

## Tema 6: La luz y las ondas electromagnéticas

1. Introducción histórica: modelos corpuscular y ondulatorio.
  2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.
  3. Reflexión, refracción. Ley de Snell.
  4. Óptica geométrica. Nociones fundamentales.
  5. Lentes (dioptrios).
  6. Espejos (catoptrios)
  7. El ojo. Defectos de la visión
  8. Dispersión de la luz.
- Anexo. Instrumentos ópticos

### 1. Introducción histórica: Modelos corpuscular y ondulatorio.

A lo largo de la Historia las ideas sobre la naturaleza de la luz y de las distintas radiaciones han ido cambiando.

En la antigüedad (Grecia), **Euclides** (300 a.C) considera la visión como una emanación del ojo que explora los objetos, aplicando la geometría a la formación de sombras, y a la perspectiva.

Los árabes (**Al-Hazen**, s. XI), describen los fenómenos de reflexión y refracción, y la cámara oscura.

En la primera mitad del s. XVII se describen las leyes experimentales (diagramas de rayos, por **Kepler**, 1604; 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 (por tanto, menor en el agua que en el aire).

Inconvenientes: - Al suponer que la luz es 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*, y 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 (por tanto, mayor en el agua que en el aire).

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.

## 2. Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético

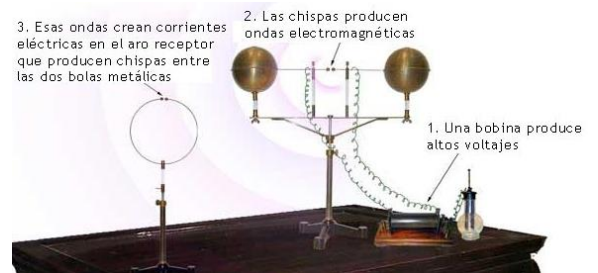
En 1865, el físico escocés **James C. Maxwell** publica su Teoría Electromagnética, en la que unificaba la electricidad y el magnetismo. Como una consecuencia de dicha teoría, llegó a la conclusión de que los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  podían propagarse como ondas en el espacio. Predijo así la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

**Heinrich Hertz**, en 1887, comprobó experimentalmente la predicción de Maxwell, generando ondas electromagnéticas (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):

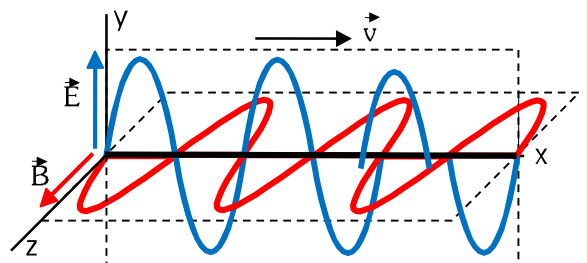
Una onda electromagnética consiste en la propagación a través de un medio de campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Son producidas por oscilaciones de partículas cargadas. Tienen estas características:

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

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

En cualquier otro medio  $v < c$

Depende de las características eléctricas y magnéticas del medio

Todas las ondas electromagnéticas, sea cual sea su frecuencia, se propagan a la misma velocidad dentro del mismo medio, siempre que éste sea no dispersivo (estudiamos los medios dispersivos en el apartado 8)

### 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  $v$  el medio considerado,  $n = \frac{c}{v}$ . Siempre  $n \geq 1$

Cuanto mayor sea  $n$ , menor será la velocidad de la luz en dicho medio.

Si el medio es no dispersivo,  $n$  es el mismo para todas las ondas electromagnéticas.

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  $f$  (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  $f$  y  $\lambda$  son inversamente proporcionales  $f = \frac{v}{\lambda}$ . ( $f = \frac{c}{\lambda}$  en el vacío)

$f$ (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 UV (A,B,C)	$10^{-9}$
$10^{16}$		$10^{-8}$
$10^{15}$		$10^{-7}$
$10^{14}$	Luz visible	$10^{-6}$
$10^{13}$	Infrarrojo	$10^{-5}$
$10^{12}$		$10^{-4}$
$10^{11}$	microondas	$10^{-3}$
$10^{10}$	Telecomunicaciones (5G), 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

(Datos de  $\lambda$  calculados en el vacío)

**Radioondas.** Son ondas electromagnéticas producidas por circuitos eléctricos. Su longitud de onda está comprendida entre 10 km y 1 cm. Se emplean en radiodifusión y telecomunicaciones (radio, TV, wifi, telefonía), radioastronomía.

**Microondas.** Son producidas por vibraciones de moléculas. Su longitud de onda está comprendida entre  $10^{-2}$  m y  $10^{-4}$  m. Algunos usos: radioastronomía, comunicaciones (radar, maser), hornos microondas.

**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  $7500 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$  m). Usos: calefacción, mandos a distancia, medicina (termoterapia), termómetros ópticos, astronomía.

**Luz visible.** Son producidas por oscilaciones de los electrones más externos del átomo. Su longitud de onda va de  $7500 \text{ \AA}$  a  $4000 \text{ \AA}$ . Son percibidas por nuestra retina. Algunos usos: Visión, láser, astronomía óptica.

**Rayos ultravioleta.** Son producidas por oscilaciones de los electrones más internos. Su longitud de onda está comprendida entre  $4000 \text{ \AA}$  y  $30 \text{ \AA}$ . Se emplean en medicina, por su poder ionizante. Son los responsables de las quemaduras por el sol y de la aparición de cáncer de piel. El Sol es un poderoso emisor de rayos ultravioleta. Usos: esterilización, tratamiento de algunas enfermedades de la piel, astronomía.

**Rayos X.** Son producidos por oscilaciones de los electrones próximos al núcleo. Su longitud de onda es del orden de  $30 \text{ \AA}$  -  $0,4 \text{ \AA}$ . Son peligrosos para los tejidos debido a su poder energético. Algunos usos: Análisis de materiales, medicina (radiografías y radioterapia). También en astronomía.

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

### 3. Reflexión y refracción de la luz. Ley de Snell

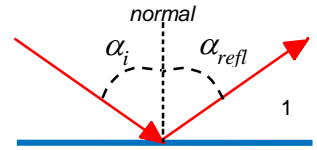
Recordamos brevemente las características de estos dos fenómenos, ya vistas en el tema de ondas.

#### 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.

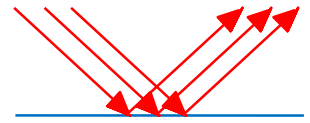
Características (leyes de la reflexión):

- La onda reflejada tiene igual  $f$ ,  $\lambda$ , y velocidad de propagación que la onda incidente.
- Los rayos incidente, reflejado y la normal están en el mismo plano.
- El ángulo que forma el rayo reflejado con la normal es igual al del rayo incidente ( $\alpha_i = \alpha_{refl}$ ).

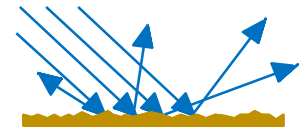


#### Reflexión nítida y difusa:

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



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

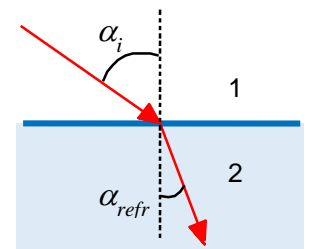


#### Refracción:

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).

Características (leyes de la refracción):

- Los rayos incidente, refractado y la normal están en el mismo plano.
- El ángulo que forma el rayo refractado con la normal no coincide con el ángulo de incidencia. Su valor dependerá de las velocidades de propagación de la luz en los medios 1 y 2 (ley de Snell)
- La onda refractada tiene igual frecuencia que la onda incidente (es del mismo color), pero se propaga a distinta velocidad. Por lo tanto, la longitud de onda cambia al pasar de un medio a otro.



Sabiendo que la frecuencia  $\nu$  no cambia y que  $n = \frac{c}{v}$        $\lambda = \frac{v}{f}$

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \rightarrow \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \rightarrow \frac{c}{\lambda_1 \cdot n_1} = \frac{c}{\lambda_2 \cdot n_2} \rightarrow \lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2$$

Con esta expresión podemos ver cómo varía la longitud de onda al pasar de un medio a otro.

