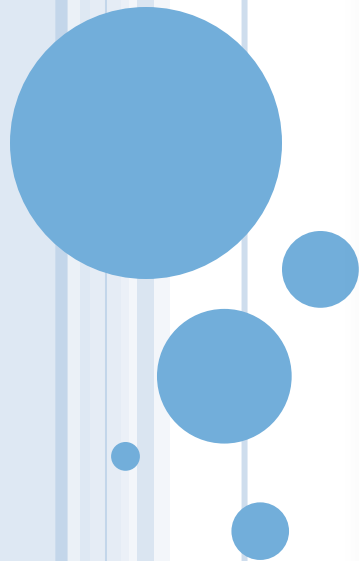


**TEMA 7.-**

**ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. LA LUZ.**



## 7.1.- Ondas electromagnéticas.

### 7.1.1- Naturaleza.

- ✚ A lo largo de la historia se han planteado distintos modelos sobre la naturaleza de la luz.

#### Modelo corpuscular de Newton.

- ✚ La luz está formada por pequeños corpúsculos diferentes para cada uno de los colores.
- ✚ Al chocar con los ojos producen la sensación luminosa.
- ✚ Son capaces de atravesar medios transparentes y “*rebotan*” en los opacos.
- ✚ Este modelo no explica la refracción de la luz.

#### Modelo ondulatorio de Huygens.

- ✚ La luz es una perturbación que se propaga por el medio como onda mecánica longitudinal.
- ✚ Este modelo explica perfectamente la reflexión y la refracción de la luz.
- ✚ Este modelo se encuentra dos grandes dificultades:
  - ❖ La oposición radical con el modelo y el prestigio de Newton.
  - ❖ No comprueba el carácter ondulatorio de la luz: interferencia, difracción.

## Modelo ondulatorio de Fresnel.

- ✚ La mejora de los instrumentos de observación permite comprobar experimentalmente la naturaleza ondulatoria de la luz: interferencia, difracción, polarización.
- ✚ Propone que la luz tiene una naturaleza ondulatoria de carácter transversal.
- ✚ Introduce en el principio de Huygens un factor que explica el no retroceso de la onda. Ese factor es:

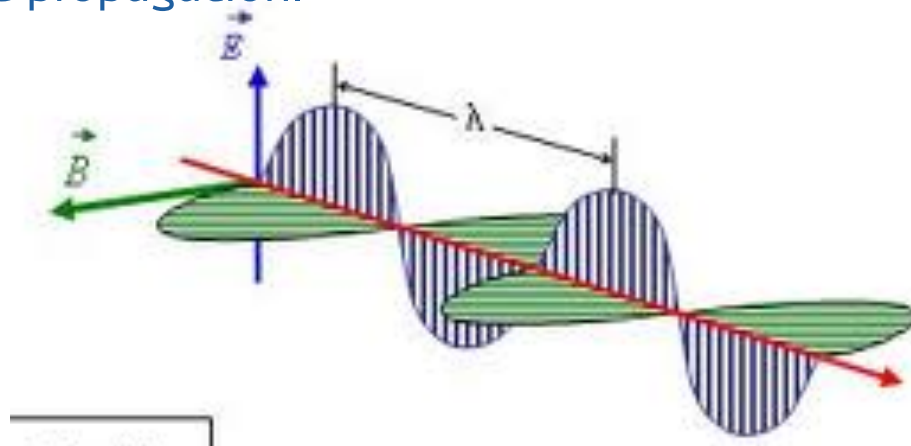
$$\frac{1}{2}(1+\cos\Theta)$$

## Modelo Electromagnético de Maxwell.

- ✚ La luz es una onda electromagnética transversal constituida por un campo eléctrico y un campo magnético armónicos, perpendiculares entre sí y perpendiculares a la velocidad de propagación.
- ✚ Matemáticamente:

$$\vec{E} = E_0 \text{sen}(\omega t - kx) \hat{j}$$

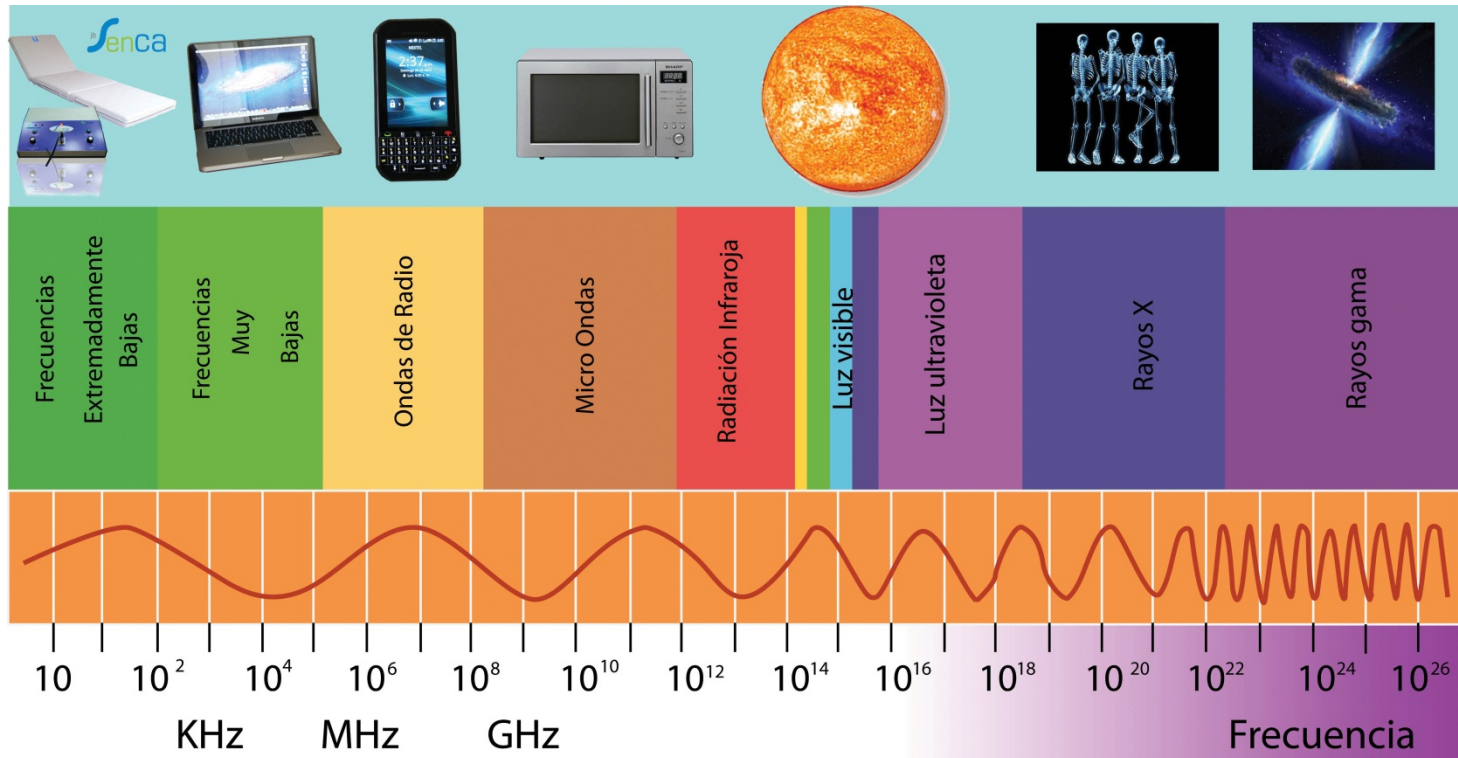
$$\vec{B} = B_0 \text{sen}(\omega t - kx) \hat{k}$$



