

## **Nociones sobre Luz y Óptica**

### 12.1. Introducción

### 12.2. Ondas electromagnéticas

#### 12.2.1. La luz como onda electromagnética

#### 12.2.2. Velocidad, frecuencia y longitud de onda

#### 12.2.3. Energía transportada: vector de Poynting y presión de radiación

### 12.2. Conceptos de óptica geométrica y ondulatoria

#### 12.2.1. Óptica geométrica: reflexión, refracción, reflexión total interna, espejos y lentes

#### 12.2.2. Óptica física: dispersión, polarización, interferencia y difracción

---

# Nociones sobre Luz y Óptica

---

## 12.1. Introducción

Hasta ahora estudiamos cargas, corrientes y campos eléctricos y magnéticos que, cuando varían en el tiempo, se generan mutuamente y viajan por el espacio en forma de onda: **la onda electromagnética**. Esta unidad cierra el recorrido de la asignatura aplicando esas ideas a un caso particular y muy cercano a nuestra experiencia cotidiana: **la luz**.

Vamos a trabajar la luz desde dos miradas complementarias:

**Óptica geométrica:** estudia el comportamiento de la luz cuando se refleja o se refracta al encontrarse con objetos y superficies (espejos, lentes, prismas), tratándola como si viajara en línea recta (rayos).

**Óptica física (u ondulatoria):** estudia fenómenos como la interferencia, la difracción y la polarización, que solo se explican reconociendo la naturaleza ondulatoria de la luz.

El objetivo de esta unidad es que poder explicar, con las herramientas de la física que se han visto hasta el momento, por qué vemos en un espejo, por qué un sorbete parece "quebrado" en un vaso con agua, cómo funciona la fibra óptica, o de dónde sale un arcoíris.

## 12.2. Ondas electromagnéticas

James Clerk Maxwell demostró, con las leyes que llevan su nombre, que un campo eléctrico variable genera un campo magnético y viceversa. Estos campos se sostienen mutuamente y se propagan por el espacio —incluso en el vacío— formando una onda electromagnética (OEM).

### 12.2.1 La luz como onda electromagnética

A partir de sus ecuaciones, Maxwell calculó la velocidad a la que debía propagarse una onda electromagnética en el vacío y obtuvo un valor que coincidía, dentro del error experimental, con la velocidad de la luz ya medida en esa época (1862-1865). De ahí surgió su hipótesis, hoy confirmada: la luz es en sí misma una onda electromagnética, y lo que llamamos "luz visible" es simplemente el rango de frecuencias de ese fenómeno al que nuestros ojos son sensibles.

Esta idea unificó dos campos que hasta entonces se estudiaban por separado: la óptica y el electromagnetismo. Años más tarde, Heinrich Hertz confirmó experimentalmente la teoría de Maxwell generando y detectando ondas electromagnéticas de radio en su laboratorio, y comprobando que se comportaban igual que la luz: se reflejaban, se refractaban, y podían interferir y difractarse.

- Es una onda transversal: los campos  $\vec{E}$  (eléctrico) y  $\vec{B}$  (magnético) son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección en que viaja la onda (figura 12-1).
- En todo instante y punto se cumple  $E = c B$ , ambos campos oscilan en fase y sus amplitudes están ligadas entre sí.
- No necesita un medio material para propagarse: a diferencia del sonido, la luz viaja perfectamente en el vacío (por eso nos llega la luz del Sol y de las estrellas).

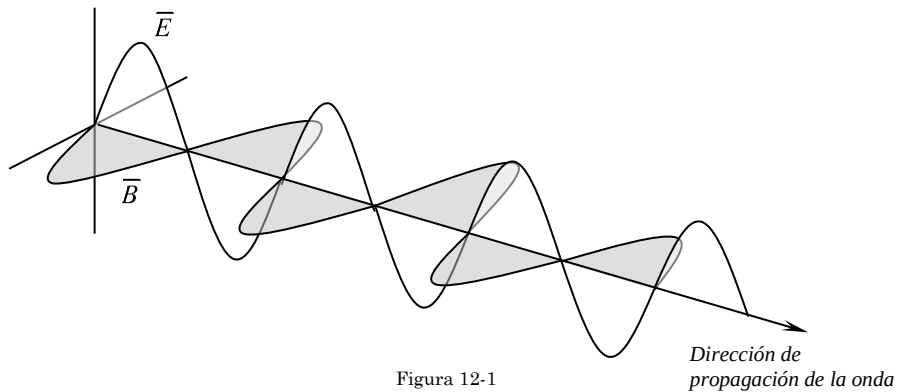


Figura 12-1

### Para pensar

*Que la radio, el wifi, la luz visible y los rayos X sean todos "lo mismo" (ondas electromagnéticas) suena raro al principio. La diferencia entre ellos es únicamente su frecuencia (o, de forma equivalente, su longitud de onda): eso es lo que determina si los vemos, si atraviesan una pared, o si nos broncean la piel.*

