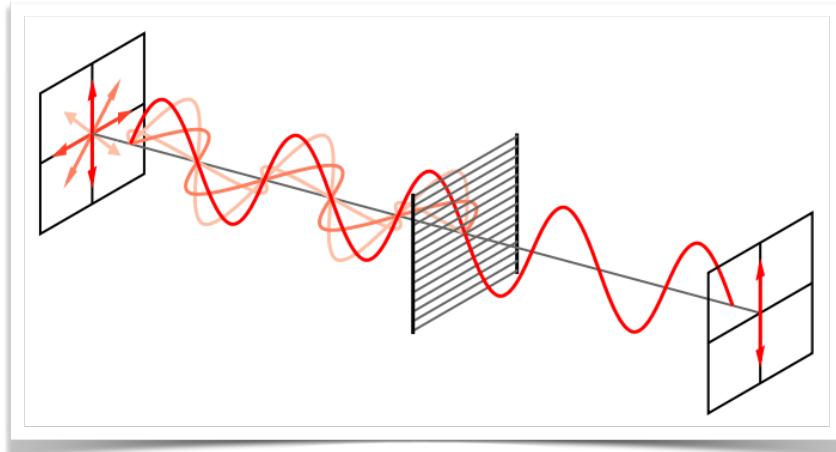


# T.8. LA LUZ Y SUS PROPIEDADES



1. Controversia sobre la naturaleza de la luz	3
1.1 Teoría corpuscular de Newton	3
1.2 Teoría ondulatoria de la luz	3
1.3 Teoría moderna sobre la naturaleza de la luz	5
2. Espectro electromagnético	7
3. Principio de Huygens	10
4. Fenómenos ondulatorios	12
4.1 Reflexión y refracción	12
4.2 Dispersión de la luz	16
4.3 Interferencia	19
4.4 Difracción	20
4.5 Polarización	21
5. Óptica geométrica	23
5.1 Formación de imágenes en espejos	24
5.2 Formación de imágenes en dioptrios	28
5.3 Formación de imágenes en lentes delgadas	30
5.4 Instrumentos ópticos	32
CUESTIONES TEÓRICAS	34
Teoría de ondas	34
Reflexión y refracción	34
Espectro electromagnético y teoría	37
Óptica geométrica	38

---

<b>PROBLEMAS</b>	<b>41</b>
Ondas electromagnéticas	41
Reflexión y refracción	41
Óptica geométrica	46

# 1. Controversia sobre la naturaleza de la luz

A lo largo de la historia las ideas sobre la naturaleza de la luz han ido cambiando. En la antigua Grecia se recurrieron a explicaciones místicas. A finales del siglo XVII surgen las primeras hipótesis científicas, dos teorías pugnaban por explicar la naturaleza de la luz: la teoría ondulatoria y la corpuscular. Estas teorías fueron propuestas por Huygens y Newton respectivamente. El desarrollo de diferentes experimentos ha ido aportando argumentos a favor y en contra de cada una de estas dos teorías aparentemente contradictorias.

## 1.1 Teoría corpuscular de Newton

En 1704 Isaac Newton publicó su obra "Opticks" donde realiza importantes descubrimientos dentro del campo de la óptica, entre los que destacamos la descomposición de la luz blanca mediante la utilización de un prisma. En esta obra propuso su teoría corpuscular:

*"Según la teoría corpuscular de Newton, la luz está compuesta por una sucesión de partículas o corpúsculos luminosos que se propagan en línea recta en todas direcciones".*

La teoría corpuscular explicaba la **propagación rectilínea de la luz, reflexión y refracción**.

La teoría corpuscular tenía serios inconvenientes:

- No explicaba porque unos corpúsculos son reflejados mientras que al mismo tiempo otros penetran refractándose.
- No explicaba como dos rayos pueden cruzarse sin que colisionen las partículas.

A pesar de estos inconvenientes, la teoría corpuscular tuvo una gran aceptación en la época, debido, sobre todo, al enorme prestigio de Newton.