#### Ángulo de refracción: Ley de Snell:

Los ángulos de la onda incidente y refractada están relacionados por la **ley de Snell**

$$n_1 \cdot \text{sen} \alpha_i = n_2 \cdot \text{sen} \alpha_{refr} \quad \text{o también} \quad n_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen} \alpha_2$$

Consecuencias:

- Si  $\alpha_i = 0$       incidencia perpendicular       $\alpha_{refr} = 0$
- Si  $n_2 > n_1 \rightarrow \alpha_{refr} < \alpha_i$       Esto ocurre, por ejemplo, al pasar del aire a otro medio material.
- Si  $n_1 > n_2 \rightarrow \alpha_{refr} > \alpha_i$       Esto ocurre, por ejemplo, al pasar de un medio material al aire.
- Al aumentar  $\alpha_i$ ,  $\alpha_{refr}$  aumenta también.

### Ángulo límite:

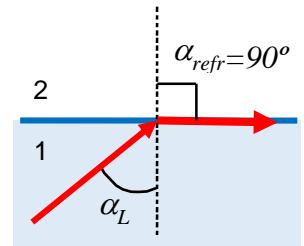
Si  $n_1 > n_2$ , si vamos aumentando  $\alpha_i$  llegará un momento en que  $\alpha_{refr}$  se haga  $90^\circ$ . Entonces el rayo no pasa al medio 2. No tenemos refracción, sino sólo reflexión. A esto se le conoce como **reflexión total**.

El ángulo de incidencia para el que ocurre esto se le denomina **ángulo límite** ( $\alpha_L$ ).

Para ángulos de incidencia mayores, no habrá rayo refractado.

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

El ángulo límite existe sólo cuando el rayo pasa de un medio con mayor índice de refracción a otro con menor (por ejemplo, del agua al aire, o de un vidrio al vacío) pero nunca puede darse en la situación contraria.



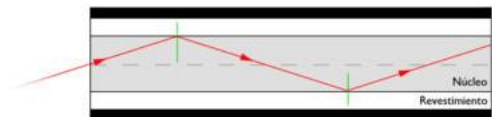
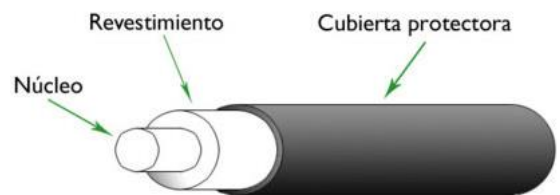
Vemos que el ángulo límite está definido entre **dos** medios, siempre con  $n_1 > n_2$ . Si en alguna cuestión nos preguntan por el ángulo límite de un solo medio, se entiende que el medio 2 es el vacío.

Una importante aplicación de este fenómeno es la **fibra óptica**.

Es un largo tubo, parecido a un cable, formado por dos capas concéntricas de fibra de vidrio flexible, con distintos índices de refracción. El índice del núcleo ( $n_1$ ) es mayor que el del revestimiento ( $n_2$ ), de forma que un rayo que viaje por el núcleo de la fibra sufrirá reflexión total y se mantendrá dentro, siempre que el ángulo de incidencia sea siempre superior al ángulo límite

$$\alpha_L = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$

Estas fibras ópticas son flexibles, pueden doblarse hasta cierto punto, y pueden transmitir un mayor volumen de datos que los cables eléctricos (recordemos que la luz visible tiene una frecuencia en torno a  $10^{14}$  Hz, mientras que las señales eléctricas en los cables llegan apenas a  $10^9$  Hz).



### Refracciones sucesivas en superficies paralelas.

Supongamos un rayo de luz que atraviesa varios medios. En cada superficie de separación se producirá refracción, y aplicaremos la ley de Snell para calcular el ángulo de refracción en cada caso.

Si las superficies de separación entre los medios son paralelas entre sí, vemos que el ángulo con el que se refracta en un medio coincide con el ángulo con el que incide sobre el medio siguiente.

De esta forma, al aplicar la ley de Snell

Entre los medios 1 y 2:  $n_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2$

Entre los medios 2 y 3:  $n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2 = n_3 \cdot \text{sen } \alpha_3$

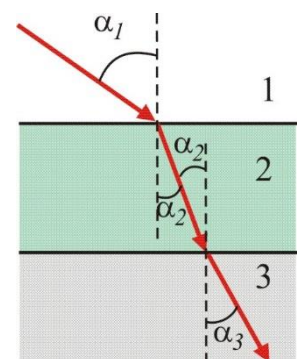
Por lo tanto:  $n_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2 = n_3 \cdot \text{sen } \alpha_3$

Esto se puede generalizar, independientemente de la cantidad de medios que atraviese la luz, siempre y cuando las superficies de separación sean paralelas.

$$n_{\text{inicial}} \cdot \text{sen } \alpha_{\text{inicial}} = n_{\text{final}} \cdot \text{sen } \alpha_{\text{final}}$$

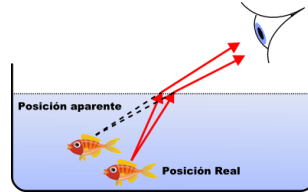
Un caso particular de esto ocurre cuando el medio inicial y final es el mismo, por ejemplo, un rayo de luz que atraviesa una lámina de vidrio de cara planas, y vuelve al aire. En ese caso  $n_1 = n_3 = n$

$n \cdot \text{sen } \alpha_1 = n \cdot \text{sen } \alpha_3 \Rightarrow \alpha_1 = \alpha_3$  El ángulo de emergencia coincide con el de incidencia. El rayo emergente será paralelo al incidente.



### Algunos efectos ópticos producidos por la refracción:

Cuando introducimos un lápiz, o una cuchara, en un vaso de agua, da la impresión de que se ha “partido” o “doblado”. También el fondo de una piscina, o un objeto sumergido en el agua, parece estar más cerca de la superficie de lo que está en realidad, o un pez en una pecera se verá, a través del cristal, más cerca de la pared de lo que está realmente. Estos efectos se deben a la refracción, y al hecho de que el índice de refracción del agua es mayor que el del aire. Los rayos que provienen del objeto, se desviarán formando un mayor ángulo con la normal. Nuestro cerebro interpreta esos rayos suponiendo que viajan en línea recta (prolongando los rayos hacia atrás) y parece que provienen de otro punto, más cercano a la superficie.

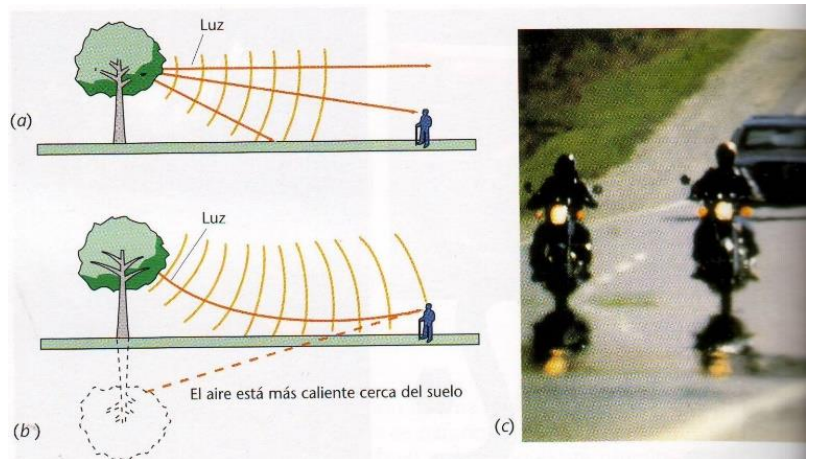


### 4. Óptica geométrica. Nociones fundamentales.

El principio fundamental que tendremos en cuenta en este estudio es que: **La luz se propaga en línea recta** mientras el índice de refracción del medio permanezca constante.