## 12.2.2 Velocidad, frecuencia y longitud de onda

En el vacío, toda onda electromagnética viaja a la misma velocidad  $c$ , independientemente de su frecuencia. Maxwell obtuvo esta velocidad (ecuación 12.1) a partir de dos constantes que ya conocíamos de electrostática y magnetismo: la permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) y la permeabilidad del vacío ( $\mu_0$ ).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (12-1)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A \cdot m} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Coul^2}{N \cdot m^2}}} = 3,00 \cdot 10^8 \frac{m}{seg}$$

Como toda onda periódica, la frecuencia  $f$  (cuántas oscilaciones por segundo) y la longitud de onda  $\lambda$  (la distancia entre dos crestas sucesivas) están relacionadas por la velocidad de propagación (ecuación 12-2):

$$c = \lambda f \quad (12-2)$$

Esta relación es clave para entender el espectro electromagnético: como  $c$  es siempre la misma en el vacío, una frecuencia alta implica necesariamente una longitud de onda corta, y viceversa. La luz visible ocupa una franja muy angosta de ese espectro, entre aproximadamente 400 nm (violeta) y 700 nm (rojo); por debajo está el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, y por encima el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio.

### Ejemplo cotidiano

*Cuando sintonizás una radio en, por ejemplo, 100.3 MHz, estás eligiendo la frecuencia  $f$  de la onda que querés recibir. Con  $c = \lambda f$  podés calcular que esa señal tiene una longitud de onda de aproximadamente 3 metros, muy distinta de los 500 nm de una onda de luz verde.*

Cuando la luz pasa del vacío a un medio material (aire, agua, vidrio), su frecuencia no cambia, pero sí su velocidad y, en consecuencia, su longitud de onda. Este punto es la base de todo lo que viene después: el índice de refracción, que retomamos en la sección 12.3.1.

### 12.2.3. Energía y presión de radiación

Como toda onda, la OEM transporta energía. La rapidez con la que esa energía atraviesa una superficie se describe con el vector de Poynting  $S$ , y su valor promedio es la intensidad  $I$  de la onda (ecuación 12-3):

$$I = \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{2 \mu_0} \quad (12-3)$$

Además, al transportar energía, la luz también transporta cantidad de movimiento (ecuaciones 12-4 y 12-5), cuando incide sobre un objeto ejerce una presión de radiación, muy pequeña pero medible.

$$p = \frac{I}{c} \quad (\text{si el objeto absorbe toda la luz}) \quad (12-4)$$

$$p = \frac{2I}{c} \quad (\text{si el objeto la refleja totalmente}) \quad (12-5)$$



#### Para pensar

Los paneles solares de un satélite no solo reciben energía de la luz: también reciben un pequeño empujón por la presión de radiación, que debe tenerse en cuenta al calcular su órbita a largo plazo.

## 12.3. Conceptos de óptica geométrica y ondulatoria

### 12.3.1. Óptica geométrica

En óptica geométrica representamos la luz como rayos que viajan en línea recta hasta encontrar una superficie, donde se reflejan, se refractan, o ambas cosas a la vez (figura 12-2).

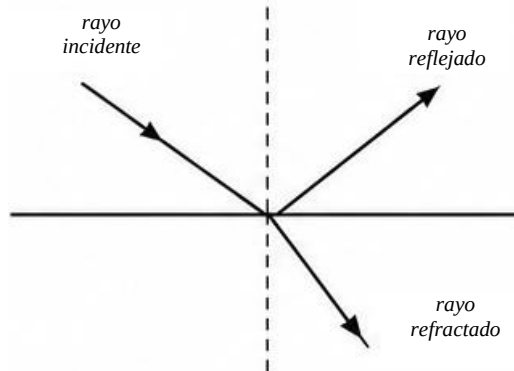


Figura 12-2

#### 12.3.1.1. Reflexión

Cuando un rayo incide sobre una superficie lisa (como un espejo), rebota siguiendo una regla muy simple: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (ecuación 12-6 y figura 12-3). Ambos ángulos se miden respecto de la normal, la línea imaginaria perpendicular a la superficie en el punto de incidencia.