## 1.2 Teoría ondulatoria de la luz

### Teoría ondulatoria de Huygens

A finales del siglo XVII (en 1678) el holandés **Christian Huygens** propuso la denominada **teoría ondulatoria** de la luz:

*"Según la teoría ondulatoria de Huygens, la luz se propaga mediante ondas mecánicas. Por lo tanto, la luz es una perturbación ondulatoria que se propaga a través de los medios materiales."*

Cuando Huygens propuso su teoría, solo se conocían las ondas **mecánicas longitudinales**. Con esta teoría se proponía un comportamiento análogo al sonido.

La teoría de Huygens **explicaba** fácilmente los fenómenos de **reflexión, refracción** que se habían observado en aquella época en la luz.

En contra de esta teoría se planteaban dos importantes objeciones:

- No se habían observados en la luz fenómenos típicos ondulatorios como la difracción. Esto era debido a que los medios experimentales disponibles en la época no permitían la comprobación de la difracción de la luz (ya que la longitud de onda de la luz es muy pequeña).

-Todas las ondas conocidas en la época necesitaban de un medio material para propagarse (aire, agua, etc.). Sin embargo se sabía que la luz era capaz de propagarse en el vacío. Para solventarlo se propuso la existencia de una sustancia denominada **éter**, que se suponía que era un medio extremadamente sutil como para poder detectarse, y suficientemente elástico para que se propague la luz.

El gran prestigio alcanzado por Newton hizo que la teoría ondulatoria se desechara en detrimento de la teoría corpuscular de Newton. Muchos años más tarde, nuevos descubrimientos volvieron a plantear la naturaleza ondulatoria de la luz.

## **Teoría ondulatoria de Fresnel**

A principios del siglo XIX diversos experimentos revitalizaron la teoría ondulatoria:

- En 1801 Young llevó a cabo el famoso experimento de la doble rendija. Consiguió hacer interferir de dos haces de luz coherentes sobre una pantalla.
- En 1808 se descubrió la polarización de la luz.
- En 1815 Fresnel logró obtener patrones de difracción de ondas luminosas.

Los fenómenos de interferencia, polarización y difracción son típicos de las ondas. A la luz de estos resultados la hipótesis corpuscular fue abandonada después de 150 años.

Para poder explicar el fenómeno de polarización Fresnel propuso:

*"La luz está constituida por ondas mecánicas transversales"*

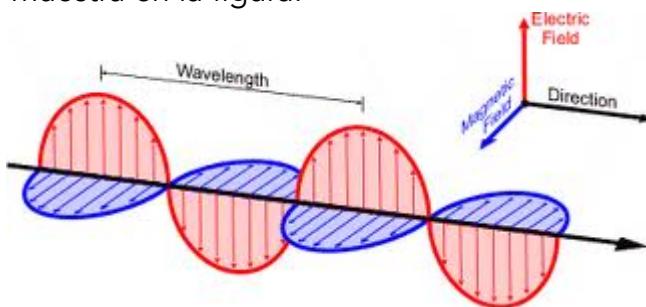
## **Teoría electromagnética de Maxwell**

Como hemos visto en temas anteriores las cargas eléctricas son sensibles tanto a la interacción eléctrica como a la magnética. Además, las corrientes eléctricas generan campos magnéticos y los campos magnéticos variables pueden generar corrientes eléctricas (campos eléctricos), lo que demuestra que ambas interacciones están relacionadas. Podemos hablar de la **interacción electromagnética** o **campo electromagnético**. La electricidad y el magnetismo, por tanto, no son más que manifestaciones del campo electromagnético.

Fue **James Clerk Maxwell** quien unificó en una teoría consistente (síntesis que muchas veces se compara con la realizada en la Mecánica por Newton doscientos años antes) los conocimientos existentes hasta la fecha sobre electricidad y magnetismo. Maxwell publicó en 1865 un conjunto de ecuaciones que permitían describir la interacción electromagnética. Una de las consecuencias inmediatas de dichas ecuaciones era que la luz estaba formada por un nuevo tipo de ondas. Según las conclusiones de Maxwell:

*"La luz no es una onda mecánica, está constituida por ondas electromagnéticas de alta frecuencia que no necesitan medio material para propagarse"*

Las ondas electromagnéticas están constituidas por campos eléctricos y magnéticos que oscilan perpendiculares entre sí. Estos campos son a su vez perpendiculares a la dirección de oscilación tal y como se muestra en la figura:



Maxwell predijo teóricamente que las ondas electromagnéticas se propagaban a una velocidad de 300.000 km/s. En aquella época ya se había determinado que la luz se propagaba con esa velocidad, por lo tanto la luz debía estar formada por ondas electromagnéticas. En 1887 Hertz comprobó experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas que se propagan con la velocidad que había predicho Maxwell.