- Existe una relación directa entre los módulos de esos campos magnéticos:

$$\frac{E_0}{B_0} = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 [m / s]$$

- Esto confirma la naturaleza electromagnética de la luz: es una onda incluida en el espectro electromagnético que puede propagarse por el vacío sin necesidad de un soporte material.
- El espectro electromagnético: secuencia de todas las ondas E-M conocidas, ordenadas según su longitud de onda y frecuencia.



## Modelo corpuscular de Einstein.

- ✚ La aparición de un nuevo fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico lleva a Albert Einstein a plantear un nuevo modelo corpuscular para la luz.
- ✚ Propone que la luz está formada por pequeños paquetes de energía cuantizada que denomina fotones.
- ✚ A cada uno de esos paquetes le corresponde una energía
$$E = h \cdot f$$
  - ❖ E: energía [J]
  - ❖ h:  $6,625 \cdot 10^{-34}$  [J·s] (constante de Planck).
  - ❖ f: frecuencia de la radiación [Hz]

## Modelo dual de De Broglie.

- ✚ Plantea que la luz tiene una doble naturaleza onda-partícula.
- ✚ En algunos experimentos la luz se comporta como una onda:
  - ❖ En la reflexión en los espejos.
  - ❖ En la refracción en el agua.
  - ❖ En los fenómenos de interferencia luminosa.
  - ❖ En la dispersión en un prisma al formar un arcoiris.



- ✚ En otros casos luz se comporta como una partícula:
  - ❖ En el efecto fotoeléctrico.
- ✚ Esta doble naturaleza onda-partícula no se pone de manifiesto simultáneamente en ningún experimento.
- ✚ Esta doble naturaleza onda partícula no es algo exclusivo de la luz. También se pone de manifiesto en otras partículas subatómicas como son los electrones.

## 7.2.- La luz.

- ✚ La **óptica** es la parte de la física que estudia las propiedades y la naturaleza de la luz, así como sus interacciones con la materia.
- ✚ La luz, al ir de un punto a otro, sigue la trayectoria tal que el camino óptico es mínimo.
- ✚ La luz se propaga en el vacío a la misma velocidad que las ondas electromagnéticas. Su valor es  $c = 3 \cdot 10^8$  (m/s)
- ✚ Para caracterizar el comportamiento de la luz en cada medio definimos el índice de refracción “n” como:

$$n = \frac{c}{V}$$

- ❖ n: índice de refracción del medio.
- ❖ c: velocidad de la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8$  m/s).
- ❖ v: velocidad de la luz en cada medio.



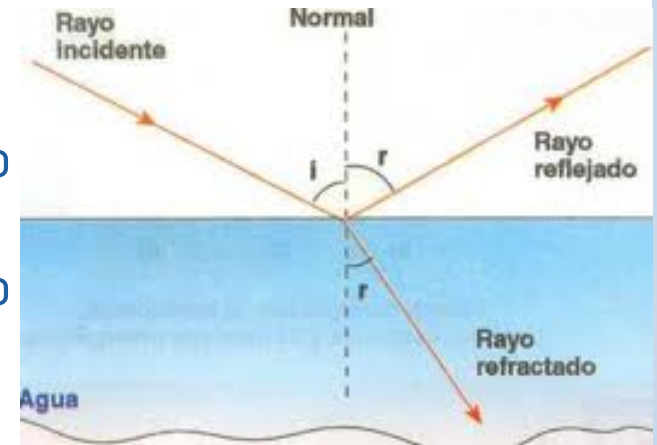
## 7.3.- Fenómenos luminosos.

### 7.3.1- Reflexión y refracción. Leyes de Snell.

- ✚ Cuando la luz, en su propagación por un medio, se encuentra una superficie de separación con otro medio, una parte de su energía se trasmite al nuevo medio (refracción) y otra parte vuelve al medio inicial (reflexión).

#### ✚ Leyes de la reflexión:

- 1) El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están contenidos en un mismo plano.
- 2) El ángulo incidente es igual que el ángulo reflejado.



