

## TEMA 6: LA LUZ Y LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

- 6.1 Introducción histórica: modelos corpuscular y ondulatorio.
- 6.2 Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.
- 6.3 Reflexión, refracción. Índice de refracción. Ley de Snell.
- 6.4 Dispersión de la luz.
- 6.5 Óptica geométrica. Formación de imágenes en lentes y espejos.

### 6.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS IDEAS ACERCA DE LA NATURALEZA DE LA LUZ

A lo largo de la Historia las ideas sobre la naturaleza de la luz y de las distintas radiaciones ha ido cambiando. En la antigüedad (Grecia), apenas se describen los fenómenos, dando explicaciones a veces místicas, nada científicas. Los árabes (Al-Hazen, sobre el s. XI), describen los fenómenos de reflexión y refracción, pero poco más.

En la primera mitad del s. XVII se describen las leyes experimentales (refracción, por **Snell**, en 1621). **Descartes** publica su *Dióptrica* en 1637.

Hay que esperar hasta finales del S. XVII para encontrar teorías científicas sobre la naturaleza de la luz. **Huygens**, en 1690, y **Newton**, en 1704, exponen teorías contrapuestas:

◆ **Huygens: Teoría ondulatoria:** La luz se propaga como una onda mecánica longitudinal.

- Necesita un medio ideal, el éter.
- Propagación rectilínea debido a que la frecuencia de la luz es muy alta.
- Los colores se deben a diferentes frecuencias.
- La luz debe experimentar fenómenos de interferencia y difracción, característicos de las ondas.
- Su velocidad será menor en medios más densos.

Inconvenientes:- Al ser una onda mecánica, necesita de un medio material para poder propagarse por el espacio entre el Sol y la Tierra . Este medio teórico, ideal, que nadie había observado, se le llamó *éter*, debía tener extrañas propiedades: mucho más rígido que el vidrio y, sin embargo, no oponer ninguna resistencia al movimiento de los planetas.  
- Hasta esa fecha no se habían observado interferencias o difracción en la luz.

◆ **Newton: Teoría corpuscular:** La luz está formada por partículas materiales

- Partículas de masa pequeña y velocidad muy grande.
- Propagación rectilínea debido a la gran velocidad de las partículas.
- Los colores se deben a partículas de distinta masa.
- No debe producir interferencia ni difracción.
- Su velocidad será mayor en medios más densos.

Inconvenientes: No deja clara la refracción.  
No explica cómo pueden cruzarse rayos de luz sin que choquen las partículas.

Por razones de prestigio científico, prevaleció la teoría de Newton, dejando olvidada la de Huygens. Hasta que **Young**, en 1801, observó interferencias en la luz; **Fresnel**, en 1815, observa la difracción (y demuestra que las ondas son transversales); y **Foucault**, en 1855, comprobó que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire. Se rescató entonces la teoría ondulatoria como válida.

## 6.2 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

En 1865, el físico escocés James C. **Maxwell** publica su Teoría Electromagnética, en la que unificaba la electricidad y el magnetismo. Como una consecuencia de dicha teoría, llegó a la conclusión de que los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  podían propagarse como ondas en el espacio. Predijo así la existencia de ondas electromagnéticas.

La velocidad de dichas ondas, dada por la expresión  $v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}}$ , daba como resultado un valor que coincidía con el medido por Foucault para la luz.

Hertz, en 1887, comprobó experimentalmente la predicción de Maxwell, generando o.e.m. usando el fenómeno de inducción electromagnética.

Emplea un generador de chispas. Consigue que, a cierta distancia, salte una chispa en un circuito receptor.

La chispa de alta frecuencia originada es, básicamente, una corriente variable. Esta corriente crea un campo magnético variable en las inmediaciones de la chispa. Por inducción, se crea un campo eléctrico variable que vuelve a generar un campo magnético variable... y así sucesivamente. La energía que se suministra a las cargas en el receptor se ha transmitido a una cierta distancia. Tenemos, en resumen, una perturbación que se propaga por el espacio como una onda.

Posteriormente, Hertz comprueba que las o.e.m. obedecen las leyes de reflexión y refracción, del mismo modo que la luz. Se llega a la conclusión de que **la luz es una onda electromagnética**.

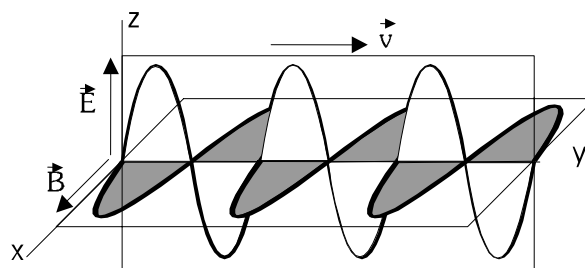
### Características de las ondas electromagnéticas (o.e.m):

- Ondas armónicas.
- Transversales.
- No necesitan un medio material para propagarse.
- Perturbaciones: Campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  variables

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \text{sen}(\omega t \pm kx)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cdot \text{sen}(\omega t \pm kx)$$

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$$



- Las o.e.m. no están polarizadas, normalmente. Pueden polarizarse tanto lineal como circularmente.

- Velocidad de propagación:  $v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}}$

En el vacío  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

En cualquier otro medio  $v < c$

Depende de las características eléctricas y magnéticas del medio

### Índice de refracción de un medio ( n ):

Se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, c, y la velocidad en el medio considerado,  $n = \frac{c}{v}$ . Siempre  $n \geq 1$

Algunos n:	
Vacío	1
Aire	~ 1
Agua:	1,33
Etanol:	1,362
Cuarzo:	1,544
Vidrio:	1,5 - 2
Diamante:	2,42

**ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO:**

Las ondas electromagnéticas se clasifican según su frecuencia  $\nu$  (o su longitud de onda  $\lambda$ ).

Esta clasificación es totalmente subjetiva. La división entre un tipo de o.e.m. y otro es artificial, basada en los efectos que se aprecian o los posibles usos que tienen para el ser humano.

