

TEMA 4: LA LUZ Y LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS RVREC

- 4.1 Introducción histórica: modelos corpuscular y ondulatorio.
- 4.2 Ondas electromagnéticas. Espectro electromagnético.
- 4.3 Óptica física. Modelos corpuscular y ondulatorio. Propiedades de la luz.
- 4.4 Óptica geométrica. Formación de imágenes en lentes y espejos.

4.1 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.

4.2 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**.

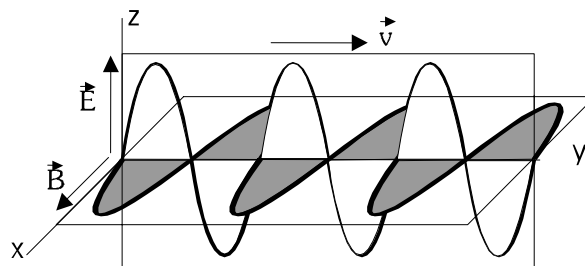
Características de las ondas electromagnéticas (o.e.m):

- 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 ν (o su longitud de onda λ).

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 λ). Hay que tener en cuenta que ν y λ son inversamente proporcionales $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

| ν (Hz) | Radiación | λ (m) |
|------------|---------------------------------|---------------|
| 10^{22} | Rayos γ | 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

| ν (Hz) | Color | λ (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.

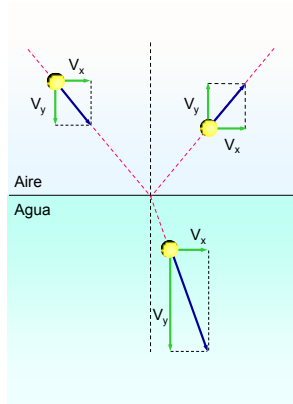
Rayos ultravioleta. Son producidas por oscilaciones de los electrones más internos. Su longitud de onda está comprendida entre 4000 A y 30 A. Se emplean en medicina, por su poder ionizante. Son los responsables de las quemaduras por el sol y de la aparición de los cánceres de piel. El Sol es un poderoso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

4.3 ÓPTICA FÍSICA

Modelo corpuscular de la luz



- La naturaleza corpuscular de la luz y la teoría de la emisión estaba avalada por Newton.
- La fuente luminosa emitía partículas de diferente tamaño y tenían diferente disposición al pasar de un medio a otro, para ser reflejadas o para penetrar en un medio.
- Sus métodos mecánicos le condujeron a conclusiones erróneas, al afirmar que la velocidad de la luz era superior en el agua que en el aire.

Modelos ondulatorios de Huygens y Fresnel

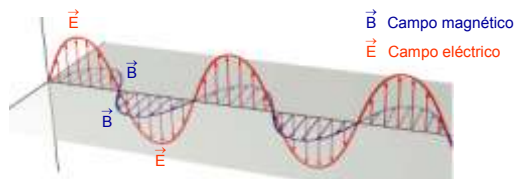
Modelo ondulatorio de Huygens

- En 1690 publicó su teoría sobre la propagación de la luz como un movimiento ondulatorio que necesitaba de un medio material llamado éter, para propagarse.
- Desechaba la posibilidad de que se tratara de un movimiento corpuscular ya que dos haces de luz podían cruzarse sin estorbarse.
- Su mayor error fue considerar la ondas de luz longitudinales, como las del sonido.

Modelo ondulatorio de Fresnel

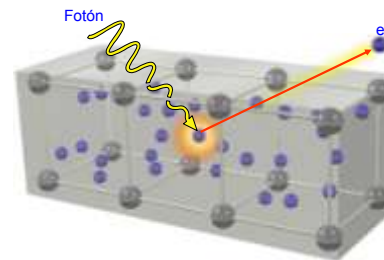
- Estableció que las vibraciones en la luz no pueden ser longitudinales, sino que deben ser perpendiculares a la dirección de propagación, y por tanto transversales.
- Basándose en este concepto enunció matemáticamente la ley de la reflexión.