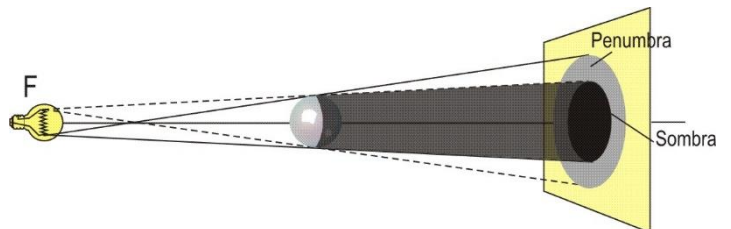
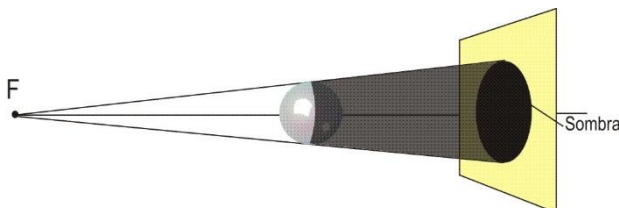
Los rayos de luz se desviarán:

- Al cambiar de medio (refracción).
- Si tenemos un medio con  $n$  variable (en el aire,  $n$  varía con la temperatura, sobre todo cerca del asfalto caliente, dando lugar al efecto “calzada mojada”).



Extraído de: Paul A. Tipler: Física para la ciencia y la ingeniería. 4ª Ed. Ed. Reverté, 1999

### Formación de sombras y penumbras:

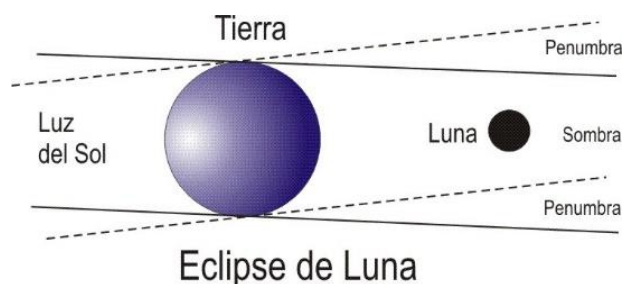
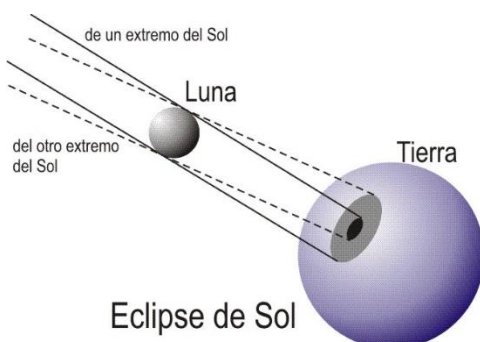


#### Para un foco puntual:

Los rayos provienen de un solo punto. Tenemos únicamente **sombra**.

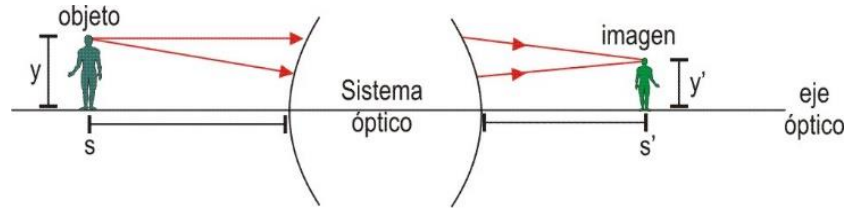
**Para un foco extenso** (el filamento de una bombilla, por ejemplo): Los rayos surgen de diferentes puntos. Consideramos los puntos extremos del filamento. Así limitamos la zona de **sombra** (nada de luz) y la zona de **penumbra** (algo de luz).

### Ejemplo: Eclipses de Sol y Luna



## Sistemas ópticos:

Conjunto de medios materiales, con diferentes índices de refracción, y que desvían la trayectoria de los rayos luminosos, produciendo imágenes. Estudiaremos las lentes y los espejos.



**Objeto:** Es el cuerpo del que salen los rayos que pasarán por el sistema óptico. Estudiaremos los rayos que salen de su punto más alto, ya que donde converjan (o de donde diverjan) estos, nos permitirá saber la posición y tamaño de la imagen.

$y$  : tamaño del objeto                       $s$  : posición del objeto (distancia desde el objeto al sistema óptico)

Siempre colocaremos el objeto a la izquierda del sistema óptico, y los rayos saldrán del objeto hacia la derecha.

**Imagen:** Es el conjunto de puntos donde convergen (se juntan) o divergen los rayos tras haber pasado por el sistema óptico.

$y'$  : tamaño de la imagen                       $s'$  : posición de la imagen

No existe un sistema óptico perfecto que produzca una imagen nítida y no distorsionada de un objeto de cualquier tamaño situado a cualquier distancia. Sin embargo, esta condición sí se cumple aproximadamente para sistemas ópticos cuyas superficies son porciones de esfera (cóncava o convexa), siempre que los rayos se alejen poco del eje óptico (es decir, que formen un ángulo pequeño). Esto es lo que se conoce como **aproximación paraxial**. Todos los casos que estudiaremos a partir de ahora cumplirán con estas condiciones.

## Características de la imagen obtenida:

La imagen puede ser:

- **Real:** Los rayos convergen (se juntan) 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) al salir del sistema óptico. No convergen en ningún punto, sino que "parece que provienen de un punto imaginario". Eso es la imagen virtual. La posición de la imagen virtual se obtiene prolongando "hacia atrás" los rayos que se separan. No se puede plasmar esta imagen en una pantalla o película de fotos. Hace falta un 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.

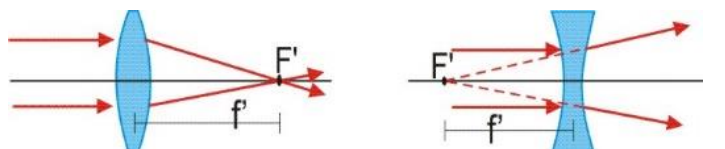
## Puntos focales o focos (F y F'):

A la hora de dibujar la trayectoria de los rayos, son de gran utilidad unos puntos, situados en el eje óptico, los Focos objeto (F) e imagen (F'). Las distancias desde estos puntos hasta el sistema óptico se denominan distancias focales ( $f$  y  $f'$ , respectivamente) (**Ojo, no confundir la distancia focal  $f$  con la frecuencia de la luz**).

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



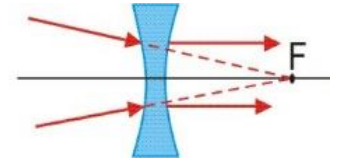
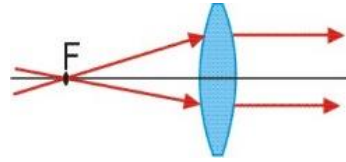
**Foco imagen ( F' ):** También está situado en el eje óptico. Los rayos que lleguen horizontales, al salir del sistema pasarán por este punto, o divergerán de él.



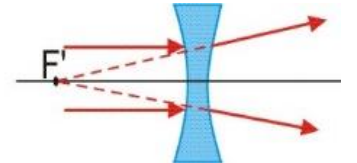
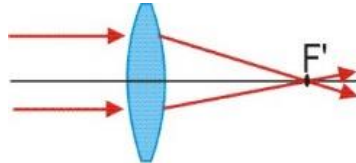
**Reglas a usar en el trazado de rayos:**

Sabemos que en un sistema óptico, todos los rayos que procedan de un punto del objeto van a converger (o separarse) en un punto de la imagen. Pero no es necesario dibujar todos los rayos, es suficiente con dos. Usaremos aquellos rayos para los que conocemos cómo se van a desviar y qué trayectoria van a seguir al salir del sistema óptico. Son estas reglas:

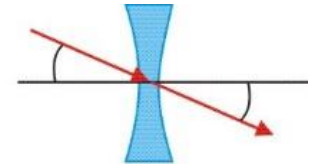
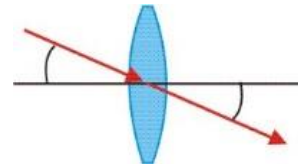
- Rayos que pasen por foco objeto F, o apunten hacia él, salen paralelos al eje óptico.



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



- Un rayo que apunte al centro del sistema óptico (vértice), sale con el mismo ángulo con el que llegó.



**Criterio de signos: Normas DIN**

Las normas DIN establecen un criterio de signos a la hora de medir y calcular las distancias. Para ello colocamos un sistema de referencia (O) en el centro del eje óptico (también llamado **vértice**, donde el eje óptico corta la lente o el espejo) y consideramos positivas aquellas distancias que estén a la derecha o hacia arriba del sistema de referencia, y negativas las que estén a la izquierda o abajo.