En la siguiente tabla están clasificados los distintos tipos en orden creciente de frecuencias (orden decreciente de  $\lambda$ ). Hay que tener en cuenta que  $\nu$  y  $\lambda$  son inversamente proporcionales  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ .

$\nu$ (Hz)	Radiación	$\lambda$ (m)
$10^{22}$	Rayos $\gamma$	$10^{-14}$
$10^{21}$		$10^{-13}$
$10^{20}$		$10^{-12}$
$10^{19}$	Rayos X	$10^{-11}$
$10^{18}$		$10^{-10}$
$10^{17}$	Rayos UVA, UVB	$10^{-9}$
$10^{16}$		$10^{-8}$
$10^{15}$		$10^{-7}$
$10^{14}$	Luz visible	$10^{-6}$
$10^{13}$	Infrarrojo	$10^{-5}$
$10^{12}$		$10^{-4}$
$10^{11}$	microondas	$10^{-3}$
$10^{10}$	Telecomunicaciones, microondas	$10^{-2}$
$10^9$		$10^{-1}$
$10^8$	Radio FM, Televisión, Telefonía	1
$10^7$		$10^1$
$10^6$	Ondas de radio AM	$10^2$
$10^5$		$10^3$
$10^4$	Ondas de radio largas	$10^4$
$10^3$		$10^5$
$< 10^3$	Ruido eléctrico	$> 10^5$

**ESPECTRO VISIBLE**

$\nu$ (Hz)	Color	$\lambda$ (m)
$7,7 - 6,6 \cdot 10^{14}$	Violeta	$3,9 - 4,6 \cdot 10^{-7}$
$6,6 - 6,1 \cdot 10^{14}$	Azul	$4,6 - 4,9 \cdot 10^{-7}$
$6,1 - 5,2 \cdot 10^{14}$	Verde	$4,9 - 5,8 \cdot 10^{-7}$
$5,2 - 5,0 \cdot 10^{14}$	Amarillo	$5,8 - 6,0 \cdot 10^{-7}$
$5,0 - 4,8 \cdot 10^{14}$	Anaranjado	$6,0 - 6,2 \cdot 10^{-7}$
$4,8 - 3,8 \cdot 10^{14}$	Rojo	$6,2 - 7,8 \cdot 10^{-7}$

Fuente: M.Alonso , E.J. Finn. *Física*. Edit. Pearson, 2000

**Radioondas.** Son ondas electromagnéticas producidas por circuitos eléctricos. Su longitud de onda está comprendida entre 10 km y 10 cm. Se emplean en radiodifusión y telecomunicaciones.

**Microondas.** Son producidas por vibraciones de moléculas. Su longitud de onda está comprendida entre 10 cm y  $10^{-4}$  m. Se emplean en radioastronomía, comunicaciones (radar, maser).

**Rayos infrarrojos.** Son producidas en los cuerpos calientes y son debidas a oscilaciones de átomos. Su longitud de onda oscila entre  $10^{-4}$  m y 7500 A ( $1 \text{ A} = 10^{-10} \text{ m}$ ). Se emplean en la industria y en medicina (termoterapia).

**Luz visible.** Son producidas por oscilaciones de los electrones más externos del átomo. Su longitud de onda va de 7500 A a 4000 A. Son percibidas por nuestra retina. Se emplean en la visión, láser, etc.

**Rayos ultravioleta.** Son producidas por oscilaciones de los electrones más internos. Su longitud de onda está comprendida entre 4000 A y 30 A. Se emplean en medicina, por su poder ionizante. Son los responsables de las quemaduras por el sol y de la aparición de los cánceres de piel. El Sol es un poderoso emisor de rayos ultravioleta.

**Rayos X.** Son producidos por oscilaciones de los electrones próximos al núcleo. Su longitud de onda es del orden de 30 A - 0,4 A. Se utilizan en la industria, en medicina (radiografías y radioterapia). Son peligrosos para los tejidos debido a su poder energético.

**Rayos gamma ( $\gamma$ ).** Son producidos por oscilaciones nucleares, en los fenómenos radiactivos y en reacciones nucleares. Tienen una longitud de onda del orden de  $10^{-5}$  A. Tienen un gran poder de penetración, lo que hace que sean nocivos para los seres vivos.

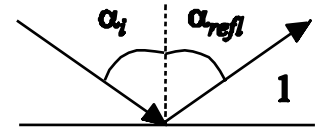
### 6.3 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ: ÍNDICE DE REFRACCIÓN:

Recordamos brevemente las características de estos dos fenómenos, ya vistas en el tema de ondas.

**REFLEXIÓN:** Al llegar la onda incidente a la frontera con el medio 2, los puntos de la frontera generan una nueva onda que se propaga por el medio 1.

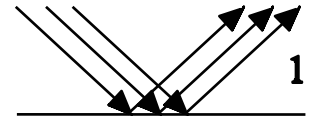
La onda reflejada tiene igual  $v$ ,  $\lambda$ , y velocidad de propagación que la onda incidente.

El ángulo que forma la dirección con la normal a la frontera es igual al de la onda incidente.



**Reflexión nítida y difusa:**

Reflexión Nítida: Se da cuando la superficie es totalmente plana (pulimentada). Entonces, rayos que lleguen paralelos producirán ondas reflejadas también paralelas. (Ejemplo: espejo)

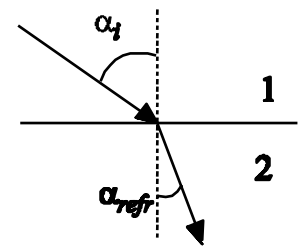


Reflexión Difusa: Se da cuando la superficie es rugosa. Los rayos que llegan paralelos salen reflejados en todas direcciones. (ejemplo: superficie blanca). Esta reflexión difusa es la que hace que podamos ver a los cuerpos desde cualquier lado.



**REFRACCIÓN:** Al llegar la onda incidente, los puntos de la frontera producen, además de la onda reflejada, otra onda que se propaga por el medio 2 (onda refractada o transmitida).