$$\theta_{\text{incidencia}} = \theta_{\text{reflexión}} \quad (12-6)$$

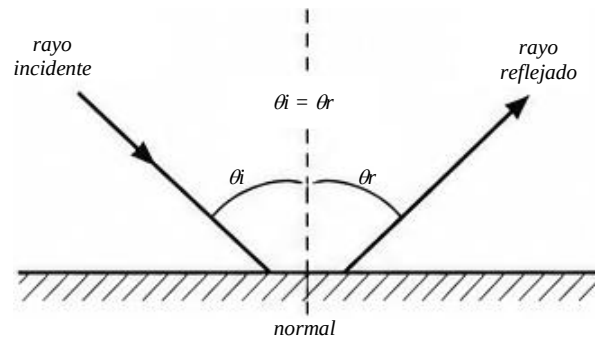


Figura 12-3

### Ejemplo cotidiano

*Cuando te mirás en el espejo del baño, la luz que sale de tu cara llega al espejo y vuelve a tus ojos respetando exactamente esta ley.*

#### 12.3.1.2. Refracción — Ley de Snell

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro (por ejemplo, del aire al agua), cambia de velocidad y, como consecuencia, cambia de dirección (figura 12-4). A esto lo llamamos refracción.

Cada medio se caracteriza por su índice de refracción  $n$  (ecuación 12-7), definido como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en ese medio:

$$n = \frac{c}{v} \quad (12-7)$$

La relación entre los ángulos de incidencia y refracción en dos medios está dada por la Ley de Snell (ecuación 12-8):

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (12-8)$$

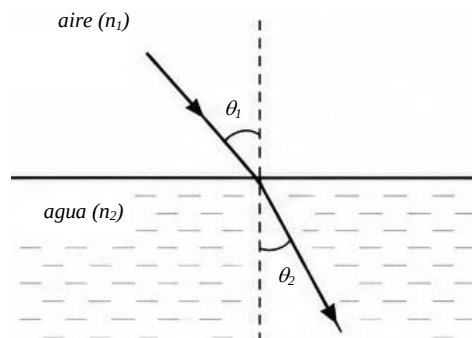


Figura 12-4

### Ejemplo cotidiano

*Un sorbete metido en un vaso con agua parece "quebrado" o desplazado justo en la superficie del agua. Es la refracción: la luz cambia de dirección al pasar de un medio a otro.*

#### 12.3.1.3. Reflexión total interna

Es un caso especial de refracción. Ocurre cuando la luz viaja dentro de un medio más "denso ópticamente" ( $n$  alto) e intenta pasar a uno menos denso ( $n$  bajo), por ejemplo del agua o el vidrio al aire.

Si el ángulo de incidencia supera un valor llamado ángulo crítico  $\theta_c$  (12-9), la luz ya no logra salir: se refleja por completo hacia adentro del medio (figura 12-5).

$$\text{sen}(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{con } n_1 > n_2) \quad (12-9)$$

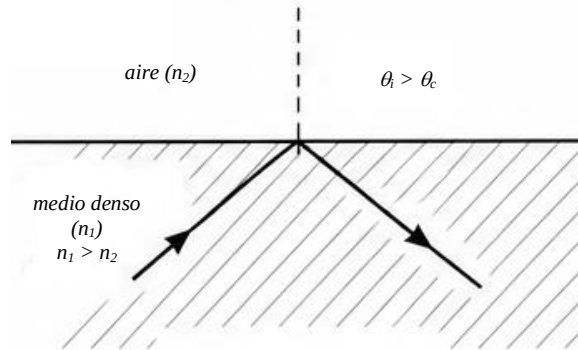


Figura 12-5

#### Aplicación tecnológica

*Es el principio de funcionamiento de la fibra óptica: la luz queda "atrapada" rebotando dentro del cable de vidrio, sin escapar, y así puede transmitir información (internet, telefonía) a grandes distancias.*

#### 12.3.1.4. Espejos

- **Espejos planos:** forman imágenes virtuales (detrás del espejo), derechas y del mismo tamaño que el objeto (figura 12-6 a).
- **Espejos esféricos cóncavos:** como el interior de una cuchara; pueden formar imágenes reales o virtuales según la distancia del objeto (figura 12-6 b).
- **Espejos esféricos convexos:** como los espejos de seguridad de un estacionamiento; siempre forman imágenes virtuales, derechas y más pequeñas, con mayor campo de visión (figura 12-6 c).