En el trazado de rayos, consideramos que el objeto está colocado siempre a la izquierda del sistema óptico, y que los rayos vienen desde la izquierda hacia la derecha.

Magnitudes que medimos:

$f$ : distancia focal (objeto): distancia desde la lente (o espejo) hasta el foco objeto.

$f'$ : distancia focal (imagen): distancia desde la lente (o espejo) hasta el foco imagen.

$s$ : posición del objeto (distancia objeto-lente o espejo). ( $s < 0$ , el objeto está siempre a la izquierda)

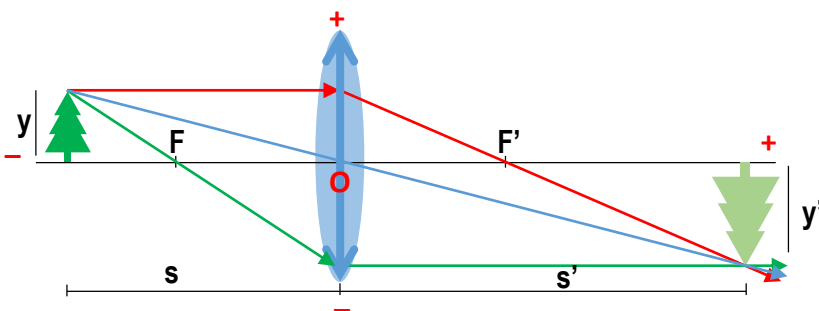
$s'$ : posición de la imagen (distancia imagen-lente o espejo).

$y$ : altura del objeto (normalmente  $y > 0$ ).

$y'$ : altura de la imagen.

Aumento lateral:  $\beta = \frac{y'}{y}$ . Si  $\beta > 0 \rightarrow$  imagen derecha Si  $\beta < 0 \rightarrow$  imagen invertida

¿Imagen real o virtual? Depende de dónde esté situada la imagen (el signo de  $s'$ ) y del tipo de sistema óptico (lente o espejo). Lo veremos más adelante, en cada caso.



(Un consejo: Más que aprenderse estos criterios de memoria, lo recomendable es realizar el problema con la ayuda de un diagrama de rayos que nos ayude a ver los signos de las magnitudes y si los rayos convergen o divergen)



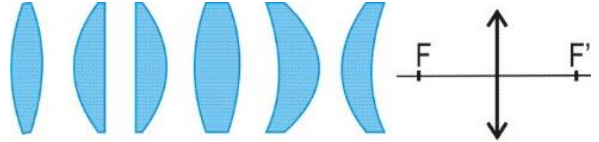
## 5. Lentes (dioptrios)

Medios transparentes con superficies curvas. En ellos la luz se refracta. Estudiaremos las lentes delgadas (consideramos despreciable su grosor)

### Lentes convergentes:

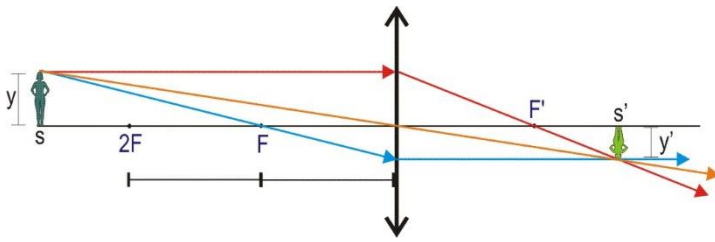
(En general, lentes convexas: plano-convexas, biconvexas...)

En una lente convergente el foco objeto  $F$  está a la izquierda ( $f < 0$ ), y el foco imagen  $F'$  a la derecha ( $f' > 0$ ).

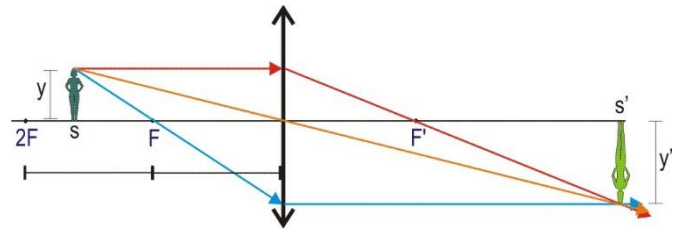


#### Trazado de rayos:

Con el objeto más alejado de la lente que el foco  $F$ : Los rayos convergen. La imagen producida es real e invertida.



Objeto más alejado que 2 veces la distancia focal: imagen menor que el objeto. Ejemplo: cámara de fotos.

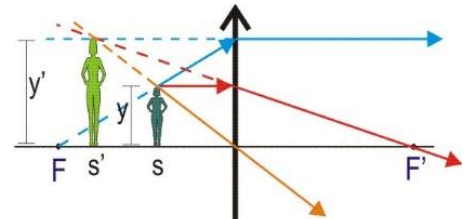


Objeto entre una y dos veces la distancia focal: Imagen mayor que el objeto. Ejemplo: proyector.

Con el objeto situado entre el foco y la lente:

Los rayos divergen. La imagen es virtual, derecha y mayor que el objeto.

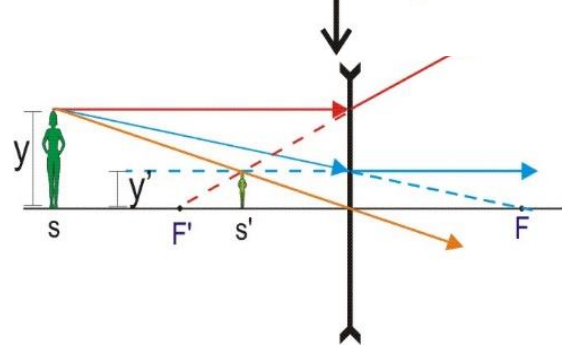
Ejemplo: Lupa.



### Lentes divergentes:

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

En una lente divergente el foco objeto  $F$  está a la derecha ( $f > 0$ ), y el foco imagen  $F'$  a la izquierda ( $f' < 0$ ).



Al separar los rayos, produce siempre imagen virtual, derecha y menor que el objeto, independientemente de la distancia  $s$  a la lente. Ejemplo: mirilla de una puerta.

### Ecuaciones de las lentes delgadas:

Consideramos que el medio que rodea a la lente es el mismo en el espacio objeto que en el imagen. Por lo tanto las distancias focales son iguales pero con distinto signo  $f' = -f$

Lente convergente:  $f < 0, f' > 0$

Lente divergente:  $f > 0, f' < 0$

Posición de la imagen: 
$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$$

Aumento lateral 
$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$$

La imagen producida por una lente es real si  $s' > 0$ . (los rayos convergen a la derecha de la lente)

La imagen producida por una lente es virtual si  $s' < 0$ . (los rayos divergen de un punto situado a la izquierda de la lente)

**Potencia de una lente:** La potencia de una lente se define como la inversa de la distancia focal  $f'$  (expresada en m). Mide la capacidad de hacer converger los rayos.

$$P = \frac{1}{f'}$$

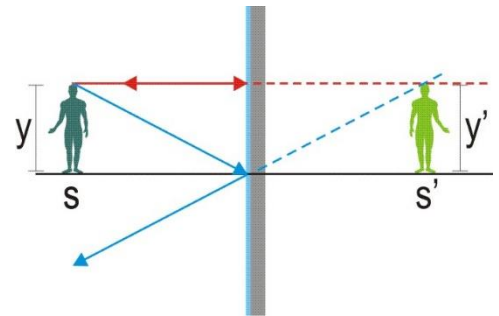
Se mide en *dioptrías* ( $D = m^{-1}$ ).

Lente convergente:  $P > 0$ . Divergente:  $P < 0$

## 6. Espejos (catoptrios):

En un espejo, al producirse la reflexión, cambia el sentido de propagación de los rayos  
 Los focos F y F' coinciden. Sólo hablaremos de una distancia focal, ya que  $f = f'$  (incluido el signo).

