre sí (Figura 33.28).



Cuando la luz incide en el ángulo de polarización con una superficie, los rayos reflejado y refractado son perpendiculares entre sí y

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a}$$

**Figura 22:** Los círculos abiertos representan una componente de  $\mathbf{E}$  que es perpendicular al plano de la figura (el plano de incidencia) y paralela a la superficie que separa a los dos materiales.

- En este caso, el ángulo de refracción  $\theta_b$  se vuelve complemento de  $\theta_p$ , por lo que  $\theta_b = 90^\circ - \theta_p$ . De acuerdo con la ley de refracción

$$n_a \sen \theta_p = n_b \sen \theta_b,$$

de donde resulta

$$n_a \sen \theta_p = n_b \sen (90^\circ - \theta_p) = n_b \cos \theta_p$$

por lo tanto

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a}. \quad (9)$$

Esta relación se conoce como la **ley de Brewster**. La polarización por reflexión es la razón por la que los filtros polarizadores se usan en lentes de sol (Figura 20).