#### ✚ Leyes de la refracción:

- 1) El rayo incidente, la normal y el rayo refractado están contenidos en un mismo plano.
- 2) El ángulo incidente y el ángulo refractado están relacionados por la ley de Snell:

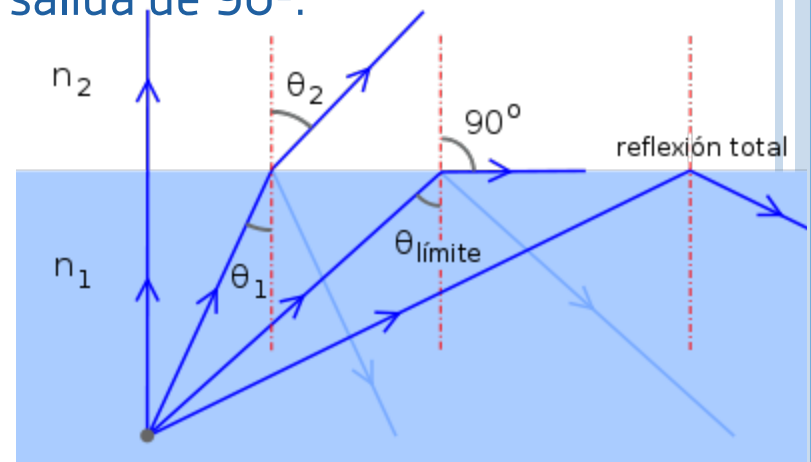
$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

## ✚ Ángulo límite y reflexión total.

- 1) Cuando un rayo pasa a un medio con menor índice de refracción, se refracta alejándose de la normal y acercándose a la superficie de separación.
- 2) Al aumentar el ángulo de entrada también aumenta el ángulo refractado.
- 3) Ocurre que para un cierto ángulo de entrada obtenemos un ángulo de refracción de  $90^\circ$  (el rayo sale por la superficie).
- 4) Ese ángulo de incidencia se denomina ángulo límite. Su valor se obtiene a partir de la ley de Snell imponiendo un ángulo de salida de  $90^\circ$ :

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

- 5) Para ángulos de incidencia superiores al ángulo límite, tendremos una reflexión total (siempre que  $n_1 > n_2$ ).



## ✚ Longitud de onda e índice de refracción.

Cuando una onda pasa de un medio a otro, cambian todos sus parámetros salvo la frecuencia  $f_0$  que permanece constantes. Así:

$$n_1 = \frac{c}{V_1} = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_1 f_1} = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_1 f_0} \Rightarrow n_1 = \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$$





### 7.3.2- Dispersión.

- ✚ Hemos visto que el índice de refracción de una sustancia es función de la longitud de onda incidente ( $n \sim 1 / \lambda$ ).
- ✚ Sabemos que la luz blanca está compuesta por la suma de todos los colores del arco iris.
- ✚ Cuando la luz blanca incide en un prisma, cada uno de los colores (que tienen una  $f$  y  $\lambda$  característicos) se refracta con un ángulo diferente apareciendo el arco iris.
- ✚ Este fenómeno se conoce como **dispersión de la luz**.
- ✚ Al color rojo le corresponde la menor frecuencia por lo tanto, la mayor  $\lambda$ , el menor  $n$ , el mayor ángulo de refracción (medido desde la normal) y, por lo tanto, la menor desviación.



- ✚ Este fenómeno fue utilizado para analizar los espectros de emisión y absorción de diferentes sustancias químicas.
- ✚ Un espectro de emisión es aquel que se obtiene cuando analizamos la luz que emiten algunos elementos químicos. Esta luz está formada por un conjunto de líneas monocromáticas característico de cada elemento químico.



- ✚ Un espectro de absorción es aquel que se obtiene al analizar la luz blanca después de haberla pasado por un elemento químico. Obtenemos un arco iris al que le faltan algunas líneas características.



- ✚ Esos espectros son complementarios: la luz que emiten las sustancias al calentarse, es la misma que absorbe cuando reciben luz blanca.

### 7.3.4- Interferencia y difracción.

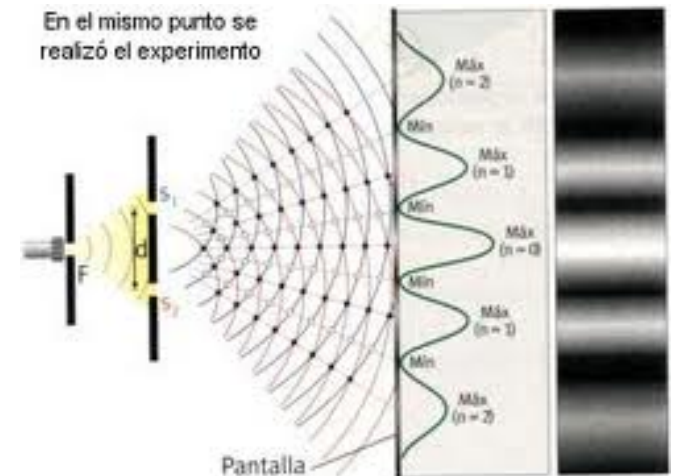
✚ Estos son los dos fenómenos puramente ondulatorios que definitivamente muestran que la luz es una onda. Pero NO fue fácil comprobar experimentalmente estos fenómenos.

✚ Finalmente se consiguió con el experimento de Young de la doble rendija. Para ello necesitamos:

- ❖ Un foco F de luz monocromática.
- ❖ Una **doble rendija equidistante** con el foco y de tamaño ( $d \sim \lambda$ ).
- ❖ Una pantalla situada a una distancia L.

✚ El funcionamiento está basado en:

- ❖ La luz **se difracta** en la doble rendija al encontrarse un obstáculo de un tamaño similar a su longitud de onda ( $d \sim \lambda$ ).
- ❖ Las rendijas se convierten en **focos emisores coherentes secundarios**  $F'$  de ondas de la misma naturaleza.
- ❖ Estos focos secundarios **interfieren** en la pantalla generando un patrón de interferencias constructiva y destructiva.



- ❖ La diferencia de fase de las dos ondas al interferir vienen dadas por:

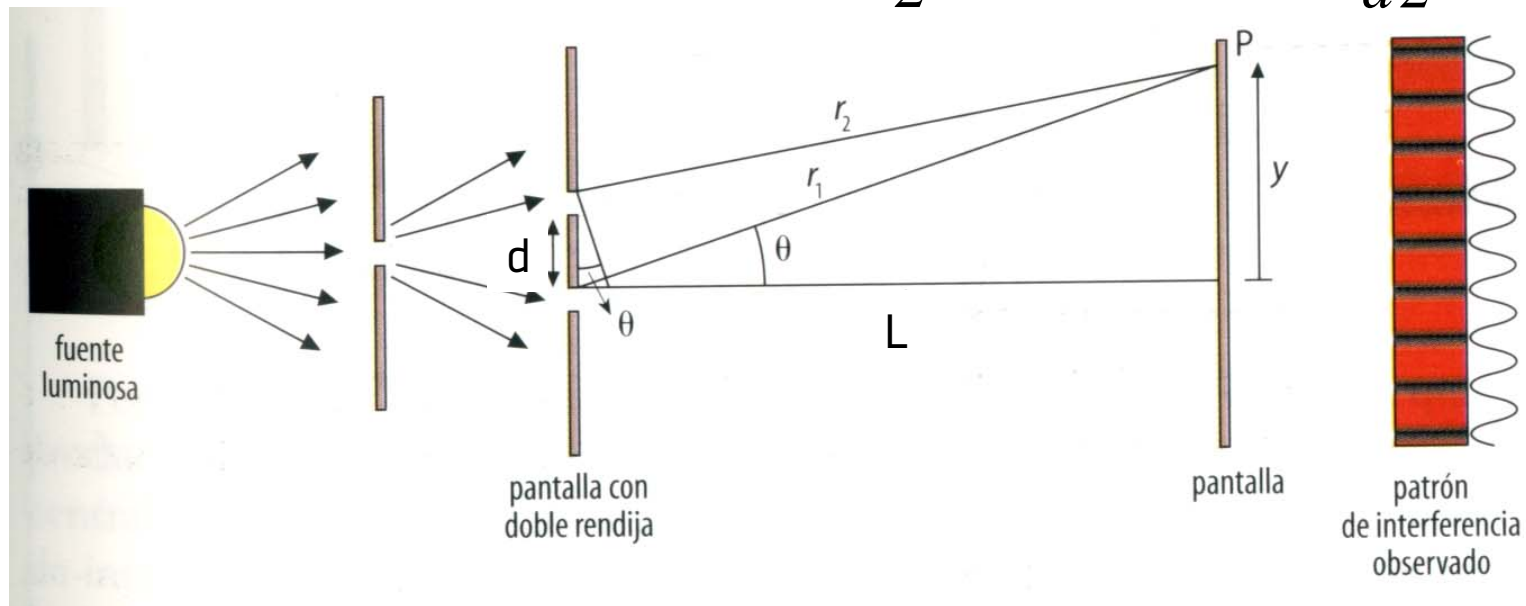
$$\left. \begin{aligned} \Delta r &= r_2 - r_1 = d \cdot \text{sen}\alpha \\ \text{sen}\alpha &= \frac{y}{L} \end{aligned} \right\} \Delta r = \frac{dy}{L} \quad \rightarrow \quad y = \frac{\Delta r \cdot L}{d}$$

- ❖ Las **franja**s brillantes se corresponden con los puntos de interferencia constructiva en los que:

$$\Delta r = n\lambda \quad \rightarrow \quad y_{\text{brill}} = \frac{nL\lambda}{d}$$

- ❖ Las **franja**s oscuras se corresponden con los puntos de interferencia destructiva en los que:

$$\Delta r = (2n - 1) \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow \quad y_{\text{osc}} = \frac{(2n - 1)L\lambda}{d}$$



## 7.4.- Leyes de la Óptica Geométrica.

### 7.4.1.- Conceptos básicos.

- ✚ **Óptica física:** parte de física que estudia los fenómenos ondulatorios de la luz.
- ✚ **Óptica geométrica:** parte de la física que estudia la formación de imágenes a partir de los cambios de dirección que sufren los rayos luminosos al reflejarse y refractarse en los medios transparentes. Basada en:
  - ❖ La luz se propaga en línea recta en los medios homogéneos.
  - ❖ Los rayos luminosos son reversibles.

$$n = \frac{c}{V}$$

#### ✚ **Conceptos básicos:**

- ❖ Rayo: línea que sigue la luz desde el foco emisor hasta el receptor.
- ❖ Índice de refracción “n”: es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio.
- ❖ Objeto: cuerpo del que parten los rayos luminosos.
- ❖ Imagen real: aquella que se forma en el punto donde convergen los rayos luminosos.
- ❖ Imagen virtual: aquella que se forma en el punto donde converger las prolongaciones hacia atrás de los rayos luminosos.

- ❖ Sistema óptico: conjunto de superficies que separan medios transparentes.
- ❖ Polo o vértice: pto. de corte del eje óptico con la superficie de separación.

### ✚ Convenio de signos:

- ❖ Representaremos los rayos luminosos de izquierda a derecha.
- ❖ Las distancias se miden desde el polo o vértice del sistema (positivas hacia arriba y hacia la derecha).
- ❖ Todos los datos numéricos se sustituyen en las fórmulas con su signo correspondiente.

### ✚ Algunos conceptos más:

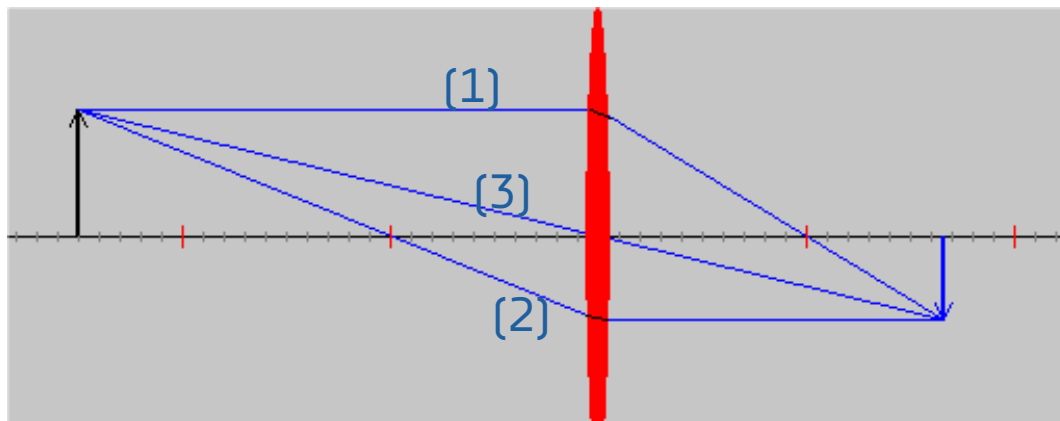
- ❖ Distancia objeto ( $s_1=s$ ): distancia al objeto medida desde el polo.
- ❖ Distancia imagen ( $s_2=s'$ ): distancia a la imagen medida desde el polo.
- ❖ El aumento lateral  $\beta$  se define como el cociente entre el tamaño de la imagen “y” entre el tamaño del objeto “y”:

$$\beta = \frac{y'}{y}$$

- ❖ Foco objeto  $F_1=F$ : pto. del que parten los rayos que salen paralelos del sistema óptico.
- ❖ Foco imagen  $F_2=F'$ : pto. Donde se concentran los rayos que entran paralelos al sistema óptico.