**Espejo plano:** Los focos están en el infinito  
 Imagen virtual de igual tamaño, derecha

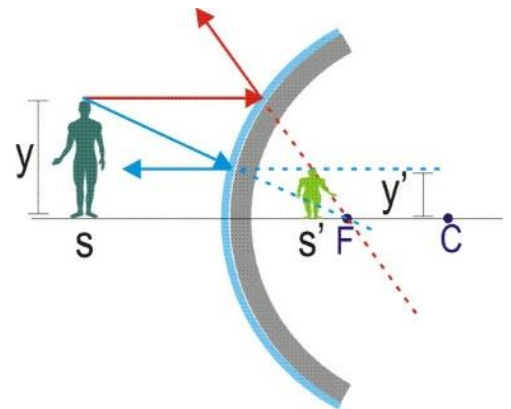


**Espejos esféricos:** El foco está en el punto medio entre el espejo y su centro (C). Siendo R el radio del espejo:

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

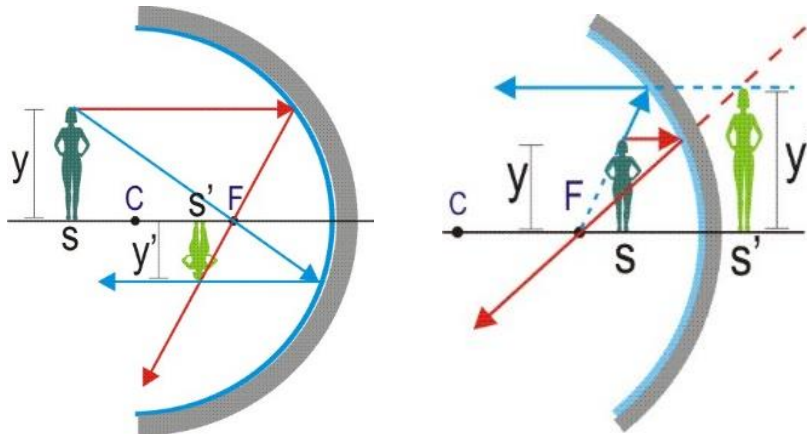
### Espejo convexo

En un espejo convexo, el foco F está por detrás del espejo. ( $f' > 0$ )  
 Al separar los rayos que provienen de un punto, siempre producirá una imagen virtual, derecha y de menor tamaño  
 Ejemplos: Espejo retrovisor exterior de coche, espejo de supermercado.



### Espejo cóncavo

En un espejo cóncavo, el foco F está por delante del espejo. ( $f' < 0$ )  
 Las características de la imagen producida dependerán de la posición del objeto.  
 Objeto más alejado que el foco: Imagen real, invertida. (Espejo de telescopio)  
 Objeto entre el foco y el espejo: Imagen virtual, derecha, mayor que el objeto. (Espejo de maquillaje)



### Ecuaciones de los espejos esféricos:

En los espejos coinciden los puntos focales objeto e imagen, por lo que  $f' = f$ .

Espejo cóncavo  $f' = f < 0$  (Foco a la izquierda)

Espejo convexo  $f' = f > 0$  (Foco a la derecha)

Posición de la imagen: 
$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$$

Aumento lateral 
$$\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

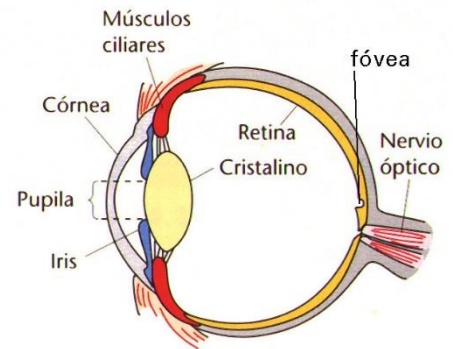
La imagen producida por un espejo es real si  $s' < 0$ . (Los rayos convergen a la izquierda del espejo)

La imagen producida por un espejo es virtual si  $s' > 0$ . (Los rayos divergen de un punto situado a la derecha del espejo)

## 7. 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.



Un modelo simplificado del ojo consiste en una única lente convergente de distancia focal variable, cuyo valor es de 1,7 mm cuando el cristalino está relajado (o “no acomodado”), de forma que rayos que provienen del infinito (paralelos) convergen en la retina.

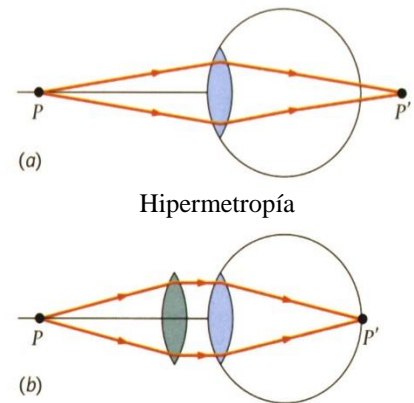
### Defectos de la visión:

Un ojo normal (ojo emétrope) 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.

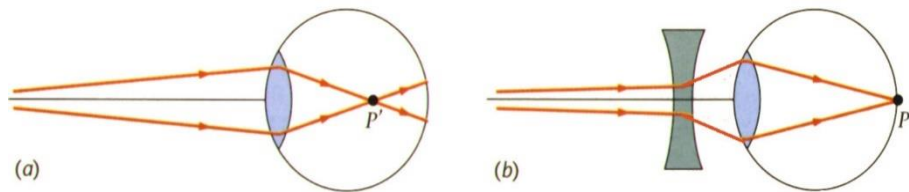
Si enfoca detrás de la retina, se habla de *hipermetropía*. Se corrige usando una lente convergente, como indica la figura.

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. Se corrige construyendo la lente con curvatura variable según la dirección.



Hipermetropía



Miopía

Extraído de: Paul A. Tipler: Física para la ciencia y la ingeniería. 4ª Ed. Ed. Reverté, 1999

## 8. 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 velocidad de la luz depende de la frecuencia. Esto trae como consecuencia que:

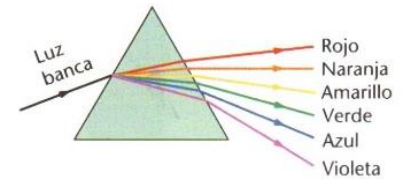
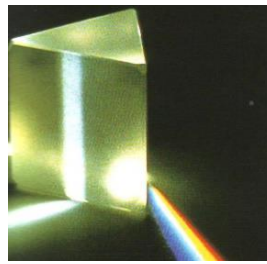
- Los diferentes colores (diferente frecuencia  $f$ ) se propagan a velocidad diferente.
- Cada color tiene su propio índice de refracción ( $n$ ), por lo que los ángulos de refracción serán diferentes. Es decir, los rayos de luz de distintos colores se separan (se dispersan) al pasar por el vidrio, o por el agua.

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

**Fenómenos relacionados con la dispersión:**

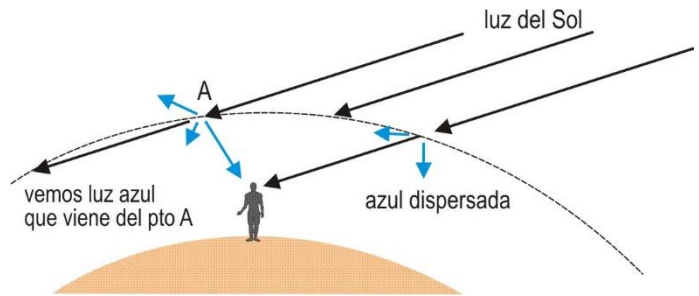
Descomposición de la luz en un prisma:

Al refractarse la luz blanca en la superficie de un vidrio, que es ligeramente dispersivo, los diferentes colores se separan, debido a que cada uno tiene un índice de refracción diferente. Si el prisma fuera de caras paralelas, al volver de nuevo al aire, los diferentes colores volverían a refractarse con el mismo ángulo y saldrían paralelos, con lo que no notaríamos la separación de los rayos, y veríamos luz blanca de nuevo. Pero la forma del prisma hace que los rayos se desvíen aún más a la salida, con lo que se van separando cada vez más.