La onda refractada tiene igual frecuencia que la onda incidente (igual color), pero se propaga a distinta velocidad. Para el caso de la luz, la velocidad en el vacío (o en el aire) es la mayor posible ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s). En cualquier otro medio será menor. Por lo tanto la  $\lambda$  será mayor.



$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

**Índice de refracción de un medio (n):** Se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y en dicho medio.

$$n = \frac{c}{v} \quad n \geq 1$$

**Ángulo de refracción: Ley de Snell:** Los ángulos de la onda incidente y refractada están relacionados por la ley de Snell

$$n_1 \cdot \text{sen } \alpha_i = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_{refr} \quad \Rightarrow \quad \frac{\text{sen } \alpha_i}{\text{sen } \alpha_{refr}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Consecuencias:

- Si  $\alpha_i = 0$  incidencia perpendicular  $\alpha_{refr} = 0$
- Si  $n_2 > n_1 \rightarrow \alpha_{refr} < \alpha_i$  y viceversa. Esto ocurre, por ejemplo, al pasar del aire a otro medio.

- Al aumentar  $\alpha_i$ ,  $\alpha_{refr}$  aumenta también. Si  $n_1 > n_2$ , llegará un momento en que  $\alpha_{refr}$  se haga  $90^\circ$ . Entonces el rayo no pasa al medio 2. No tenemos refracción, sino sólo reflexión. A esto se le conoce como **reflexión total**. El ángulo de incidencia para el que ocurre esto se le denomina **ángulo límite**  $\alpha_{iL}$  (o  $\alpha_L$ ).

$$\frac{\text{sen } \alpha_L}{\text{sen } 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad \text{sen } \alpha_L = \frac{n_2}{n_1}$$

Ejemplos de reflexión total: Pez en el agua, fibra óptica.

### 6.4 DISPERSIÓN DE LA LUZ:

Hemos tenido en cuenta hasta ahora que la velocidad de propagación de una onda (de la luz en este caso) dependía exclusivamente del medio, no de la frecuencia. Esto es algo que no ocurre en los llamados medios dispersivos. Así, en un medio como el vidrio, o la atmósfera, o el agua, la  $v$  depende de la frecuencia. Esto trae como consecuencia que:

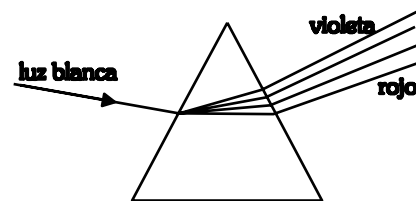
- Los diferentes colores (diferente  $\nu$ ) se propagan a velocidad diferente.
- La longitud de onda cambia.
- Cada color tiene su propio índice de refracción ( $n$ ), por lo que los ángulos de refracción serán diferentes.

Es decir, los rayos de luz de distintos colores se separan (se dispersan) al pasar por el vidrio, o por el agua.

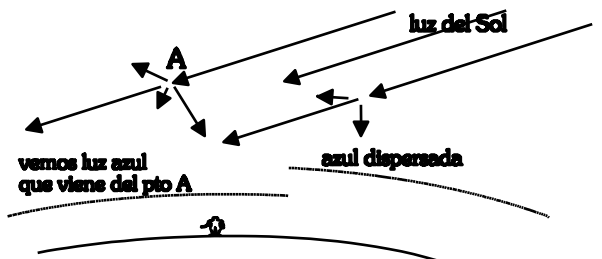
La luz roja ( $> \lambda$ ) es la que menos se desvía. La luz azul-violeta la que más.

#### Fenómenos relacionados con la dispersión:

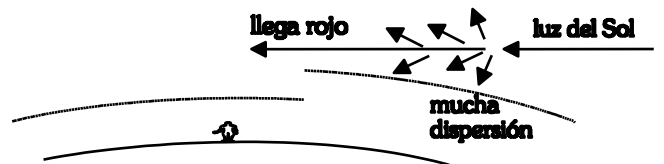
##### Descomposición de la luz en un prisma:



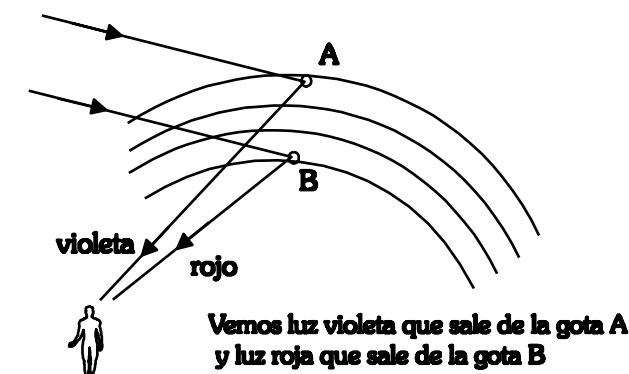
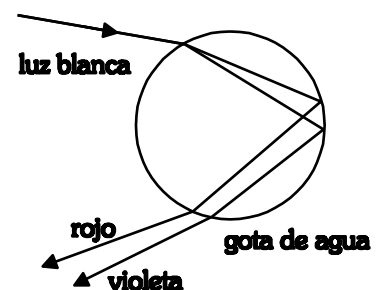
¿Por qué el cielo es azul? La luz azul es la que sufre más dispersión al entrar en la atmósfera. Si no se dispersara nada, veríamos el cielo negro incluso de día. Pero, debido a la dispersión, cuando miramos a un punto del cielo, vemos la luz que nos llega de él; y nos llega luz azul, que es la que más se dispersa.



¿Por qué el Sol se ve rojizo al amanecer y al atardecer? Al amanecer y al atardecer, la cantidad de atmósfera que deben atravesar los rayos de luz es mayor. Se produce entonces una mayor dispersión. Se dispersan todos los colores menos el rojo, que es el que vemos.



El arco iris: se produce mientras llueve o justo después de una lluvia, cuando hay gran cantidad de minúsculas gotas de agua suspendidas en la atmósfera. Cada gota de agua hace de prisma cuando incide la luz blanca del sol sobre ella, dispersándola y separando los rayos de diferentes colores.