Modelo ondulatorio de Maxwell



- James Clerk Maxwell demostró que las ondas luminosas son electromagnéticas, del tipo de las ondas de radio, y no necesitan medio alguno para propagarse.
- La frecuencia de las ondas luminosas es mucho mayor que las de radio, e impresionan la retina del ojo.

Efecto fotoeléctrico



Consiste en la obtención de electrones libres de un metal cuando sobre este incide un haz de luz.

- Un aumento de la intensidad luminosa no suponía un incremento de la energía cinética de los electrones emitidos.
- La luz interacciona con los electrones de la materia en cantidades discretas que se denominan cuantos.
- La energía de un cuanto es: $E = h \nu$ siendo ν la frecuencia y h la constante de Planck cuyo valor es $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s

Índice de refracción

- **Índice de refracción n** de un medio es el cociente entre la velocidad de propagación de las ondas luminosas en el vacío (**c**) y la velocidad de propagación en dicho medio (**v**):

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

- Puede definirse el **índice de refracción relativo** entre dos medios como:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

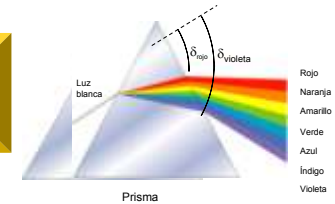
tomándose en general al vacío como medio 1

El **camino óptico C** es el espacio que recorrería la luz en el vacío durante el mismo tiempo que en un medio de índice de refracción **n**, invierte en recorrer una distancia **r**.

$$C = n r$$

Dispersión y absorción de la luz

La **dispersión de la luz** es la separación de un rayo de luz en sus componentes debido a su diferente índice de refracción.

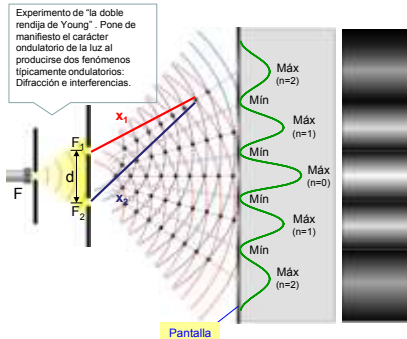


La **absorción de la luz** consiste en la transformación de la energía luminosa en otro tipo de energía, al propagarse la luz por un medio.

- La absorción puede ser **general** cuando el medio absorbe totalmente la radiación y el medio se ve de color **negro**, o **selectiva** si se absorben todas las radiaciones excepto la del **color del que se ven**.

-5-

Interferencias



- Las **franjas oscuras** corresponden a ondas que llegan en **oposición de fase (interferencia totalmente destructiva)**. Se produce cuando:

$$x_2 - x_1 = \frac{(2n+1) \lambda}{2}$$

- Se forma una **banda de interferencias** con una serie de franjas paralelas claras y oscuras.
- Se observa que **luz más luz puede dar oscuridad**.
- La diferencia de caminos entre los rayos que parten de ambas rendijas y llegan a un mismo punto de la pantalla es: $d \sin \theta$
- Las **franjas iluminadas (interferencia totalmente constructiva)** corresponden a ondas que llegan en fase.

$$x_2 - x_1 = n\lambda$$

Difracción

La **difracción** es el cambio en la dirección de propagación que sufre una onda, sin cambiar de medio, cuando se encuentra un obstáculo en su camino.



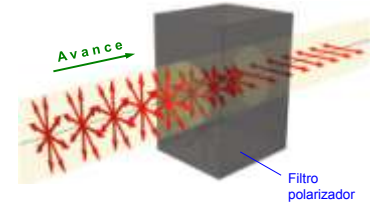
- Para poder observar este fenómeno, las dimensiones del objeto deben ser del mismo orden o menor que la longitud de onda.
- El **principio de Huygens** permite explicar el fenómeno de la difracción.
- Al llegar a la abertura, los puntos del frente de onda actúan como emisores de ondas elementales. El frente de la nueva onda queda determinado por la relación entre el tamaño de la longitud de onda y el obstáculo.
- Podemos recibir un sonido cuando tenemos un obstáculo delante que nos impide ver la fuente. La longitud de onda del **sonido** se encuentra **entre 2 cm y 20 m** y puede salvar obstáculos de estas dimensiones.
- Para la **luz**, la longitud de onda es del orden de 10^{-7} m.