Todos los espejos (y también las lentes, como veremos) cumplen la misma ecuación 12-10, que vincula la distancia del objeto ( $s$ ), la distancia de la imagen ( $s'$ ) y la distancia focal ( $f$ ):

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (12-10)$$

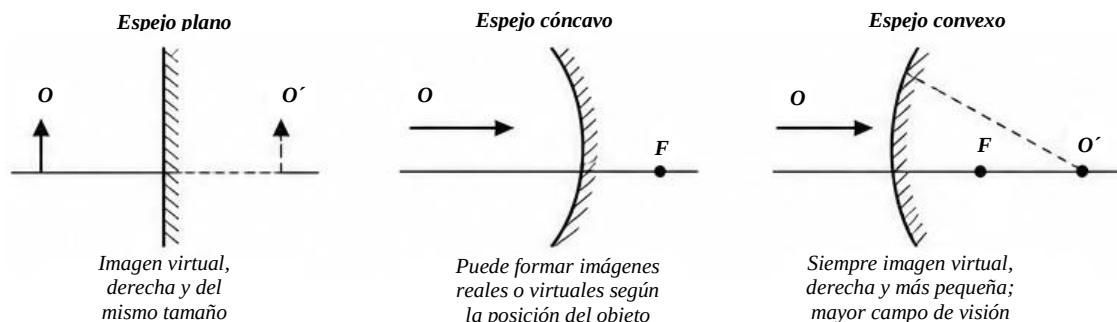


Figura 12-6

### 12.3.1.5. Lentes delgadas

- **Lentes convergentes:** más gruesas en el centro; concentran los rayos de luz en un punto (foco). Se usan en lupas y para corregir la hipermetropía (figura 12-7 a).
- **Lentes divergentes:** más delgadas en el centro; separan los rayos de luz. Se usan en anteojos para corregir la miopía (figura 12-7 b).

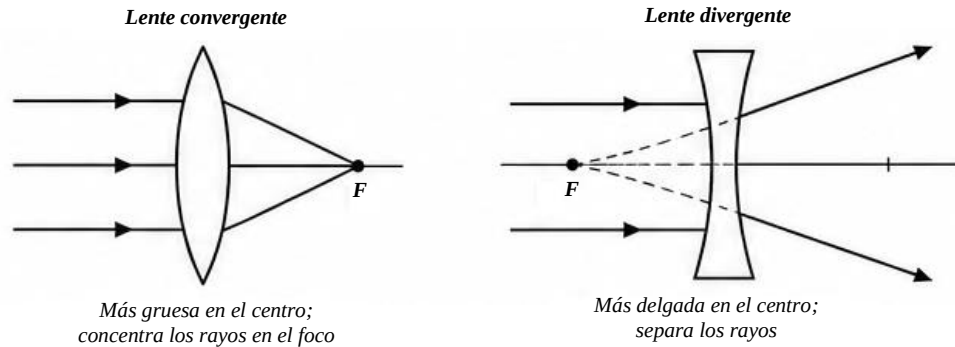


Figura 12-7

#### Ejemplo biológico

*Tu propio ojo funciona como un sistema óptico: el cristalino es una lente convergente natural que proyecta las imágenes sobre la retina, igual que lo hace el lente de una cámara sobre su sensor.*

### 12.3.2. Óptica física (ondulatoria)

Algunos fenómenos de la luz no se pueden explicar pensándola solo como rayos rectos: hace falta recordar que es una onda. Esa es la mirada de la óptica física.

#### 12.3.2.1. Dispersión

La velocidad de la luz dentro de un medio material depende levemente de su frecuencia (de su color). Como consecuencia, el índice de refracción  $n$  también depende de la frecuencia: cada color se refracta con un ángulo levemente distinto (figura 12-8).