A partir de este instante, la óptica dejó de ser una rama independiente de la física para convertirse en un capítulo de la teoría electromagnética. En sus estudios Maxwell demostró que las ondas electromagnéticas se producen cuando existen cargas eléctricas con aceleración.

### 1.3 Teoría moderna sobre la naturaleza de la luz

Después de la teoría electromagnética de Maxwell la controversia sobre la naturaleza de la luz parecía haber llegado a su fin. Sin embargo nuevos experimentos hicieron tambalear la teoría ondulatoria.

#### Teoría corpuscular de Einstein

El efecto fotoeléctrico, descubierto en 1887 por Hertz, consiste en la emisión de electrones al incidir luz de una determinada frecuencia sobre una superficie metálica. Este efecto no puede ser explicado por la teoría ondulatoria. La explicación llegó de la mano de Albert Einstein. En 1905 Einstein propuso una descripción matemática de este fenómeno que parecía funcionar correctamente. Para poder explicar el efecto fotoeléctrico Einstein supuso:

"La luz está formada por pequeños corpúsculos o cuantos de energía llamados fotones"

La energía de los fotones de la luz es proporcional a la frecuencia de la luz según la siguiente fórmula:

$$E = hf \rightarrow h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$$

Donde  $h$  es la constante de Planck.

#### Teoría actual: naturaleza dual de la luz

Hoy en día se considera que la luz presenta una doble naturaleza: **corpuscular y ondulatoria**:

La luz se propaga mediante ondas electromagnéticas y presenta un comportamiento ondulatorio en experimentos de óptica (interferencia, difracción, polarización). Sin embargo, manifiesta su carácter corpuscular cuando interacciona con la materia (efecto fotoeléctrico)

---

La luz no manifiesta simultáneamente ambos comportamientos. En un fenómeno concreto se comporta como una onda o una partícula. Posteriormente se ha descubierto que la materia presenta el mismo comportamiento. Es decir, presenta una naturaleza dual de onda y partícula.

## 2. Espectro electromagnético

### Características ondas electromagnéticas

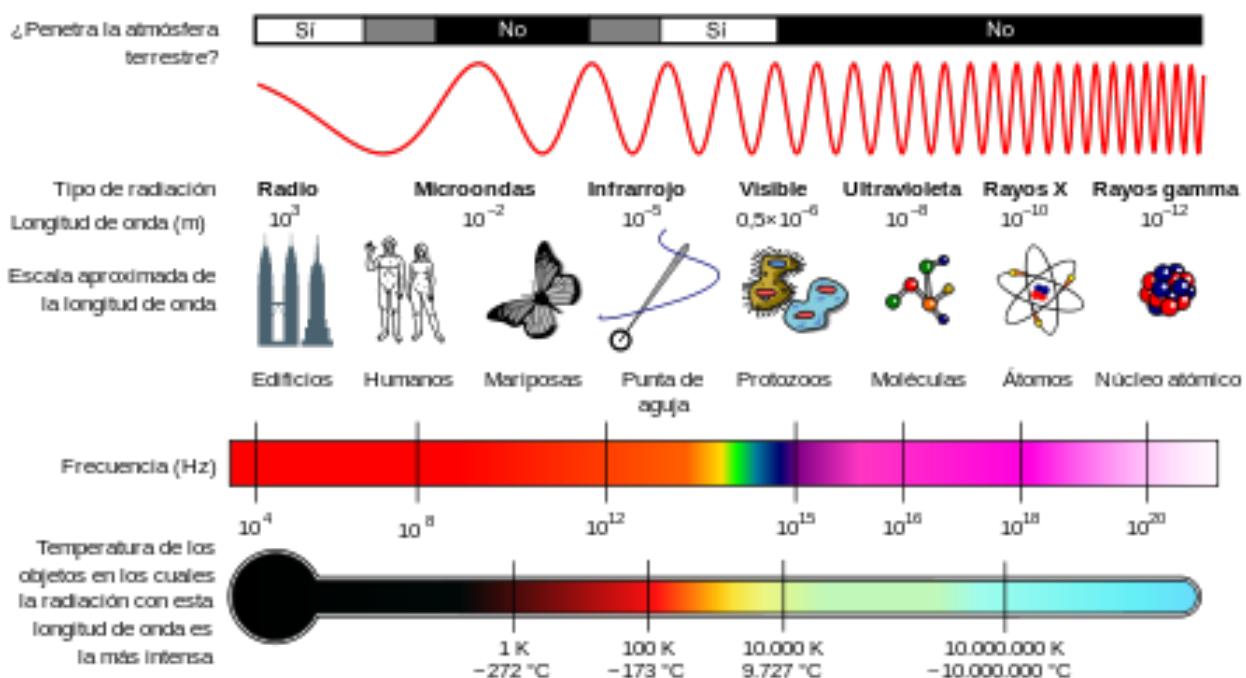
Como vimos en el apartado anterior podemos considerar que la luz está formada por ondas electromagnéticas que tienen las siguientes características:

- Consisten en una perturbación periódica de un campo magnético y eléctrico que se propaga por el espacio (ver figura apartado anterior).
- Son ondas transversales. La dirección de propagación es perpendicular al campo magnético y eléctrico.
- No necesitan soporte material para propagarse.
- La velocidad de propagación de las ondas en el vacío es de  $3 \times 10^8$  m/s y no depende de la longitud de onda.
- La energía de las ondas es proporcional a su frecuencia y viene dada por la expresión  $E = h\nu$  donde  $h$  es la constante de Planck.

### Espectro electromagnético

Son múltiples los fenómenos que pueden producir ondas electromagnéticas, y existen muchas ondas electromagnéticas diferentes. Todas estas ondas tienen el mismo valor de velocidad de propagación en el vacío, la velocidad de la luz ( $c$ ), pero se diferencian entre sí por su frecuencia, y por tanto en su valor de longitud de onda. *Las distintas ondas electromagnéticas difieren entre sí en su frecuencia y en su longitud de onda, y todas tienen la misma velocidad de propagación en el vacío.*

*"Se denomina espectro electromagnético al conjunto de todas las ondas electromagnéticas ordenadas según su frecuencia o longitud de onda"*



En la tabla se adjunta el espectro electromagnético ordenado según la longitud de onda, frecuencia y energía:

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
<u>Rayos gamma</u>	$< 10 \times 10^{-12} \text{ m}$	$> 30,0 \times 10^{18} \text{ Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
<u>Rayos X</u>	$< 10 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 30,0 \times 10^{15} \text{ Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
<u>Ultravioleta extremo</u>	$< 200 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 1,5 \times 10^{15} \text{ Hz}$	$> 993 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
<u>Ultravioleta cercano</u>	$< 380 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 7,89 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$> 523 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
<u>Luz Visible</u>	$< 780 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 384 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$> 255 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
<u>Infrarrojo cercano</u>	$< 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$	$> 120 \times 10^{12} \text{ Hz}$	$> 79 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
<u>Infrarrojo medio</u>	$< 50 \times 10^{-6} \text{ m}$	$> 6,00 \times 10^{12} \text{ Hz}$	$> 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
<u>Infrarrojo lejano/ submilimétrico</u>	$< 1 \times 10^{-3} \text{ m}$	$> 300 \times 10^9 \text{ Hz}$	$> 200 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
<u>Microondas</u>	$< 10^{-2} \text{ m}$	$> 3 \times 10^8 \text{ Hz}$	$> 2 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
<u>Ultra Alta Frecuencia-Radio</u>	$< 1 \text{ m}$	$> 300 \times 10^6 \text{ Hz}$	$> 19.8 \cdot 10^{-26} \text{ J}$
<u>Muy Alta Frecuencia-Radio</u>	$< 10 \text{ m}$	$> 30 \times 10^6 \text{ Hz}$	$> 19.8 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
<u>Onda Corta-Radio</u>	$< 180 \text{ m}$	$> 1,7 \times 10^6 \text{ Hz}$	$> 11.22 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
<u>Onda Media-Radio</u>	$< 650 \text{ m}$	$> 650 \times 10^3 \text{ Hz}$	$> 42.9 \cdot 10^{-29} \text{ J}$
<u>Onda Larga-Radio</u>	$< 10 \times 10^3 \text{ m}$	$> 30 \times 10^3 \text{ Hz}$	$> 19.8 \cdot 10^{-30} \text{ J}$
<u>Muy Baja Frecuencia-Radio</u>	$> 10 \times 10^3 \text{ m}$	$< 30 \times 10^3 \text{ Hz}$	$< 19.8 \cdot 10^{-30} \text{ J}$