Polarización de la luz

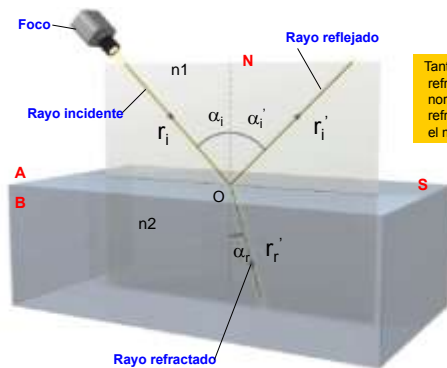
- La polarización solo puede presentarse en los movimientos ondulatorios de **vibración transversal**.
- Es una propiedad exclusiva de las ondas transversales que consiste en la **vibración del campo eléctrico y del magnético** en una dirección preferente sobre las demás.
- En general **las ondas electromagnéticas no están polarizadas**, lo que significa que el campo eléctrico y el magnético pueden vibrar en cualquiera de las infinitas direcciones que son perpendiculares a la dirección de propagación.
- Se produce la **polarización** cuando se consigue que la **vibración** se realice en una **dirección determinada**.
- Para estudiar el fenómeno, **se observa la dirección de vibración del campo eléctrico** pues el magnético, por ser perpendicular al eléctrico y a la dirección de propagación, queda fijado automáticamente.

Polarización por absorción selectiva

- Es un método de polarización que consiste en la **absorción de la luz que vibra en todas las direcciones menos en una**.
- Tras atravesar la luz determinadas sustancias, **la vibración en un plano se mantiene**, mientras que en el resto de los planos, está tan atenuada que no se percibe.
- Este efecto se produce en aquellos materiales sintéticos denominados **polaroides**, y tienen gran poder antirreflectante.
- Las **turmalinas** son unos minerales que producen el mismo efecto que los polaroides.



Reflexión y refracción de la luz



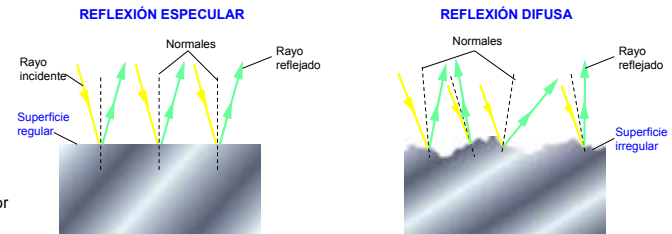
Tanto en la reflexión como en la refracción, el rayo incidente, la normal y los rayos reflejados o refractados se encuentran en el mismo plano.

Cuando $n_1 > n_2$ se puede dar la situación de ángulo límite, entonces se produce la llamada reflexión total; no existiría refracción. Esto se produce de la siguiente forma: Se va aumentando α_i , por lo tanto, aumenta también α_r . Llega un momento que para un determinado valor de α_i (ángulo límite) α_r valdría 90° , por lo que no existiría refracción y sólo se produciría reflexión: es la llamada reflexión total

Reflexión de la luz

La **reflexión** es el fenómeno por el cual el **rayo incidente sigue propagándose** por el medio de incidencia. Este fenómeno permite ver objetos no luminosos.

- Dependiendo del tipo de superficie, lisa o irregular, la reflexión será **especular**, o **difusa**.



En cualquier caso, el ángulo que forma el rayo incidente con la normal (α_i), es **igual** al formado por la normal y el reflejado (α_r).