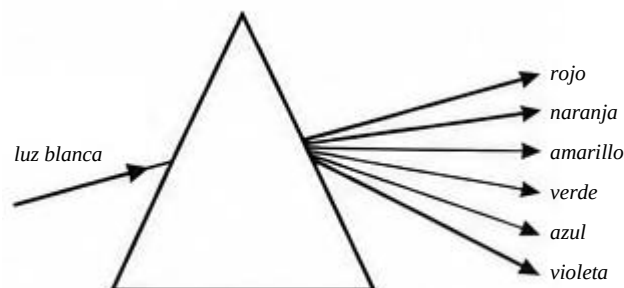


Figura 12-8

#### Ejemplo cotidiano

*Al atravesar un prisma, la luz blanca se separa en los colores del arcoíris porque cada color se desvía un poco distinto. El mismo fenómeno ocurre con las gotas de agua en el cielo durante una lluvia con sol, formando el arcoíris.*

### 12.3.2.2. Polarización

Como la luz es una onda transversal, el campo eléctrico puede oscilar en cualquier dirección perpendicular al avance de la onda. Si logramos que oscile solo en una dirección, decimos que la luz está polarizada linealmente (figura 12-9).

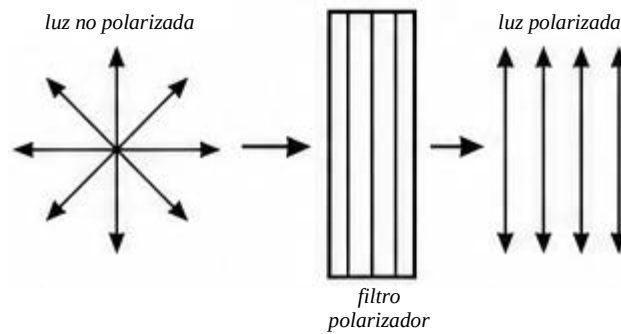


Figura 12-9

#### Aplicación cotidiana

*Los anteojos de sol polarizados dejan pasar la luz que oscila en una sola dirección y bloquean el resto, reduciendo el encandilamiento que produce, por ejemplo, la luz reflejada en el agua o el asfalto.*

### 12.3.2.3. Interferencia

Cuando dos o más ondas de luz se superponen en un mismo punto del espacio, sus campos eléctricos se suman. Según cómo coincidan las crestas y los valles de cada onda, el resultado puede reforzarse (interferencia constructiva) o cancelarse (interferencia destructiva) (figura 12-10).

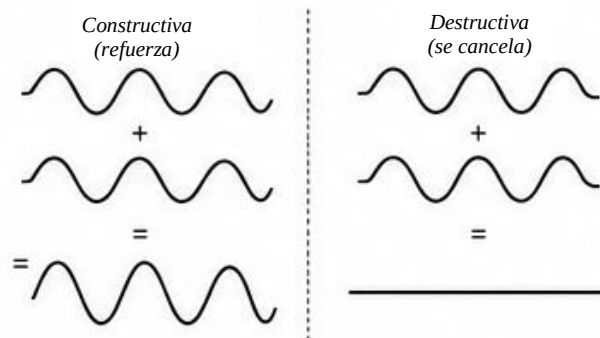


Figura 12-10

#### Ejemplo cotidiano

*Los colores cambiantes que se ven en una pompa de jabón o en una mancha de aceite sobre el agua son un efecto de interferencia entre la luz reflejada en la cara superior e inferior de una película muy delgada.*



#### 12.3.2.4. Difracción

Es la capacidad de una onda de "doblar" al pasar por un obstáculo o una abertura pequeña, en lugar de seguir en línea recta. Es un comportamiento puramente ondulatorio: cuanto más chica es la abertura en relación con la longitud de onda, más notorio es el efecto (figura 12-11).

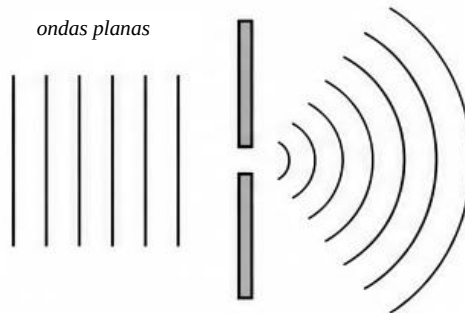


Figura 12-11

#### Para pensar

*La difracción limita la nitidez con la que un telescopio o un microscopio pueden distinguir dos puntos muy cercanos entre sí: es lo que se conoce como poder de resolución de un instrumento óptico.*