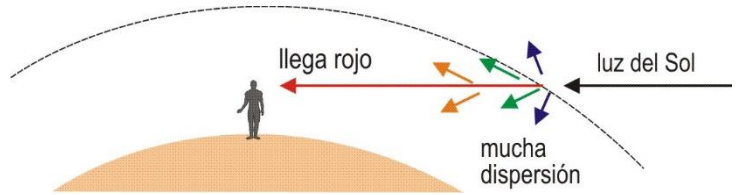


Extraído de: Paul A. Tipler: Física para la ciencia y la ingeniería. 4ª Ed. Ed. Reverté, 1999

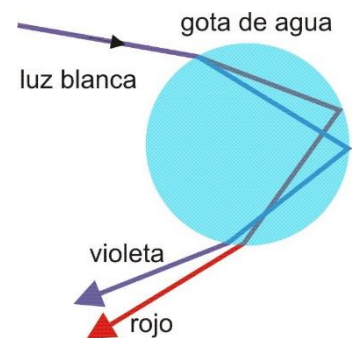
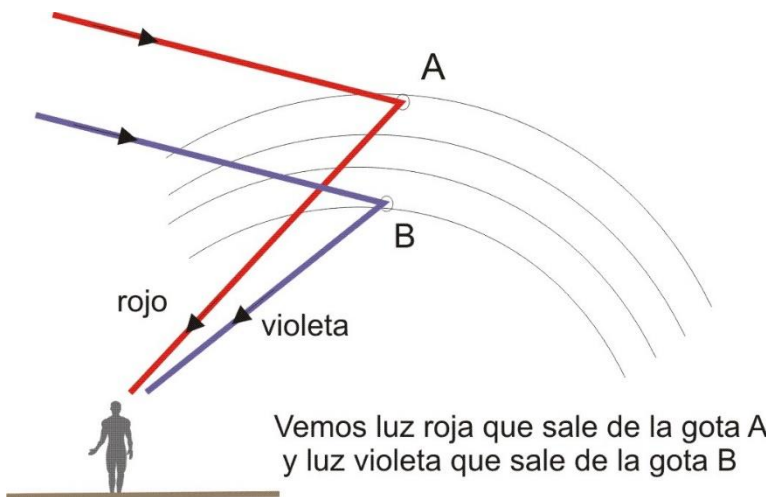
¿Por qué el cielo es azul? La luz azul es la que sufre más dispersión al entrar en la atmósfera. Si no se dispersara nada, veríamos el cielo negro incluso de día. Pero, debido a la dispersión, cuando miramos a un punto del cielo, vemos la luz que nos llega de él; y nos llega mayoritariamente luz azul,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



## Problemas tema 6: La luz y las ondas electromagnéticas

### 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.
  - Escriba la expresión del campo eléctrico de la onda electromagnética
  - Calcule 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. Determine la ecuación de onda que representa al campo eléctrico si la onda avanza en el eje OY, y el campo está polarizado en el eje Z. Calcule asimismo la dirección del campo magnético.
- Una antena emite una onda electromagnética de 50 kHz.
  - Calcule su longitud de onda.
  - Determine la longitud de onda de una onda sonora de la misma frecuencia.  
( $c = 3 \cdot 10^8$  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> ;  $n_{\text{aire}} = 1$ )
- 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)

### Refracción. Ley de Snell

- 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  $30^\circ$  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.  
( $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> ;  $n_{\text{aire}} = 1$ )
- Un rayo de luz amarilla de 580 nm en el aire, pasa a un cierto cristal en el que su longitud de onda es  $5 \cdot 10^{-7}$  m.
  - Calcular razonadamente frecuencia y velocidad de propagación en cada medio.
  - Si el rayo refractado forma  $30^\circ$  con la normal a la frontera que separa a los dos medios, ¿Con qué ángulo incidió el rayo? Razonar, realizando un esquema de rayos.  
( $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> ;  $n_{\text{aire}} = 1$ )
- Un haz de luz roja penetra en una lámina de vidrio, de 30 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ 
  - 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> ;  $n_{\text{aire}} = 1$  ;  $n_{\text{vidrio}} = 1,3$ )
- Un rayo de luz que se propaga por el agua tiene una longitud de onda de 600 nm en ese medio. Dicho rayo incide sobre un vidrio formando  $20^\circ$  con la normal. Calcule razonadamente:
  - Longitud de onda de la luz en el vidrio ¿Cambia de color el rayo de luz?
  - Ángulo que forman entre sí los rayos reflejado y refractado.  
( $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> ;  $n_{\text{agua}} = 1,33$  ;  $n_{\text{vidrio}} = 1,5$ )

## Óptica geométrica:

**10.** Tenemos una lente convergente de 10 cm de distancia focal. Colocamos un objeto de 1 cm a cierta distancia de la lente. Razonar las características de la imagen y calcular su tamaño y posición si:

- El objeto está a 15 cm de la lente.
- El objeto está a 5 cm de la lente.

**11.** Repetir el apartado a) del ejercicio anterior con una lente divergente de la misma distancia focal (en valor absoluto).

**12.** Colocamos un objeto a cierta distancia de una lente, observamos que se forma una imagen real, invertida y tres veces mayor que el objeto, situada a 20 cm de la lente. Razone si la lente es convergente o divergente, y calcule su distancia focal, y la posición del objeto. Realice el trazado de rayos correspondiente.

**13.** Un objeto de 10 cm de altura se coloca 0,5 m por delante de un espejo convexo de 2 m de radio. Realice el trazado de rayos y calcule razonadamente la posición de la imagen, su tamaño y características.

**14.** Repita el ejercicio anterior, pero con un espejo cóncavo, en lugar de convexo.

## Cuestiones aparecidas en las PEvAU

### Ondas electromagnéticas. Snell

#### 2024. Junio. C2

a) Un rayo de luz monocromática duplica su longitud de onda al pasar del medio 1 al medio 2. i) Determine razonadamente la relación entre los índices de refracción de los medios. ii) Deduzca si el rayo se acerca o aleja de la normal a la superficie y explique si puede darse la reflexión total.

b) Sobre una lámina de caras planas y paralelas, rodeada de aire, incide un rayo de luz monocromática formando un ángulo de  $80^\circ$  con la normal a las superficies de las láminas. La longitud de onda del rayo en la lámina vale  $\frac{3\lambda_0}{4}$ , siendo  $\lambda_0$  la longitud de onda en el aire. i) Halle el índice de refracción en la lámina. ii) Calcule el ángulo de refracción en la lámina y represente en un esquema la trayectoria del rayo. iii) Obtenga el espesor de la lámina sabiendo que el rayo tarda  $5,28 \cdot 10^{-10}$  s en atravesarla. Justifique sus respuestas.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}, \quad n_{\text{aire}} = 1$$

#### 2023. Junio. C2

a) Un rayo de luz monocromática duplica su velocidad al pasar de un medio a otro. i) Represente la trayectoria de un rayo que incide con un ángulo no nulo respecto a la normal, y justifique si puede producirse el fenómeno de la reflexión total. ii) Determine razonadamente la relación entre las longitudes de onda en ambos medios.

b) Un rayo de luz de  $8,22 \cdot 10^{14}$  Hz se propaga por el interior de un líquido con una longitud de onda de  $1,46 \cdot 10^{-7}$  m. i) Calcule su longitud de onda en el aire. ii) Calcule la velocidad del rayo en el líquido y el índice de refracción del líquido. iii) Si el rayo se propaga por el líquido e incide en la superficie de separación con el aire con un ángulo de  $10^\circ$  respecto a la normal, realice un esquema con la trayectoria de los rayos y calcule los ángulos de refracción y de reflexión.  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

#### 2021. Junio. C1

a) Un rayo de luz monocromática pasa de un medio de índice de refracción  $n_1$  a otro medio con índice de refracción  $n_2$ , siendo  $n_1 < n_2$ . Razone y justifique la veracidad o falsedad de las siguientes frases: i) La velocidad de dicho rayo aumenta al pasar del primer medio al segundo. ii) La longitud de onda del rayo es mayor en el segundo medio.

b) Sea un recipiente que contiene agua que llega hasta una altura de 0,25 m, y sobre la que se ha colocado una capa de aceite. Procedente del aire, incide sobre la capa de aceite un rayo de luz que forma  $50^\circ$  con la normal a la superficie de separación aire-aceite. i) Haga un esquema de la trayectoria que sigue el rayo en los diferentes medios (aire, aceite y agua), en el que se incluyan los valores de los ángulos que forman con la normal los rayos refractados en el aceite y en el agua. ii) Calcule la velocidad de la luz en el agua.