4.4 ÓPTICA GEOMÉTRICA

Refracción de la luz

La **refracción** es la desviación que experimenta la dirección de propagación de la luz cuando pasa de un medio a otro en el que su velocidad es distinta.

- La luz que procede de objetos situados en otros medios, hace que debido a este fenómeno, **parezca que estén situados en otra posición**.
- Esta ley fue la enunció **Willebord Snell**, astrónomo y matemático holandés en 1620.

Ley de Snell: Cuando la luz pasa de un medio de índice de refracción n_1 a otro medio de índice de refracción n_2 , los ángulos de incidencia α_1 y de refracción α_2 cumplen la relación:
 $n_1 \text{ sen } \alpha_1 = n_2 \text{ sen } \alpha_2$

- En la mayoría de los casos, el medio de incidencia es el aire cuyo índice de refracción (n_1) es prácticamente la unidad.

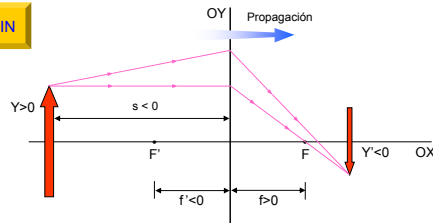
Conceptos básicos de óptica geométrica

- Óptica geométrica** es la parte de la física que estudia la trayectoria de la luz cuando experimenta reflexiones y refracciones en la superficie de separación entre medios.
- Sistema óptico** es un conjunto de medios materiales limitados por superficies de cualquier naturaleza.
- Modelo de rayo de luz** es un modelo que supone que la luz no se difracta y consiste en una línea de avance perpendicular al frente de onda.

| | | |
|----------------|--|--|
| Los rayos son | <ul style="list-style-type: none"> Reversibles en su propagación Independientes de otros rayos | |
| Sistema óptico | <ul style="list-style-type: none"> Estigmático Astigmático Centrado | |
| Las imágenes | Según su naturaleza | <ul style="list-style-type: none"> Reales Virtuales |
| | Según su posición | <ul style="list-style-type: none"> Derechas Invertidas |

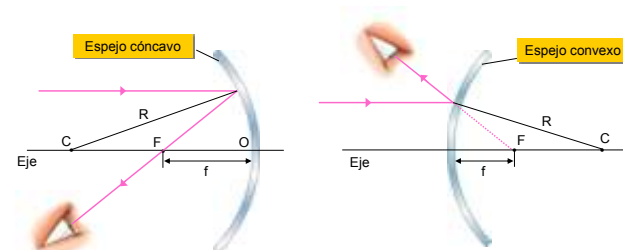
Convenio de signos

Normas DIN



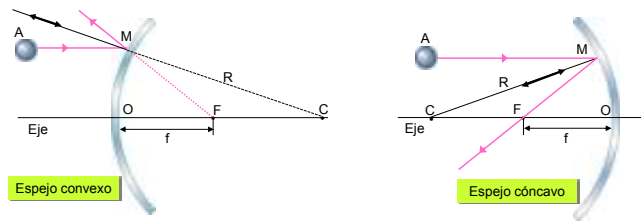
- Las magnitudes que hacen referencia a la imagen son las mismas que las referidas al objeto añadiéndoles el signo <<prima>>.
- La luz siempre se propaga de izquierda a derecha.
- En la dirección OX, las distancias son positivas hacia la derecha del vértice del sistema óptico, y negativas en caso contrario.
- En la dirección OY, las magnitudes medidas por encima del eje óptico son positivas, y las medidas por debajo, negativas.

Elementos de un espejo esférico



- C: Centro de curvatura
- R: Radio de curvatura
- O: Centro del espejo
- F: Foco
- f: Distancia focal
- Eje: Eje principal o eje óptico

Distancia focal de un espejo esférico



Espejo convexo

Espejo cóncavo

$f = \frac{R}{2}$ La **distancia focal de un espejo esférico** es igual a la mitad del radio de curvatura.

Para un espejo cóncavo, la expresión es equivalente, pero al ser el radio negativo, también lo será la distancia focal.