### ✚ **Formación de imágenes:** trazado de rayo.

- ❖ Rayo paralelo (1): rayo que entra paralelo al sistema y sale por el foco imagen  $F_2$ .
- ❖ Rayo focal (2): rayo que entra por el foco objeto  $F_1$  y sale paralelo del sistema.
- ❖ Rayo radial (3): rayo que entra perpendicular a la superficie de separación, pasa por el centro de curvatura y no se desvía.

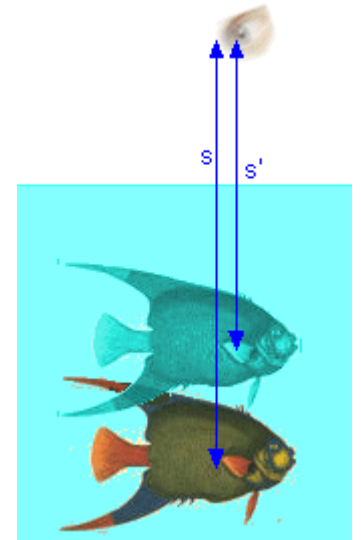
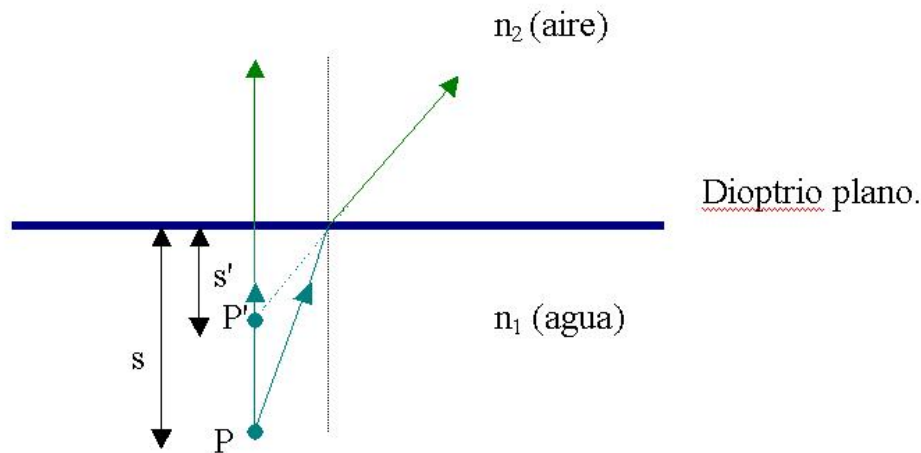


- ❖ Características de la imagen: real, invertida y de menor tamaño.

## 7.4.2.- Dioptrio plano.

Un **dioptrio plano** es una superficie plana que separa dos medios transparentes.

Cuando vemos un objeto situado dentro del agua, parece que está más cerca de la superficie. La formación de las imágenes se obtiene por **refracción** de los rayos. Veamos el trazado de rayo aplicando la ley de Snell:



Los rayos luminosos se desvían al pasar del agua al aire, alejándose de la normal y acercándose a la superficie del agua. Se produce una imagen virtual del objeto que parece encontrarse más cerca de la superficie.

La ecuación general del dioptrio plano es:

$$\frac{n_1}{s_1} = \frac{n_2}{s_2}$$

El aumento lateral es  $\beta = +1$





## 7.5.- Formación de imágenes en sistemas ópticos.

### 7.5.1.- Formación de imágenes en espejos.

#### Espejos planos.

Las imágenes en los espejos planos se obtiene por reflexión de los rayos luminosos:

La ecuación general del espejo plano es:

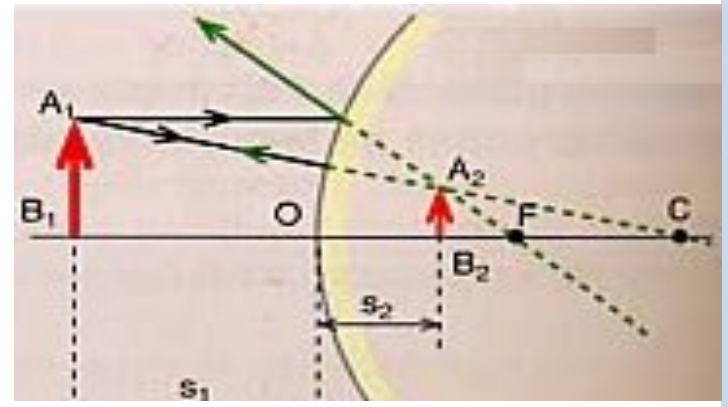
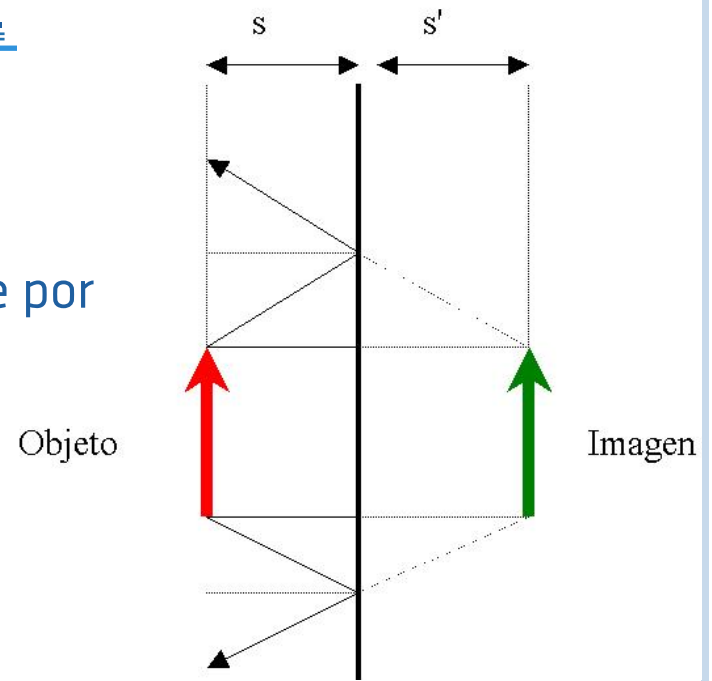
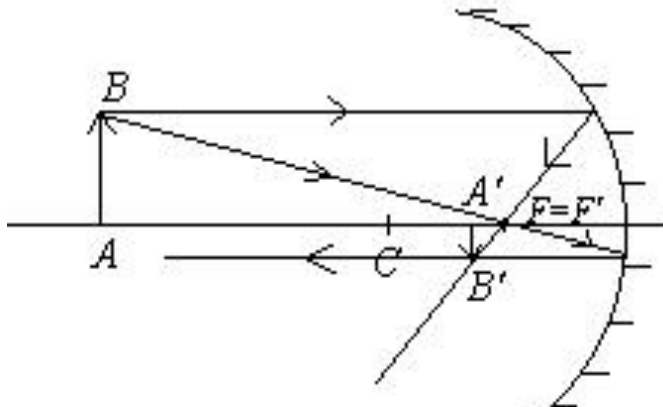
$$S_1 = - S_2$$