En el espectro electromagnético suelen diferenciarse las siguientes zonas:

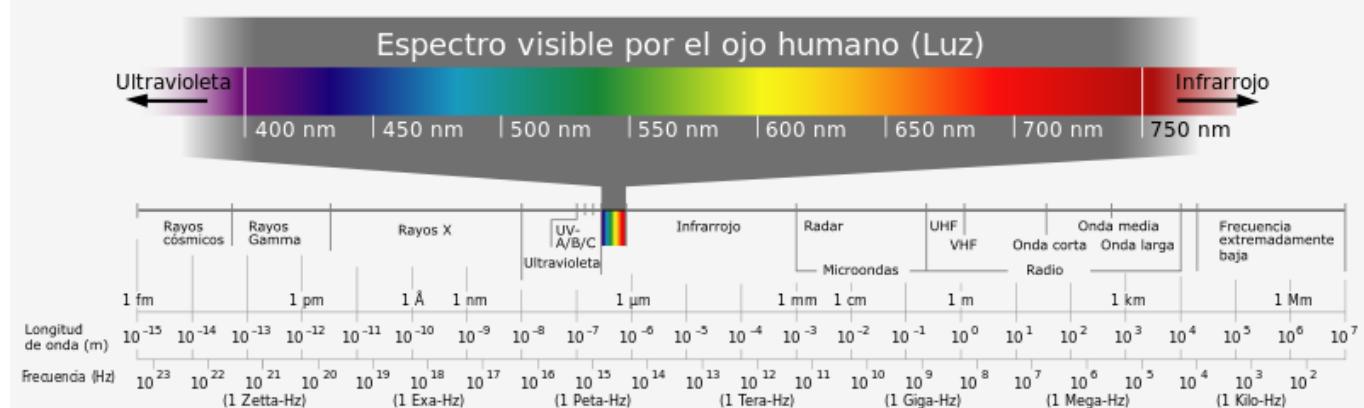
- A) **Ondas de radio o radioondas:** Son las ondas electromagnéticas que se utilizan generalmente en telecomunicaciones (radio, TV, teléfonos móviles, etc.) Son generadas mediante circuitos electrónicos y su rango de frecuencias comprende desde unos pocos hertzios hasta  $10^9$  Hz distinguiéndose en esta zona diferentes bandas (longitudes de onda desde kilómetros en las ondas de radio larga, hasta centímetros para las ondas de televisión).
- B) **Microondas:** Se utilizan en sistemas de comunicaciones y astronomía (radar, UHF) e incluso en los hornos microondas. También se generan en circuitos electrónicos. Su rango de frecuencias comprende desde  $10^9$  Hz hasta  $10^{11}$  Hz (entre 0,1 mm y 1 m).
- C) **Infrarrojos:** Son las ondas que producen los cuerpos calientes y tienen aplicaciones en la industria, medicina, mandos a distancia, etc. La zona incluye desde  $10^{11}$  Hz hasta  $4,0 \cdot 10^{14}$  Hz.
- D) **Luz visible:** Incluye una estrecha franja de ondas electromagnéticas entre  $4,0 \cdot 10^{14}$  Hz y  $8,0 \cdot 10^{14}$  Hz (700 y 400 nm). Estas ondas electromagnéticas son capaces de impresionar nuestra retina, permitiéndonos la visión. Dentro de esta zona podemos definir los diferentes colores (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta), a los que corresponden diferentes frecuencias. Su estudio ha constituido una rama muy importante de la física: la **óptica**, que estudia los fenómenos luminosos y los aparatos ópticos.
- E) **Ultravioleta:** Comprende el rango de frecuencia entre  $8,0 \cdot 10^{14}$  Hz y  $10^{17}$  Hz. Su origen se debe a los electrones acelerados que se encuentran en los átomos y moléculas excitados. La energía de estas ondas es del mismo orden de magnitud de la que interviene en las