Ecuación del espejo plano

- Al igual que en el dioptrio plano, el **espejo plano** es un caso especial del esférico. Basta considerar que su radio es infinito para obtener sus ecuaciones.

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{\infty} \Rightarrow s' = -s$$

- El aumento lateral será: $A = -\frac{s'}{s} = -\frac{-s}{s} = 1$

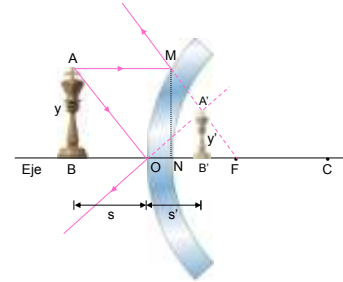
La **imagen** que produce un espejo plano de un objeto real es virtual, está situada a la misma distancia que el objeto, es derecha y tiene su mismo tamaño.

Ecuación de los espejos esféricos

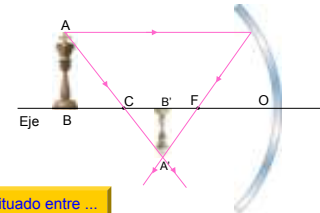
- Dos rayos parten del extremo A.
- El rayo AM se refleja y su prolongación pasa por F. El rayo AO se refleja y su prolongación corta a la prolongación del rayo AM en A'.
- El cociente entre los tamaños objeto e imagen se llama **aumento lateral A o ML**:

$$A = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$



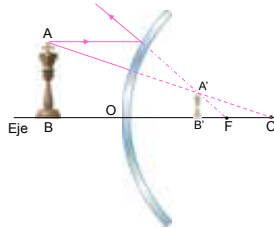
Formación de imágenes con espejos cóncavos



Si el objeto está situado entre ...

- el infinito y el centro de curvatura, la imagen es **real, invertida y menor** que el objeto.
- el centro de curvatura y el foco, la imagen es **real, invertida y de mayor** tamaño.
- el foco y el espejo, las prolongaciones de los rayos reflejados forman la imagen **virtual, derecha y de mayor tamaño**.

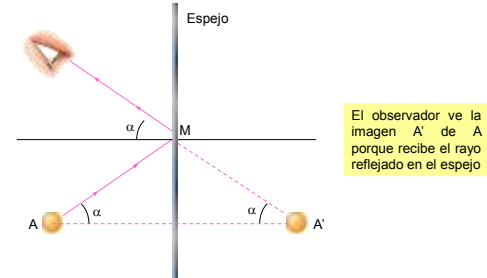
Formación de imágenes con espejos convexos



Independientemente del lugar donde se coloque el objeto ...

- El espejo convexo **siempre produce el mismo tipo de imágenes**
- Las imágenes de los objetos son **siempre virtuales, derechas y de menor tamaño** que el objeto

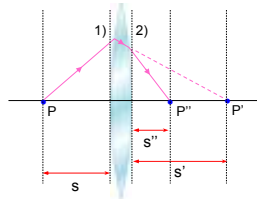
Formación de imágenes con espejos planos



- La formación de imágenes en espejos planos se rigen por las **leyes de la reflexión**.

La imagen formada por un espejo plano es **virtual y simétrica** respecto al plano del espejo.

Lentes delgadas



- Una lente es un **material transparente limitado por dos superficies esféricas**, o por una esférica y una plana.
- Una lente puede considerarse como la **asociación de dos dioptros**.
- Si el espesor de la lente en el eje óptico es despreciable frente a los radios de las caras de la lente, la lente se denomina delgada.