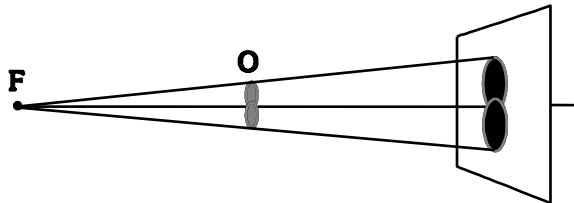
### 6.5 ÓPTICA GEOMÉTRICA. FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ESPEJOS Y LENTES.

El principio fundamental que tendremos en cuenta en este estudio: La luz se propaga en línea recta mientras el n del medio permanezca constante.

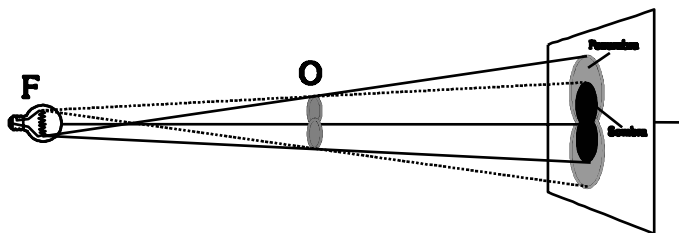
- Los rayos de luz se desviarán
- Al cambiar de medio.
  - Si tenemos un medio con n variable (la atmósfera un día de temperatura alta, dando lugar a los espejismos)

#### FORMACIÓN DE SOMBRAS Y PENUMBRAS:

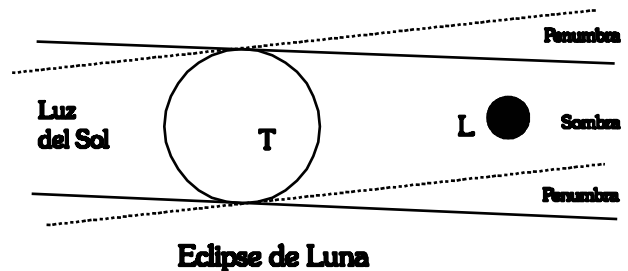
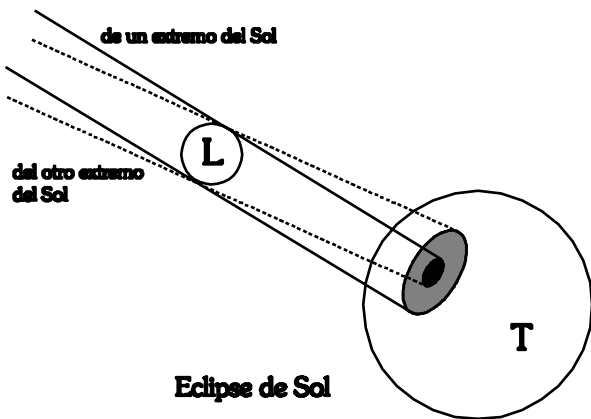
Para un foco puntual: los rayos provienen de un solo punto. Tenemos únicamente sombra.



Para un foco extenso (el filamento de una bombilla, por ejemplo): Los rayos surgen de diferentes puntos. Consideramos los puntos extremos del filamento. Así limitamos la zona de sombra (nada de luz) y la zona de penumbra (algo de luz).



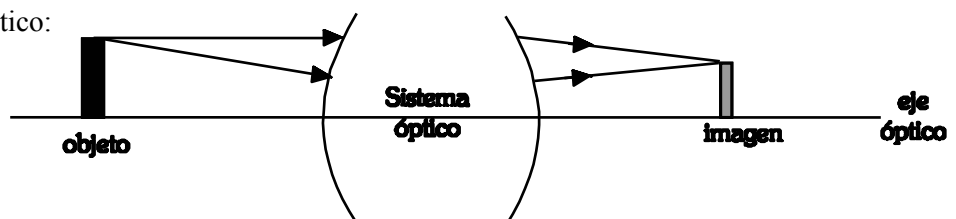
#### Ejemplo: eclipses de Sol y Luna



#### SISTEMAS ÓPTICOS:

Conjunto de medios materiales que atraviesan rayos luminosos. Estudiaremos las lentes y los espejos.

Partes del sistema óptico:



**Características de la imagen obtenida:**

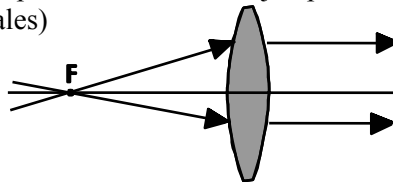
- Puede ser:
- Real: Los rayos convergen en un punto tras pasar por el sistema óptico. Si colocamos una pantalla o una película fotográfica en ese punto, veremos la imagen.
  - Virtual: los rayos divergen (se separan) del sistema óptico. No convergen en ningún punto, sino que "parece que provienen de un punto imaginario". Eso es la imagen virtual. No se puede plasmar esta imagen en una pantalla o película de fotos. Hace falta una sistema que haga converger esos rayos (ojo o cámara de fotos)

- Puede estar:
- Derecha: Si se ve igual que el objeto
  - Invertida: Si se ve al revés.

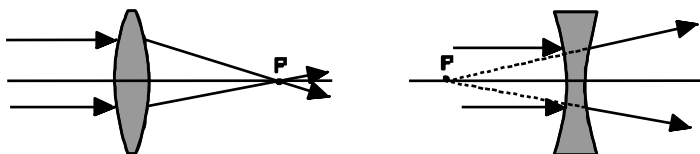
El tamaño de la imagen no tiene por qué ser igual que el del objeto, y su posición puede variar mucho.