El aumento lateral es  $\beta = +1$

#### Espejos esféricos.

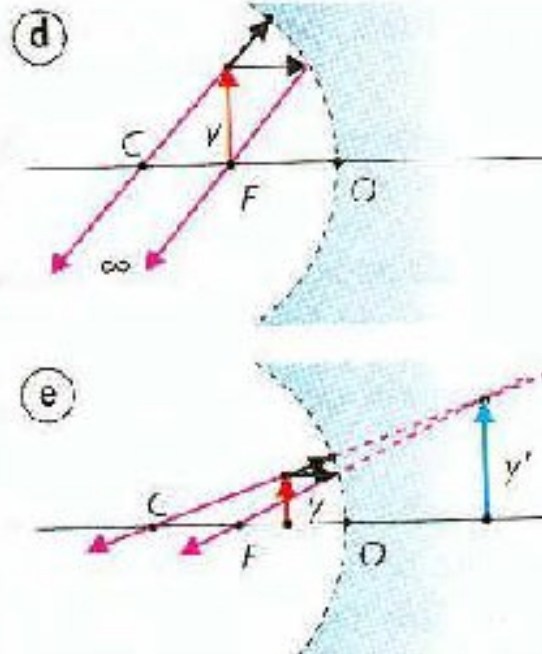
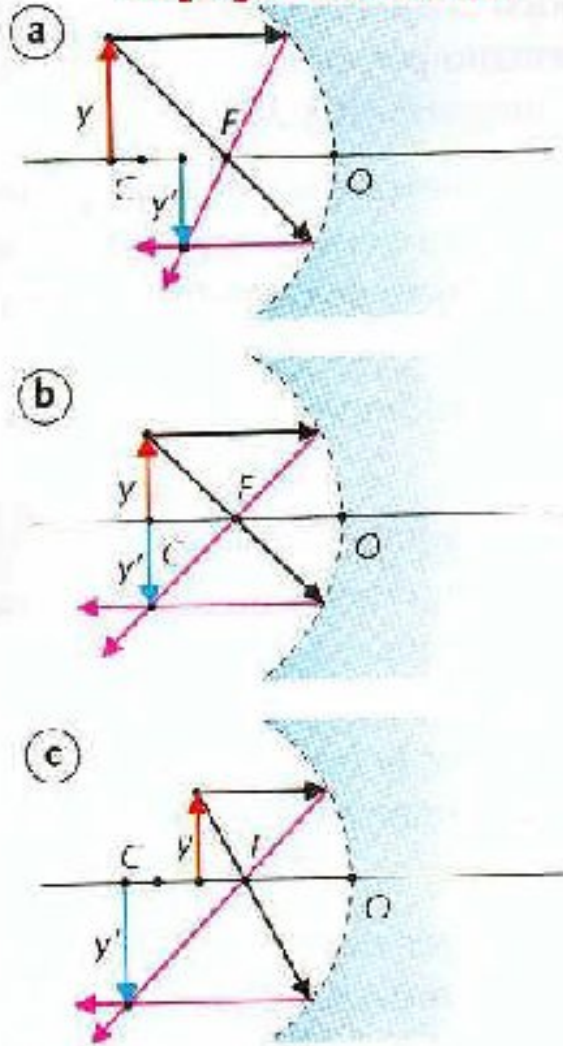
En los espejos esféricos coinciden los focos objeto e imagen:  $F_1 = F_2 = R/2$

❖ Espejo cóncavo: tiene el centro delante del vértice ( $R < 0$ ) ❖ Espejo convexo: tiene el centro detrás del vértice ( $R > 0$ )



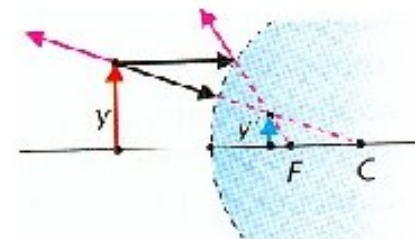
- Las características de la imagen depende del tipo de espejo (cóncavo/convexo), y de la posición que ocupe el objeto:

### Espejo cóncavo



### Espejos convexos

Se produce una situación en la que la imagen es virtual, derecha y más pequeña que el objeto.



❖ Ecuación del espejo esférico:

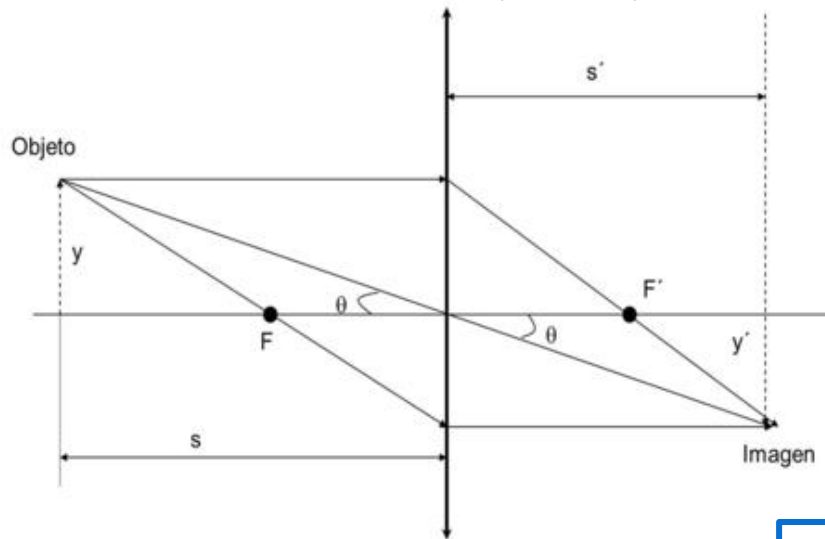
$$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f'}$$