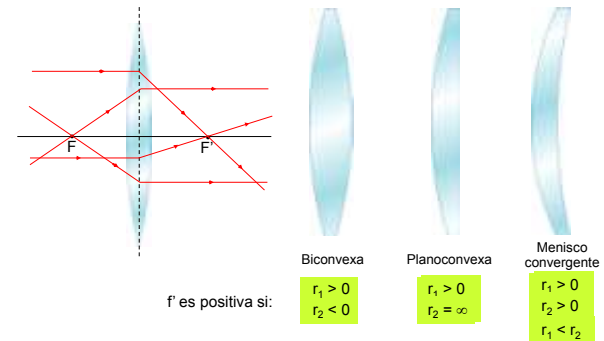
• La llamada **ecuación del fabricante de lentes** es: $-\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

• En las lentes delgadas $f = -f'$, resultando: $\frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s}$

• Las lentes se especifican indicando el valor de su **potencia**, cuyo valor es: $P = \frac{1}{f'}$
Su unidad es la **dioptría** ($1 D = 1 m^{-1}$)

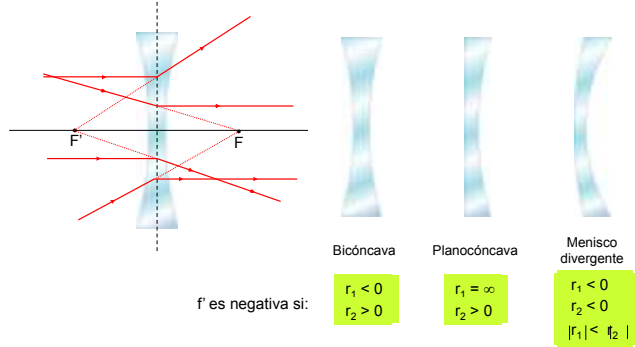
Lentes convergentes

- Una lente es **convergente** cuando la distancia focal imagen, **f', es positiva**.



Lentes divergentes

- Una lente es **divergente** cuando la distancia focal imagen, **f' , es negativa**.

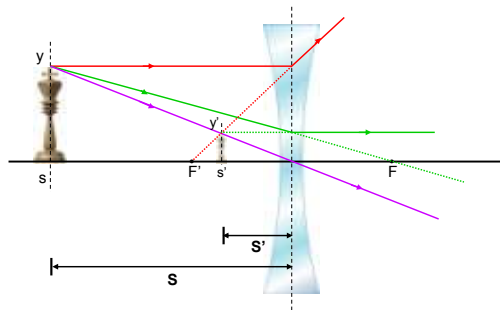


Formación de imágenes en lentes

- El comportamiento de las lentes depende de que sean convergentes o divergentes y además, de la situación del objeto con respecto a ellas.
- Los puntos situados sobre el eje del sistema, tienen su imagen en éste.
- De los infinitos rayos que pasan por un punto A del objeto **basta tomar dos** que converjan en un punto, que será la imagen A'. Aún así, es fácil dibujar tres rayos:
 - El rayo que incide paralelo al eje se desvía y pasa por el foco imagen F' . Si la lente es divergente, por F' pasa la prolongación del rayo emergente.
 - El rayo que pasa por el foco objeto F sale paralelo al eje.
 - El rayo que pasa por el centro de la lente no sufre desviación.

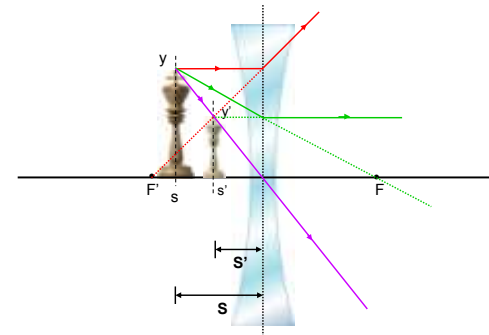
Formación de imágenes por lentes divergentes (I)

OBJETO LEJANO objeto situado a una distancia de la lente superior a la focal ($s > f$)