**Puntos focales o focos (F y F'):**

Foco objeto ( F ): Es un punto situado en el eje óptico. Los rayos que pasan por él , salen paralelos al eje óptico (horizontales)

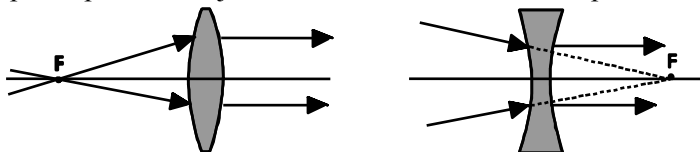


Foco imagen ( F' ): También está situado en el eje óptico. Los rayos que lleguen horizontales, al salir del sistema pasarán por este punto, o divergerán de él.

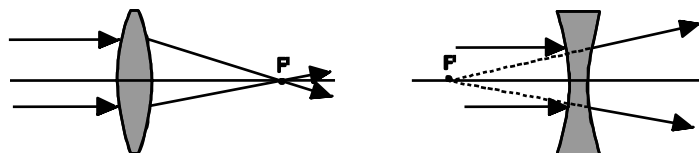


**Reglas a usar en la formación de imágenes:**

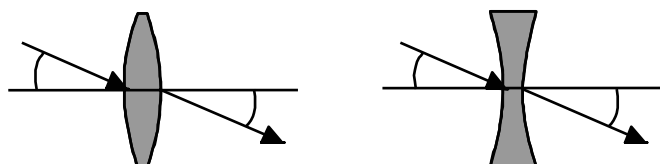
- Rayos que pasen por foco objeto F → salen paralelos al eje óptico



- Rayos que llegan paralelos al eje óptico → convergen o divergen del foco imagen F'



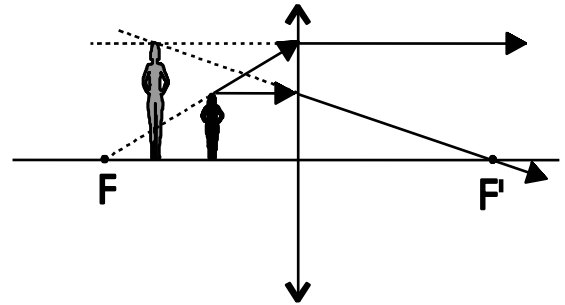
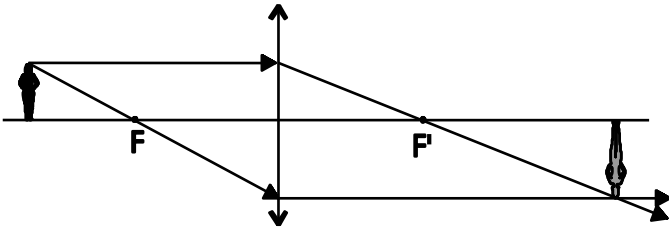
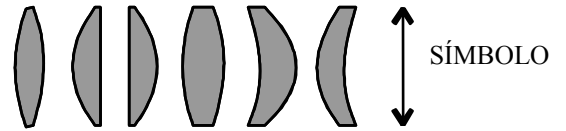
- Un rayo que llegue al centro del sistema óptico → sale con el mismo ángulo con el que llegó.



**LENTE:**

**Lentes convergentes:**

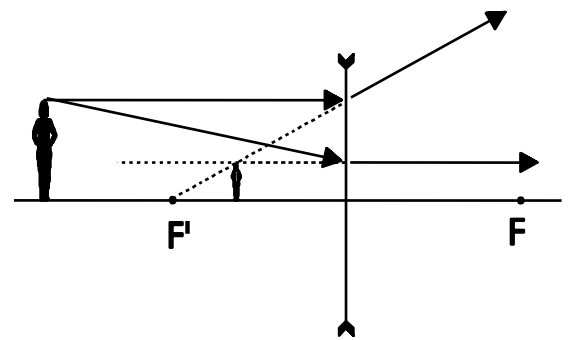
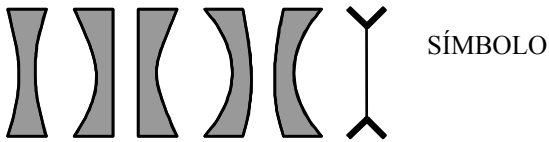
(En general, lentes convexas: plano-convexas, biconvexas...)  
Concentran los rayos



**Lentes divergentes:**

(En general, lentes cóncavas: plano-cóncavas, bicóncavas...)

Al separar los rayos, produce siempre imagen virtual.

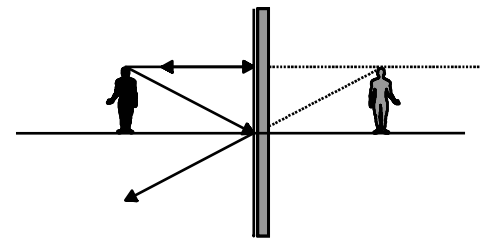


**ESPEJOS (o catoptrios):**

Los focos F y F' coinciden. Sólo existe reflexión.

**Espejo plano:**

Los focos están en el infinito  
Imagen virtual de igual tamaño, derecha



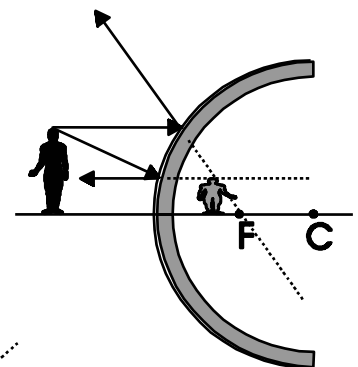
**Espejos esféricos:**

El foco está en el punto medio entre el espejo y su centro.