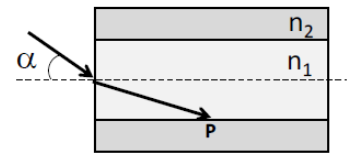
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; \quad n_{\text{aire}} = 1; \quad n_{\text{aceite}} = 1,47; \quad n_{\text{agua}} = 1,33$$

**2021. Julio. C.2.**

- a) Razone y justifique la veracidad o falsedad de las siguientes frases: i) Cuando la luz pasa de un medio a otro experimenta un aumento de su velocidad si el segundo medio tiene un índice de refracción mayor que el primero. ii) La reflexión total de la luz en la superficie de separación de dos medios puede producirse cuando el índice de refracción del segundo medio es mayor que el del primero.
- b) Un rayo de luz con componentes azul y roja de longitudes de onda en el aire de  $4,5 \cdot 10^{-7}$  m y  $6,9 \cdot 10^{-7}$  m, respectivamente, incide desde el aire sobre una placa de un determinado material con un ángulo de  $40^\circ$  respecto a la normal a la superficie de la placa. i) Mediante un esquema, y de manera razonada, indique la trayectoria de los rayos azul y rojo, tanto en el aire como en el material. ii) Deduzca cuál de las dos componentes (azul o roja) se propaga más rápidamente en el interior de la lámina. iii) Determine las frecuencias de los rayos en el aire.
- $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>;  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{material(azul)}} = 1,47$ ;  $n_{\text{material(roja)}} = 1,44$

**2019. Septiembre. B.3**

- a) El índice de refracción de un vidrio es mayor que el del aire. Razone cómo cambian las siguientes magnitudes al pasar un haz de luz del aire al vidrio: frecuencia, longitud de onda, y velocidad de propagación.
- b) Un rayo de luz de longitud de onda en el vacío de  $6,5 \cdot 10^{-7}$  m incide desde el aire sobre el extremo de una fibra óptica, formando un ángulo  $\alpha$  con el eje de la fibra (ver figura), siendo el índice de refracción dentro de la fibra  $n_1=1,5$ . La fibra está recubierta de un material de índice de refracción  $n_2=1,4$ . Determine: (i) La longitud de onda de la luz dentro de la fibra. (ii) El valor máximo del ángulo  $\alpha$  para que se produzca reflexión total interna en el punto P.
- $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>;  $n_{\text{aire}} = 1$



**2019. Suplente Septiembre. B.3**

- a) Razone la veracidad o falsedad de las siguientes frases utilizando, si procede, algún ejemplo: i) El espectro electromagnético está formado sólo por las ondas electromagnéticas que podemos percibir con nuestra vista. ii) Si al iluminar un objeto con luz blanca, lo vemos de color rojo, es debido a que el objeto absorbe las tonalidades rojas de la luz.
- b) Un rayo de luz monocromático de frecuencia  $6 \cdot 10^{14}$  Hz incide con un ángulo de  $35^\circ$  sobre la superficie de separación de dos medios con diferente índice de refracción. Sabiendo que la luz viaja por el primer medio a una velocidad de  $2,4 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> y que la longitud de onda en el segundo medio es de  $5 \cdot 10^{-7}$  m: i) Calcule el ángulo de refracción. ii) Determine el ángulo límite de incidencia a partir del cual se produciría la reflexión total.
- $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>

**2019. Reserva A. B.3.**

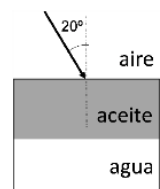
- a) Explique, con la ayuda de un esquema, en qué consiste el fenómeno de la dispersión de la luz blanca a través de un prisma de vidrio. ¿Ocurriría dicho fenómeno si la luz blanca incide perpendicularmente sobre una lámina de vidrio de caras plano paralelas? Razone su respuesta.
- b) Sobre una lámina de vidrio de caras plano paralelas de 0,03 m de espesor y situada en el aire incide un rayo de luz monocromática con un ángulo de incidencia de  $35^\circ$ . La velocidad de propagación del rayo en la lámina de vidrio es de  $2 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>. i) Determine el índice de refracción de la lámina de vidrio. ii) Realice un esquema con la trayectoria del rayo y determine el ángulo de emergencia. iii) Determine el tiempo que tarda el rayo en atravesar la lámina.
- $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>;  $n_{\text{aire}} = 1$

**Junio 2017. A.3**

- a) Explique la naturaleza de las ondas electromagnéticas e indique las distintas zonas en las que se divide el espectro electromagnético, indicando al menos una aplicación de cada una de ellas.
- b) Una antena de radar emite en el vacío radiación electromagnética de longitud de onda 0,03 m, que penetra en agua con un ángulo de incidencia de  $20^\circ$  respecto a la normal. Su velocidad en el agua se reduce al 80 % del valor en el vacío. Calcule el periodo, la longitud de onda y el ángulo de refracción en el agua. ( $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>)

**Junio 2017. B. 3**

- a) Enuncie las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz. Explique la diferencia entre ambos fenómenos.
- b) Sea un recipiente con agua cuya superficie está cubierta por una capa de aceite. Realice un diagrama que indique la trayectoria de los rayos de luz al pasar del aire al aceite y después al agua. Si un rayo de luz incide desde el aire sobre la capa de aceite con un ángulo de  $20^\circ$ , determine el ángulo de refracción en el agua. ¿Con qué velocidad se desplazará la luz por el aceite?
- $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>;  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{aceite}} = 1,45$ ;  $n_{\text{agua}} = 1,33$



## Óptica geométrica. Trazado de rayos

### 2024. Junio. C1

- a) i) Construya la imagen formada en un espejo cóncavo para un objeto situado a una distancia del espejo mayor que su radio de curvatura, explicando el trazado de rayos correspondiente. ii) Indique y justifique las características de la imagen.
- b) Un objeto de 4 cm se sitúa a 36 cm de una lente delgada convergente de distancia focal 12 cm. i) Calcule la posición y el tamaño de la imagen, indicando el criterio de signos aplicado. ii) Realice el trazado de rayos e indique las características de la imagen

### 2023. Junio. C1.

- a) Con una lente delgada queremos obtener una imagen virtual mayor que el objeto. Realice razonadamente el trazado de rayos correspondiente, justifique qué tipo de lente debemos usar y dónde debe estar situado el objeto.
- b) Sobre una pantalla se desea proyectar la imagen de un objeto que mide 5 cm de alto. Para ello contamos con una lente delgada convergente, de distancia focal 20 cm, y una pantalla situada a la derecha de la lente, a una distancia de 1 m. i) Indique el criterio de signos usado y determine a qué distancia de la lente debe colocarse el objeto para que la imagen se forme en la pantalla. ii) Determine el tamaño de la imagen. iii) Construya gráficamente la imagen del objeto formado por la lente.

### 2022. Junio. C.2.

- a) Realice y explique el trazado de rayos para un objeto situado entre el foco objeto y una lente convergente. Justifique las características de la imagen.
- b) Un objeto de 30 cm de altura se coloca a 2 m de distancia de una lente delgada divergente. La distancia focal de la lente es de 50 cm. Indicando el criterio de signos aplicado, calcule la posición y el tamaño de la imagen formada. Realice razonadamente el trazado de rayos y justifique la naturaleza de la imagen.

### 2021. Junio. C.2.

- a) Con una lente queremos obtener una imagen virtual mayor que el objeto. Razone, realizando además el trazado de rayos correspondiente, qué tipo de lente debemos usar y dónde debe estar situado el objeto.
- b) Un objeto de 30 cm de alto se encuentra a 60 cm delante de una lente divergente de 40 cm de distancia focal. i) Calcule la posición de la imagen. ii) Calcule el tamaño de la imagen. iii) Explique, con ayuda de un diagrama de rayos, la naturaleza de la imagen formada. Justifique sus respuestas.

### 2020. Julio (convocatoria ordinaria). 3

- a) Determine, mediante trazado de rayos, la imagen que se produce en una lente convergente para un objeto situado a una distancia de la lente: i) Entre una y dos veces la distancia focal. ii) A más de dos veces la distancia focal. Indique, razonadamente, la naturaleza de la imagen en ambos casos.
- b) Situamos un objeto de 0,4 m de altura a 0,2 m de una lente convergente de 0,6 m de distancia focal. i) Realice la construcción geométrica del trazado de rayos. ii) Calcule de forma razonada: la posición, el tamaño y la naturaleza de la imagen formada.