reacciones químicas, lo que explica en gran parte sus efectos. El Sol es una fuente poderosa de radiación ultravioleta, que al interactuar con los gases de la atmósfera exterior produce gran cantidad de iones, lo que da lugar a la ionosfera. En medicina se utiliza la radiación ultravioleta por su poder destructor sobre algunos microbios. Los rayos ultravioletas son los responsables del bronceado y quemaduras de la piel.

- F) **Rayos X:** Esta radiación fue descubierta por Roentgen al estudiar las emisiones producidas por un metal cuando frenaba electrones acelerados previamente. Comprende la gama de frecuencias que incluye desde  $10^{17}$  Hz hasta  $10^{19}$  Hz (30 a 0,1 Å). Son originados por los electrones más fuertemente ligados al átomo. Se utilizan en medicina para diagnóstico, por ser absorbidos mejor por los huesos que por los tejidos, lo que permite fotografías nítidas del interior del cuerpo. Debido a su gran energía, los rayos X producen graves daños en tejidos y organismos vivos, por lo que deben ser utilizados con mucha precaución.
- G) **Rayos gamma:** Esta ondas electromagnéticas comprende las frecuencias que van desde  $10^{19}$  Hz en adelante. Tiene su origen en el núcleo atómico. Son producidos por muchas sustancias radiactivas y son abundantes en los reactores nucleares. Al ser absorbidos por los seres vivos producen graves efectos, por lo que su manipulación requiere blindajes de protección.

## Espectro visible (luz)

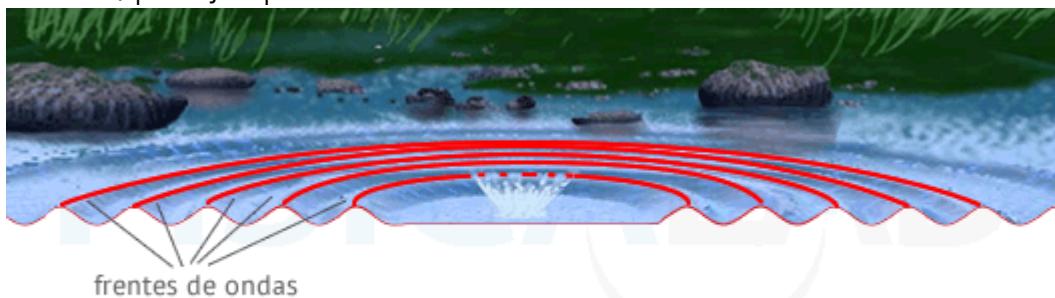
Denominamos espectro visible a la banda del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. Abarca una banda que va de los 400 nm a los 750 nm tal y como se muestra en la siguiente figura:



### 3. Principio de Huygens

#### Frente de ondas y rayos luminosos

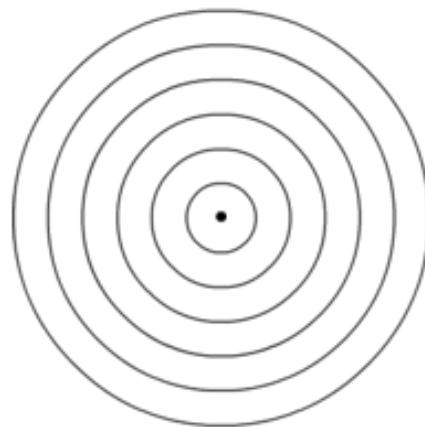
Cuando se trata de visualizar la propagación de las ondas en un papel se recurre a pintar los llamados **frentes de onda**. Esto es, **líneas continuas que unen todos los puntos de la onda que están en fase**, por ejemplo las crestas.