❖ Aumento lateral del espejo esférico:

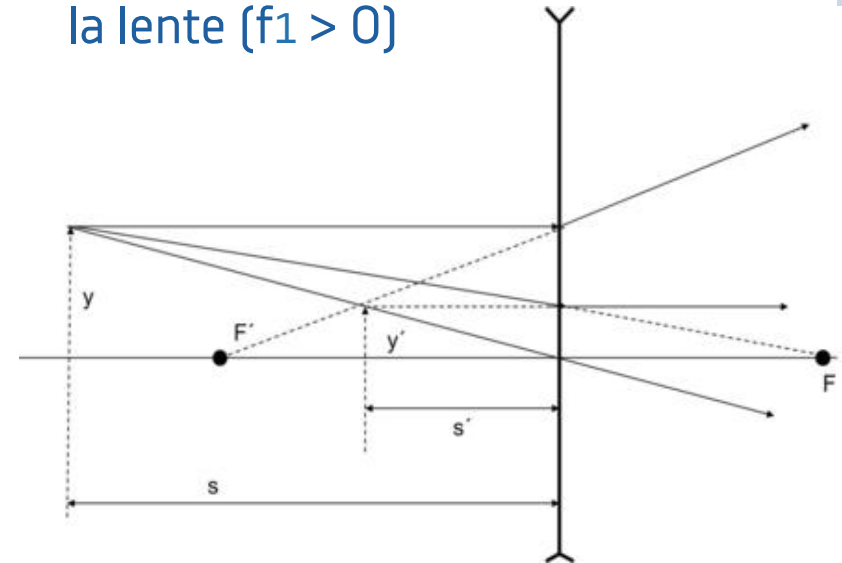
$$\beta = -\frac{s_2}{s_1}$$

7.5.2.- Formación de imágenes en lentes delgadas.

❖ Lente convergente: es aquella que tiene el foco objeto  $F_1$  delante de la lente ( $f_1 < 0$ )



❖ Lente divergente: es aquella que tiene el foco objeto  $F_1$  detrás de la lente ( $f_1 > 0$ )



❖ Ecuación de la lente delgada:

$$\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f'}$$

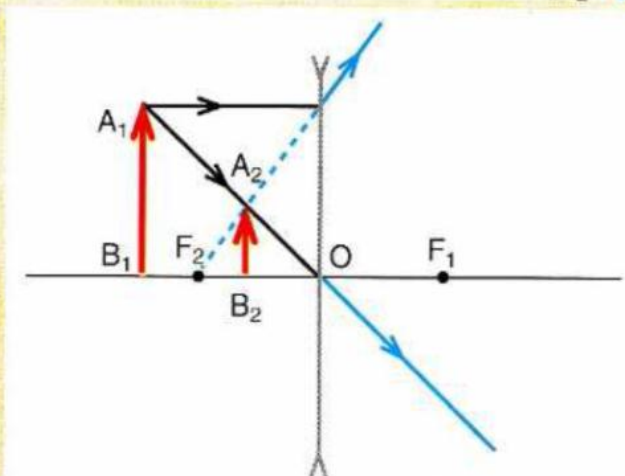
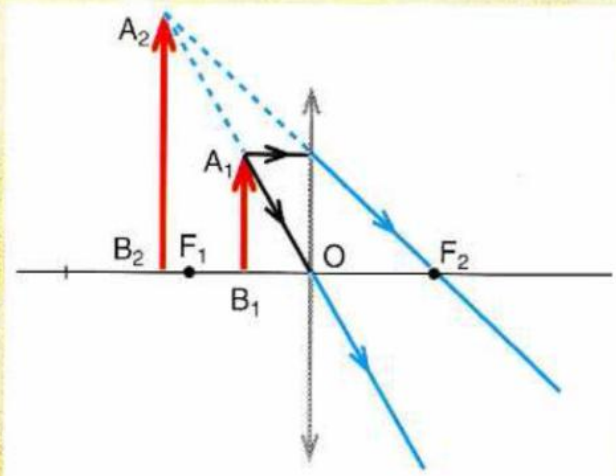
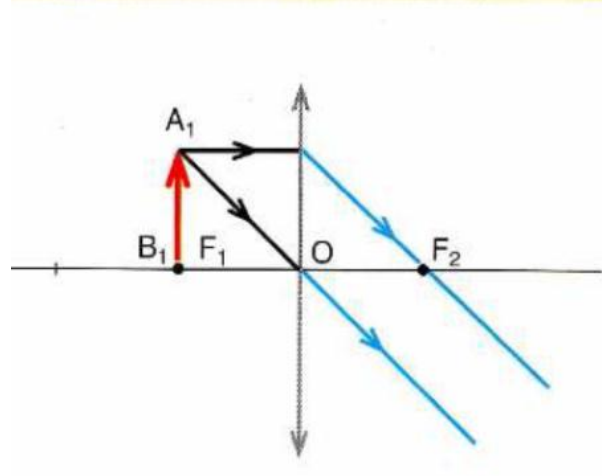
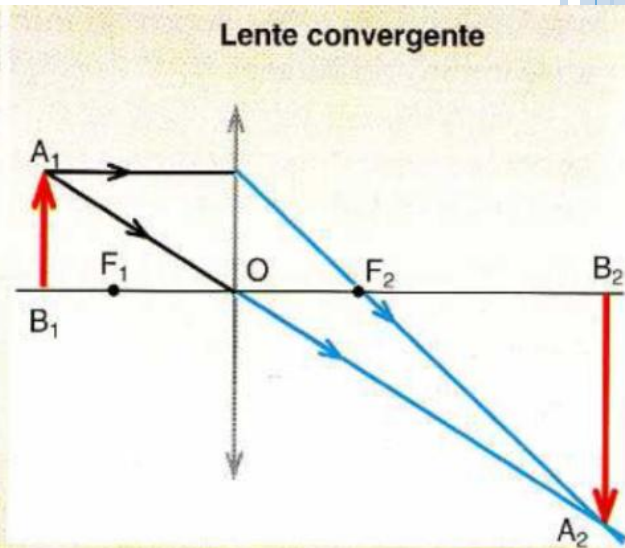
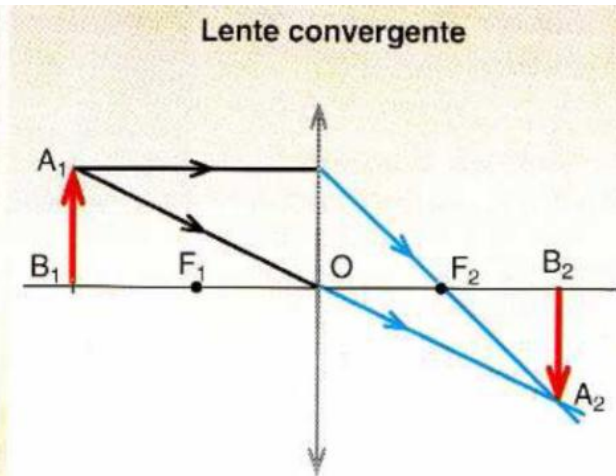
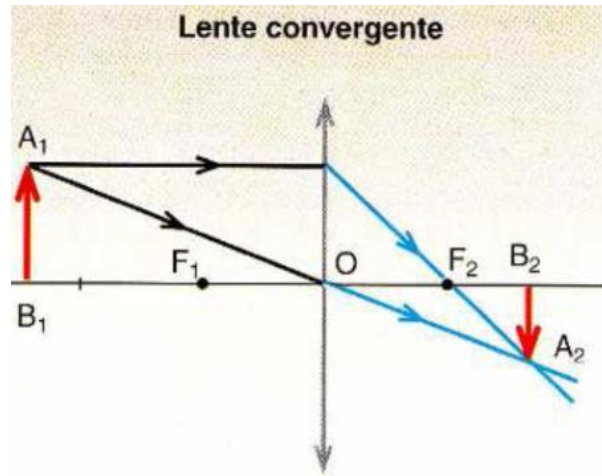
❖ Aumento lateral de la lente delgada:

$$\beta = \frac{s_2}{s_1}$$

❖ Potencia de la lente delgada:

$$P_{(dioptría)} = \frac{1}{f'(m)}$$

- Las características de la imagen depende del tipo de lente (convergente/divergente), y de la posición que ocupe el objeto:



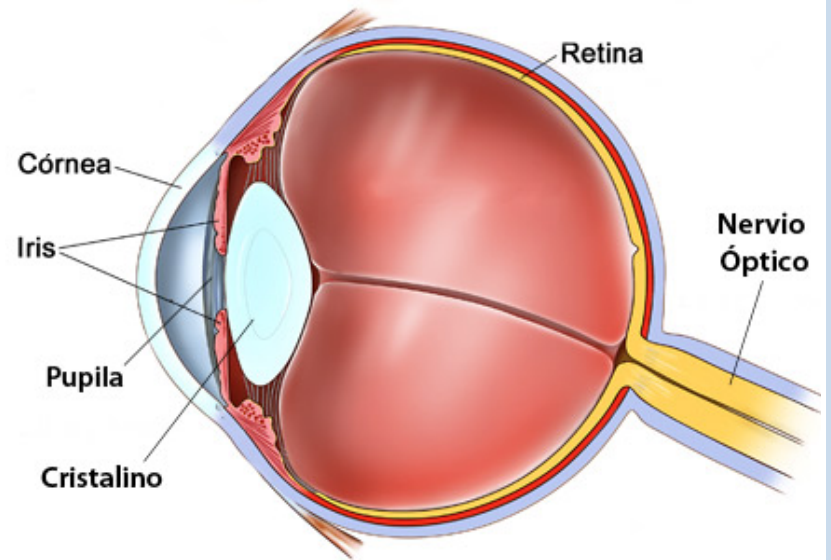
 Cuadro resumen:

Sistema óptico	Ec. Fundamental	Aumento Lateral $\beta$	Otros:
Lente delgada	$\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f'}$	$\beta = \frac{s_2}{s_1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Convergente: (<math>f_2 &gt; 0</math>)</li> <li>➤ Divergente: (<math>f_2 &lt; 0</math>)</li> </ul>
Espejo esférico	$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f'}$	$\beta = -\frac{s_2}{s_1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cóncavo: (<math>R &lt; 0</math>)</li> <li>➤ Convexo: (<math>R &gt; 0</math>)</li> <li>➤ <math>F_1 = F_2 = R/2</math></li> </ul>
Espejo plano	$s_1 = -s_2$	$\beta = +1$	
Dioptrio plano	$\frac{n_1}{s_1} = \frac{n_2}{s_2}$	$\beta = +1$	



## 7.6.- El ojo humano.

- ✚ El ojo humano es un sistema óptico consistente en un dioptrio esférico, constituido fundamentalmente por:
  - ❖ Cristalino: membrana elástica y transparente que nos permite enfocar la visión.
  - ❖ Pupila: abertura de color negro que regula la cantidad de luz que entra en el globo ocular (diafragma).
  - ❖ Retina: tejido sensible a la luz situado en la zona posterior del globo ocular donde se forma la imagen.
- ✚ Un ojo humano está diseñado para enfocar objetos situados en el infinito (punto remoto) sin forzar la visión.
- ✚ Forzando la vista, somos capaces de enfocar objetos cercanos. Una persona joven es capaz de enfocar sin dificultad objetos situados a 25 cm (punto próximo).





✚ Con la edad es normal que aparezcan algunos defectos en la visión. Los más comunes son:

- ❖ **Miopía**: el ojo no es capaz de enfocar objetos situados en el infinito. El punto remoto se acerca a unos pocos metros de distancia. Puede corregirse con una lente divergente que acerque el objeto situado en el infinito.
- ❖ **Hipermetropía**: dificultad del ojo para enfocar objetos cercanos. El punto próximo se aleja desde los 25 cm. Puede corregirse con una lente convergente que aleje la imagen de un objeto situado a 25 cm hasta el punto próximo.
- ❖ **Astigmatismo**: defecto en la visión consistente en que la imagen de un punto son dos puntos.