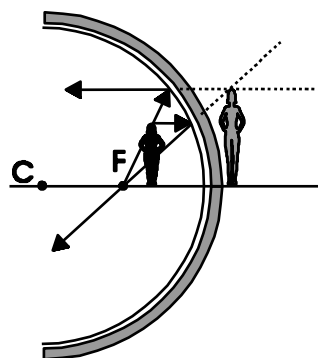
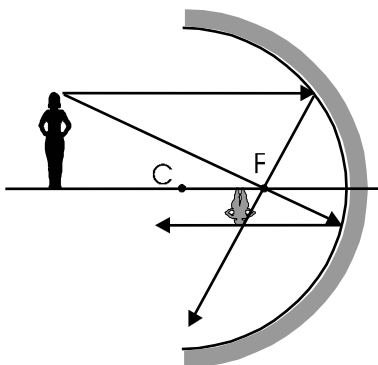
$$f = \frac{R}{2}$$

Espejo convexo

Ejemplo: espejo retrovisor del coche



Espejo cóncavo





**POSICIÓN Y TAMAÑO DE LAS IMÁGENES. ECUACIONES DE ESPEJOS Y LENTES:**

Podemos calcular la posición y tamaño de la imagen, y saber si está derecha o invertida, conociendo la posición y tamaño del objeto, y la distancia focal de la lente o espejo. Usaremos para ello las *ecuaciones de Newton*:

Posición:  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$                       Tamaño  $\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$

f : Distancia focal. Para espejos y lentes convergentes:  $f > 0$ .      Para lentes divergentes :  $f < 0$

s : Posición del objeto. Distancia hasta la lente o espejo. Consideramos siempre  $s > 0$  (siempre a la izda)

s' : Posición de la imagen. Distancia hasta la lente o espejo. El criterio de signos varía para lentes o espejos.

Lentes:  $s' > 0$  : imagen a la derecha de la lente                       $s' < 0$  : imagen a la izquierda de la lente

Espejos:  $s' > 0$  : imagen a la izquierda de la lente                       $s' < 0$  : imagen a la derecha de la lente

Siempre que  $s' > 0$  : imagen real     $s' < 0$  : imagen virtual

y : tamaño del objeto    y' : tamaño de la imagen.

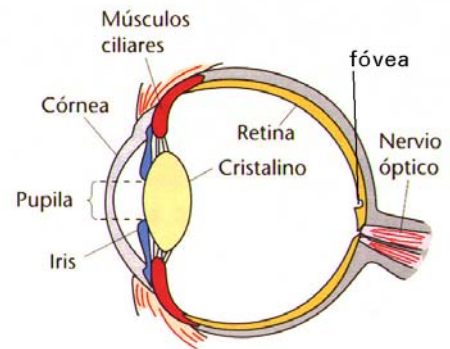
Si el signo de y' y el de y coinciden: imagen derecha.

Si tienen distinto signo: imagen invertida.

**EL OJO. DEFECTOS DE LA VISIÓN.**

El ojo funciona como un sistema compuesto de dos lentes convergentes (la córnea y el cristalino) y varios medios líquidos (el humor acuoso y el humor vítreo), que hacen converger los rayos de luz que entran por la pupila en una zona de la retina conocida como *fóvea* o *mancha amarilla*. Allí, una serie de células especializadas (bastones, que captan el clarooscuro, y conos, que captan el color) envían la información al cerebro a través del nervio óptico.

El ojo consigue enfocar la imagen cambiando la forma del cristalino (abombándolo o estirándolo), modificando de este modo su distancia focal.



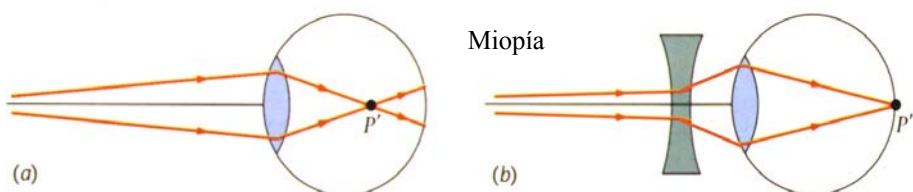
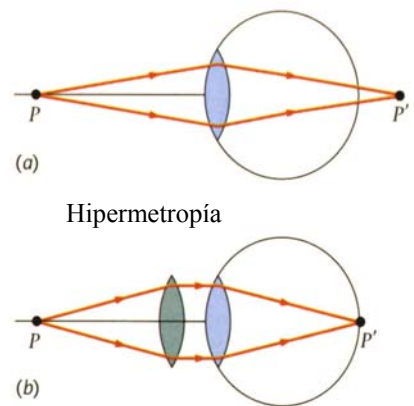
**Defectos de la visión:**

Un ojo normal (ojo emétrepe) consigue enfocar correctamente (hacer converger los rayos de luz para formar la imagen sobre la retina). Si por un defecto de la anatomía del ojo, éste enfoca los rayos de luz detrás o delante de la retina, la visión se vuelve borrosa.

Si enfoca detrás de la retina, se habla de *hipermetropía*. Se corrige usando una lente convergente, como indica la figura.

Si enfoca por delante de la retina, se habla de *miopía*. Se corrige usando lentes divergentes.

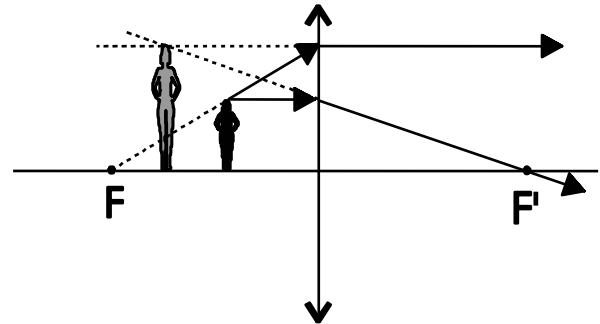
El *astigmatismo* consiste en un defecto en la esfericidad del cristalino, lo que hace que el enfoque varíe según la dirección en la que llegan los rayos. De este modo los rayos convergen en puntos distintos, haciendo la imagen borrosa.



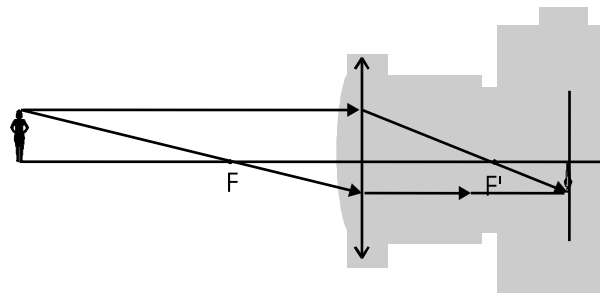
**INSTRUMENTOS ÓPTICOS:**

Son sistemas de lentes y/o espejos.