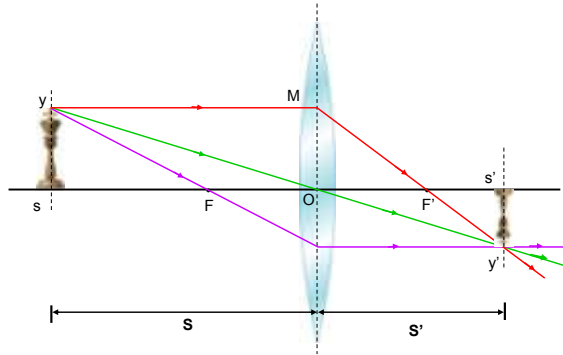
Formación de imágenes por lentes divergentes (II)

OBJETO ENTRE EL FOCO Y LALENTE ($s < f$)



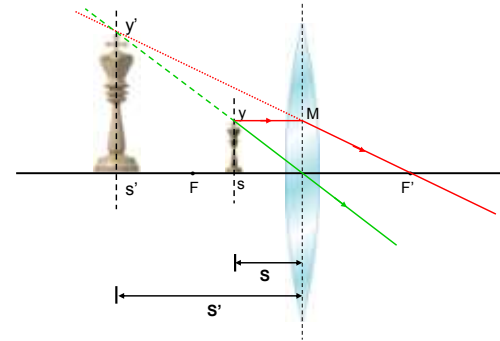
Formación de imágenes por lentes convergentes (I)

OBJETO LEJANO objeto situado a una distancia de la lente superior a la focal ($s > f$)



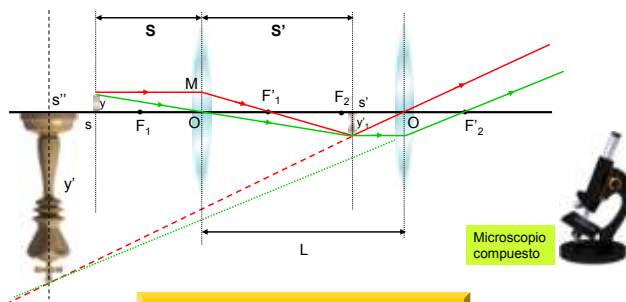
Formación de imágenes por lentes convergentes (II)

OBJETO ENTRE EL FOCO Y LA LENTE ($s < f$)



Combinación de lentes

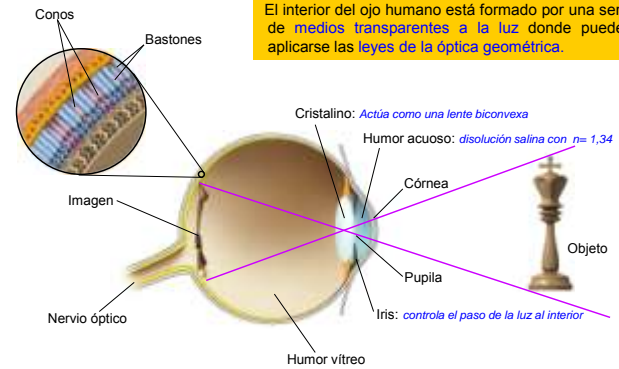
• La imagen formada por la primera y_1' hace de objeto para la segunda, que produce la imagen final y' .



El aumento total es el cociente entre el tamaño de la imagen final y el del objeto.

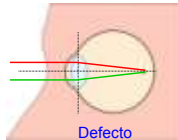
Óptica de la visión

El interior del ojo humano está formado por una serie de medios transparentes a la luz donde pueden aplicarse las leyes de la óptica geométrica.



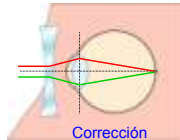
Defectos y correcciones de la visión

MIOPIA



Defecto

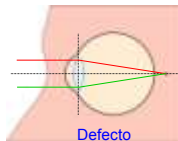
La imagen se forma por delante de la retina



Corrección

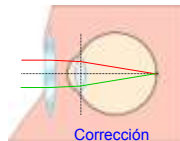
Mediante una lente divergente se consigue un enfoque correcto

HIPERMETROPIA



Defecto

La imagen se forma por detrás de la retina



Corrección

Mediante una lente convergente se consigue un enfoque correcto