Se dibujan a continuación los frentes de una onda plana y otra circular:

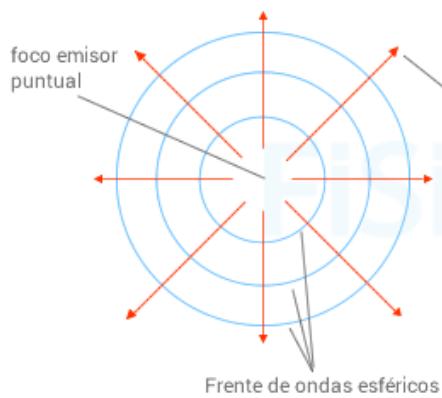


Frentes de ondas planas. Las líneas de puntos unen puntos de máxima amplitud (crestas)

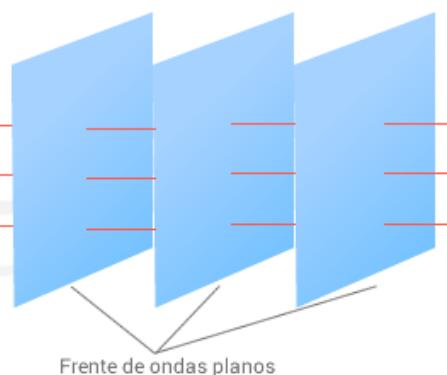


Frentes de ondas circulares. Las líneas llenas unen puntos de máxima amplitud (crestas)

También resulta muy cómodo (y muy visual) pintar **los rayos, unas líneas perpendiculares a los frentes de onda**. Estas líneas representan la dirección y el sentido de propagación de la luz:



Frente de ondas esféricos



Frente de ondas planos

## Principio de Huygens

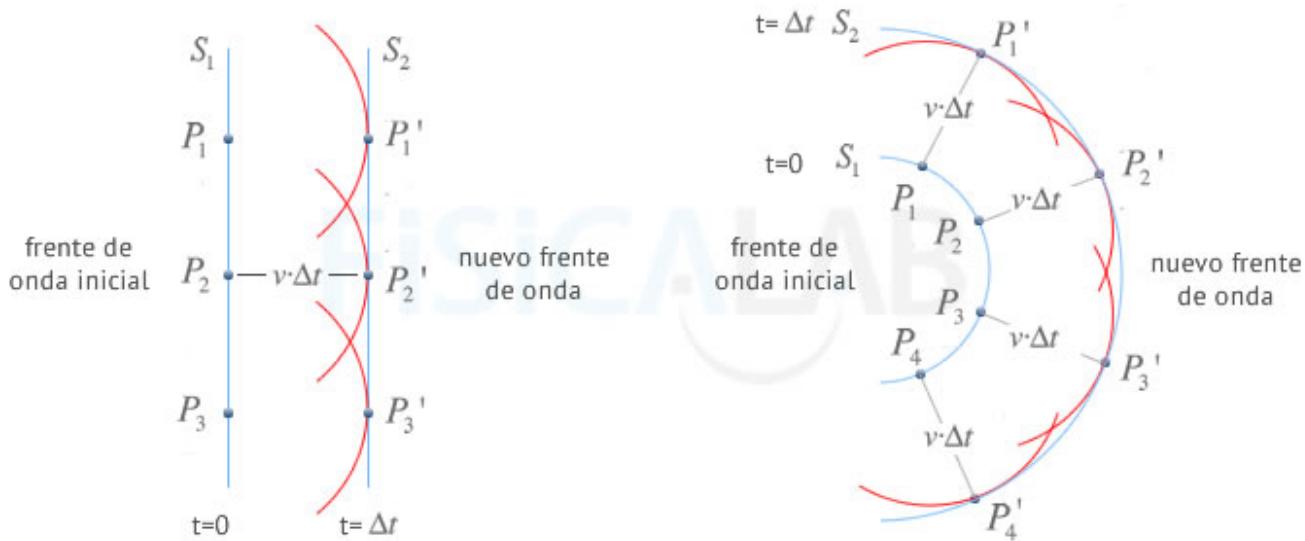
**Christian Huygens** (1629-1695) propuso hacia 1680 un método gráfico que permite obtener los frentes de onda sucesivos de una onda que se propaga.