- Lupa:** Una sola lente convergente.  
 El objeto se coloca entre el foco F y la lente.  
 Imagen - virtual  
 - derecha  
 - mayor que el objeto



- Cámara fotográfica:**  
 Consiste en una cámara oscura con una lente convergente móvil.  
 El objeto está más alejado de la lente que F  
 Imagen - real  
 - invertida  
 - menor que el objeto  
 La lente (objetivo) se mueve hasta que la imagen se forme justo en la película (enfoque)



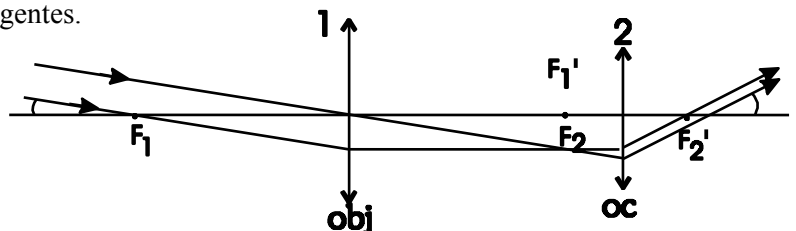
**Anteojos; telescopios:**

- Sistema compuesto - Objetivo : puede ser lente (telescopio refractor) o espejo (telesc. reflector)  
 - Ocular: siempre es una lente.

Fabricados para aumentar el ángulo de rayos que provienen de distancias muy lejanas (casi  $\infty$ )

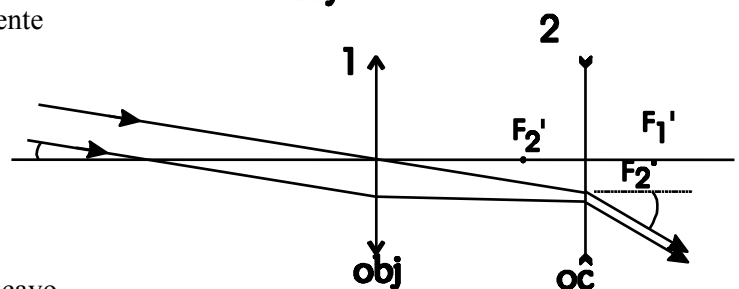
Anteojos astronómico: Posee dos lentes convergentes.

- Imagen - Virtual (en el  $\infty$ )  
 - invertida  
 - mayor que el objeto

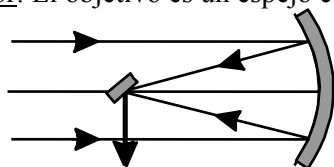


Anteojos de Galileo: El ocular es una lente divergente

- Imagen - Virtual (en el  $\infty$ )  
 - derecha  
 - mayor que el objeto



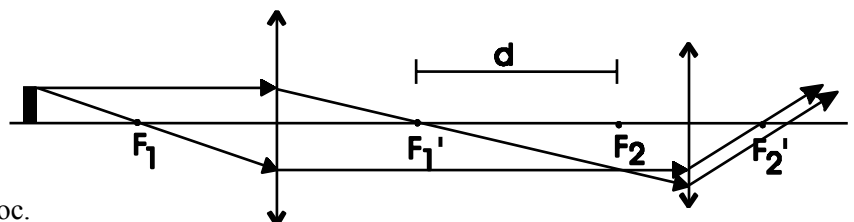
Telescopio reflector: El objetivo es un espejo cóncavo



**Microscopio:** Sistema compuesto (objetivo y ocular) convergentes.

- Imagen - Virtual  
 - invertida  
 - mayor que el objeto

Se varía la longitud del tubo hasta que la imagen del objetivo caiga justo en Foc.



**PROBLEMAS TEMA 6: LA LUZ Y LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS**

- Una onda electromagnética (o.e.m.) cuya frecuencia es de  $10^{14}$  Hz y cuyo campo eléctrico, de 2 V/m de amplitud, está polarizado en la dirección del eje OY, se propaga en el vacío, en el sentido negativo del eje OX.
  - Escribir la expresión del campo eléctrico de la onda electromagnética
  - Calcular la longitud de onda e indicar la dirección del campo magnético de la onda ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)
- Una o.e.m. plana (polarizada) tiene un campo eléctrico de amplitud 3 V/m y una frecuencia de 1 MHz. Determinar la ecuación de onda que representa al campo eléctrico si la onda avanza en el eje Y y el campo está polarizado en el eje Z. Calcula asimismo la dirección del campo magnético.
- Una antena emite una onda electromagnética de frecuencia 50 kHz.
  - Calcule su longitud de onda.
  - Determine la frecuencia de una onda sonora de la misma longitud de onda.  
( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s ;  $v_{\text{Sonido}} = 340$  m/s)
- El espectro visible en el aire está comprendido entre las longitudes de onda 380 nm (violeta) y 780 nm (rojo).
  - Calcule las frecuencias de estas radiaciones extremas. ¿cuál de ellas se propaga a mayor velocidad?
  - Determine entre qué longitudes de onda está comprendido el espectro visible en el agua, cuyo índice de refracción es 4/3. ( $c = 3 \cdot 10^8$  m · s<sup>-1</sup>)
- Una onda electromagnética tiene, en el vacío, una longitud de onda de  $5 \cdot 10^{-7}$  m.
  - Determine la frecuencia y el número de onda.
  - Si dicha onda entra en un determinado medio, su velocidad se reduce a  $3c/4$ . Determine el índice de refracción del medio y la frecuencia y la longitud de onda en dicho medio. ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)
- Un rayo de luz de 500 nm de longitud de onda, propagándose por el aire, entra en un bloque de vidrio formando un ángulo de 30° con la normal. Sabiendo que el índice de refracción de ese vidrio es de 1,5, calcular :
  - Ángulo que forma con la normal el rayo refractado.
  - Longitud de onda del rayo refractado
  - Ángulo límite del vidrio. Explicar qué significa dicho ángulo.Considerar que en el aire la luz se propaga a igual velocidad que en el vacío. ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)
- Un rayo de luz amarilla de 580 nm en el aire, pasa a un cierto cristal en el que su longitud de onda pasa a ser de  $5 \cdot 10^{-7}$  m.
  - Calcular razonadamente frecuencia y velocidad de propagación en cada medio.
  - Si el rayo refractado forma 30° con la normal a la frontera que separa a los dos medios, ¿Con qué ángulo incidió el rayo? Razonar, realizando un esquema de rayos.
- Un haz de luz roja penetra en una lámina de vidrio, de 30 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de 45°
  - Explique si cambia el color de la luz al penetrar en el vidrio y determine el ángulo de refracción.
  - Determine el ángulo de emergencia (ángulo del rayo cuando sale después de atravesar la lámina). ¿Qué tiempo tarda la luz en atravesar la lámina de vidrio? ( $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> ;  $n_{\text{vidrio}} = 1,3$ )
- Tenemos una lupa de 10 cm de distancia focal. Colocamos un objeto de 1 cm a cierta distancia de la lupa. Razonar las características de la imagen y calcular su tamaño y posición si:
  - El objeto está a 15 cm de la lupa.
  - El objeto está a 5 cm de la lupa.
- Repetir el ejercicio anterior con una lente divergente de la misma distancia focal.
  - Repetir el ejercicio anterior con una espejo cóncavo esférico de 16 cm de radio.