### 2019. Junio A. 3

- a) Construya, razonadamente, la imagen de un objeto situado delante de una lente convergente a una distancia mayor que el doble de la distancia focal. A partir de la imagen obtenida indique, razonadamente, las características de la misma: real o virtual, si está derecha o invertida y su tamaño.
- b) A 4 m delante de una lente divergente se sitúa un objeto de tamaño 1 m. si la imagen se forma delante de la lente a una distancia de 1 m, calcule: i) la distancia focal justificando el signo obtenido. ii) Tamaño de la imagen indicando si está derecha o invertida respecto al objeto.

### Junio 2018. B. 3

- a) Explique dónde debe estar situado un objeto respecto a una lente delgada para obtener una imagen virtual y derecha: i) Si la lente es convergente; ii) si la lente es divergente. Realice en ambos casos las construcciones geométricas del trazado de rayos e indique si la imagen es mayor o menor que el objeto.
- b) Un objeto luminoso se encuentra a 4 m de una pantalla. Mediante una lente situada entre el objeto y la pantalla se pretende obtener una imagen del objeto sobre la pantalla que sea real, invertida y tres veces mayor que él. Determine el tipo de lente que se tiene que utilizar, así como su distancia focal y la posición en la que debe situarse, justificando sus respuestas.



**2019. Suplente Junio. A.3**

- a) Construya, razonadamente, la imagen de un objeto situado entre el foco y el centro de una lente convergente. A partir de la imagen obtenida indique, razonadamente, las características de la misma: real o virtual, si está derecha o invertida y su tamaño.
- b) A 2 m delante de una lente divergente se sitúa un objeto de tamaño 0,5 m. Si la distancia focal es de 1 m, calcule:  
i) La distancia de la imagen a la lente indicando si es real o virtual. ii) Tamaño de la imagen indicando si está derecha o invertida.

**2019. Suplente Septiembre. A.3**

- a) Construya, razonadamente, la imagen de un objeto situado entre  $f$  y  $2f$  delante de una lente divergente. A partir de la imagen obtenida indique, razonadamente, las características de la misma: real o virtual, si está derecha o invertida y su tamaño.
- b) Situamos delante de una lente convergente un objeto que genera una imagen que se forma a 1 m delante de la lente, siendo la misma de tamaño 0,5 m. Si la distancia focal vale 2 m, calcule: i) La distancia a la que se encuentra el objeto de la lente. ii) Tamaño del objeto indicando si está derecho o invertido con respecto a la imagen.

**2019. Reserva A. A.3**

- a) Construya, razonadamente, la imagen de un objeto situado delante de una lente divergente, y a una distancia menor que la distancia focal. A partir de la imagen obtenida indique, razonadamente, las características de la misma: real o virtual, si está derecha o invertida y su tamaño.
- b) A 0,5 m delante de una lente convergente se sitúa un objeto de tamaño 0,25 m. Si la distancia focal vale 1 m, calcule: i) La distancia de la imagen a la lente indicando si es real o virtual. ii) Tamaño de la imagen, indicando si está derecha o invertida.

**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)  $f_{\text{rojo}} = 3,85 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  ;  $f_{\text{violeta}} = 7,89 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$       ambas a igual velocidad, si no hay dispersión.  
b)  $\lambda_{\text{rojo}} = 584 \text{ nm}$  ;  $\lambda_{\text{violeta}} = 285 \text{ nm}$
5.  $f = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  ;  $k = 12,57 \cdot 10^6 \text{ rad/m}$  ;      b)  $n = 4/3$  ;  $f$  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:  $f = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  ;      En cristal:  $f = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $v = 2,6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$   
b)  $\alpha_1 = 35,24^\circ$
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.  $s' = -0,033 \text{ m}$ ,  $y' = 0,0066 \text{ m}$   
b) 1) im. real, invertida.  $s' = 0,17 \text{ m}$  ,  $y' = -0,011 \text{ m}$  ; 2) im. virtual, derecha.  $s' = -0,13 \text{ m}$ ,  $y' = 0,026 \text{ m}$

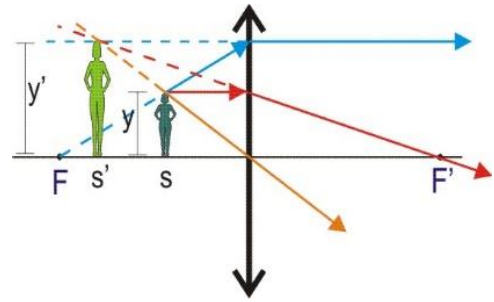
## Anexo. Instrumentos ópticos:

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



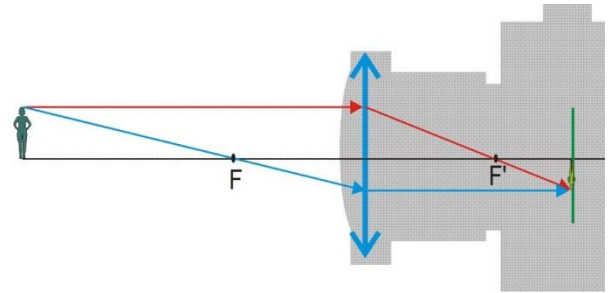
**Cámara fotográfica:**

Consiste en una cámara oscura con una lente (o sistema de lentes) convergente móvil.

El objeto está más alejado de la lente que  $2:f$

- 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:**

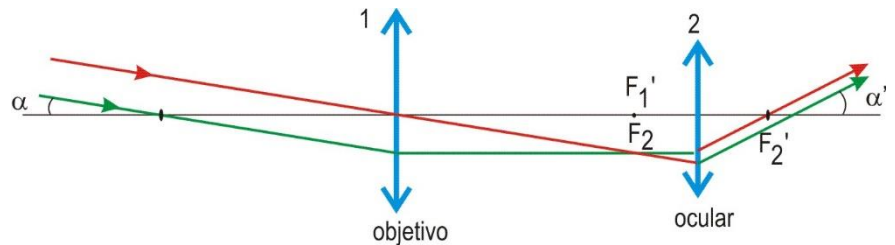
- Sistemas compuestos
- Objetivo : puede ser lente (telescopio refractor) o espejo (telesc. reflector)
  - Ocular: siempre es una lente.

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

**Anteojo astronómico:**

Posee dos lentes convergentes.

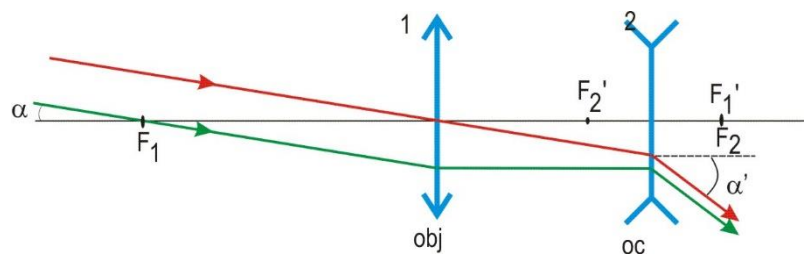
- Imagen
- Virtual (en el  $\infty$ )
  - Invertida
  - Mayor que el objeto



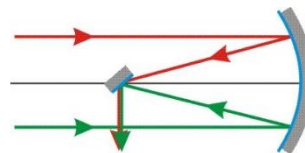
**Anteojo de Galileo:**

El ocular es una lente divergente

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



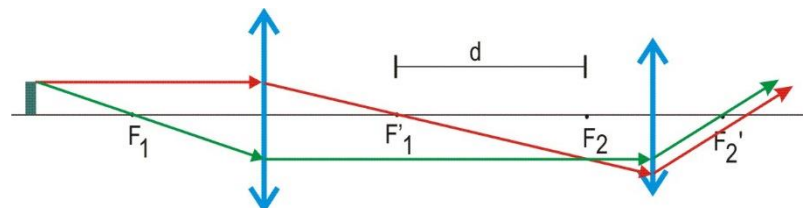
**Telescopio reflector:** El objetivo es un espejo cóncavo



**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  $F_2$ .