**CUESTIONES TEÓRICAS:**

- a) Describa brevemente el modelo corpuscular de la luz. ¿Puede explicar dicho modelo los fenómenos de interferencia luminosa?

- b) Dos rayos de luz inciden sobre un punto ¿Pueden producir oscuridad? Explique razonadamente este hecho.
2. Los rayos X, la luz visible y los rayos infrarrojos son radiaciones electromagnéticas. Ordénalas en orden creciente de sus frecuencias e indique algunas diferencias entre ellas.
3. ¿Cambian las magnitudes características de una o.e.m. que se propaga en el aire al penetrar en un bloque de vidrio? Si cambia alguna, ¿aumenta o disminuye? ¿por qué?
4. a) Enuncie las leyes de reflexión y refracción de la luz. Explique las diferencias entre ambos fenómenos.  
b) Compare lo que ocurre cuando un haz de luz incide sobre un espejo y sobre un vidrio de ventana.
5. a) Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con velocidad  $c$ . ¿Cambia su velocidad de propagación en un medio material? Defina el índice de refracción de un medio.  
b) Sitúe, en orden creciente de longitud de onda, las siguientes regiones del espectro electromagnético: infrarrojo, rayos X, ultravioleta y luz visible. Dos colores del espectro visible: rojo y verde, por ejemplo, ¿pueden tener la misma intensidad? ¿y la misma frecuencia?
6. Una lupa produce imágenes directas de objetos cercanos e invertidas de los lejanos. Utilizando trazado de rayos, ¿Dónde está el límite de distancia del objeto a la lente entre ambos casos? ¿Son las imágenes virtuales o reales? Razonar.
7. Explicar por qué, cuando introducimos una cuchara en un vaso de agua, la vemos como si estuviera rota (o doblada).
8. Podemos considerar el cristal de una pecera esférica como una lente convergente. Razonar cómo es que vemos a un pez del interior con un tamaño mayor que el que realmente tiene.
9. Explicar el funcionamiento del espejo retrovisor exterior de un coche. ¿De qué tipo de espejo se trata?

### SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS:

1. a)  $\vec{E} = 2 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 10^{14} t + 2 \cdot 10^6 x) \vec{j} \frac{V}{m}$       b)  $\lambda = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  ;  $\vec{B}$  polarizado en el eje z
2.  $\vec{E} = 3 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 10^6 t - 0,021 \cdot y) \vec{k} \frac{V}{m}$        $\vec{B}$  polarizado en el eje x
3. a)  $\lambda = 6000 \text{ m}$       b)  $\lambda_{\text{sonido}} = 0,0068 \text{ m}$
4. a)  $\nu_{\text{rojo}} = 3,85 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  ;  $\nu_{\text{violeta}} = 7,89 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$       ambas a igual velocidad, si no hay dispersión.  
b)  $\lambda_{\text{rojo}} = 584 \text{ nm}$  ;  $\lambda_{\text{violeta}} = 285 \text{ nm}$
5.  $\nu = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  ;  $k = 12,57 \cdot 10^6 \text{ rad/m}$  ; b)  $n = 4/3$  ;  $\nu$  no varía ;  $\lambda = 375 \text{ nm}$
6. a)  $\alpha_2 = 19,47^\circ$  ; b)  $\lambda = 333 \text{ nm}$  ; c)  $\alpha_L = 41,8^\circ$
7. a) En aire:  $\nu = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  ;      En cristal:  $\nu = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $v = 2,6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$   
b)  $\alpha_1 = 19,47^\circ$
8. a) no cambia, la frecuencia es la misma.  $\alpha_2 = 32,95^\circ$       b)  $\alpha_3 = 45^\circ$        $t = 1,57 \text{ ns}$
9. a) imagen real, invertida.  $s' = 0,3 \text{ m}$  ,  $y' = -0,02 \text{ m}$  ;      b) imagen virtual, derecha.  $s' = -0,1 \text{ m}$  ,  $y' = 0,02 \text{ m}$
10. a) 1) im. virtual, derecha.  $s' = -0,06 \text{ m}$  ,  $y' = 0,004 \text{ m}$  , 2) im. virtual, derecha.  $s' = -0,033 \text{ m}$  ,  $y' = 0,066 \text{ m}$   
b) 1) im. real, invertida.  $s' = 0,17 \text{ m}$  ,  $y' = -0,011 \text{ m}$  ; 2) im. virtual, derecha.  $s' = -0,13 \text{ m}$  ,  $y' = 0,026 \text{ m}$