Huygens consideraba que:

- Cada punto de un frente de ondas se comporta como un emisor secundario que da lugar a nuevos frentes de onda.
- La envolvente de las ondas secundarias constituye el siguiente frente de ondas.

El proceso se puede repetir, con lo que podemos seguir la propagación de la onda a través del medio.

En el modelo de Huygens se ignoran las ondas emitidas en sentido contrario al de propagación.



## 4. Fenómenos ondulatorios

Debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, está presenta unos fenómenos ondulatorios que describimos a continuación.

### 4.1 Reflexión y refracción

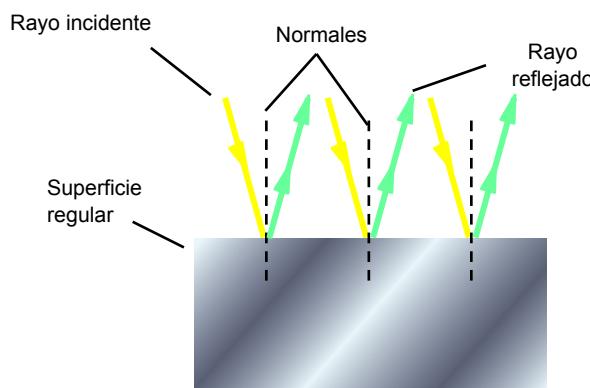
La reflexión y la refracción son dos de los fenómenos típicos de las ondas, y suelen manifestarse simultáneamente. De igual forma ocurre con la luz. Cuando un rayo luminoso encuentra una superficie de separación de dos medios, parte del rayo incidente se refleja en el primer medio, y parte se refracta y se transmite por el segundo medio.

#### Reflexión

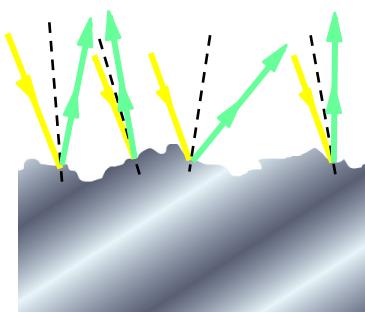
Debido a la reflexión de la luz se pueden ver los objetos no luminosos. La mayoría de los objetos no emiten luz propia, solamente reflejan parte de la luz que reciben. Las leyes de la reflexión eran conocidas desde la antigua Grecia:

- El rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie están contenidos en un mismo plano.**
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión ( $i = r$ ).**

En el caso de que la superficie sea lisa y los rayos llegan paralelos, los rayos reflejados también salen paralelos obteniéndose la **reflexión especular**.



Si la superficie donde se refleja la luz es irregular, la luz se refleja en todas las direcciones, obteniéndose la **reflexión difusa**.



## Índice de refracción

Para estudiar la propagación de las ondas electromagnéticas en los medios resulta útil definir el índice de refracción del medio,  $n$ , como el cociente entre la velocidad de la luz en el aire (que coincide con la del vacío),  $c$ , y la velocidad de la luz en el medio,  $v$ :

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

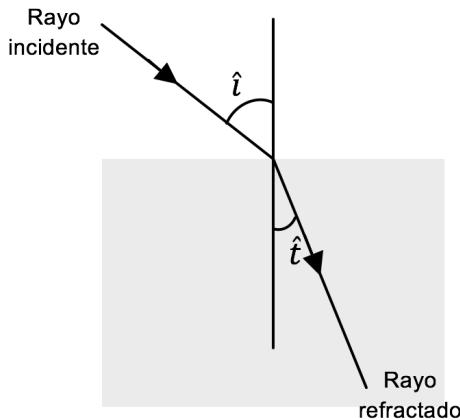
## Refracción

En la refracción, se produce una desviación en la dirección de propagación de la luz cuando pasa de un medio a otro en el que su velocidad es distinta. La ley de la refracción fue enunciada por primera vez por Snell en 1620:

- El rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano.
- La relación entre el ángulo de incidencia y el de refracción viene dado por la siguiente expresión (**Ley de Snell**):

$$n_i \times \operatorname{sen} i = n_t \times \operatorname{sen} t$$

donde  $n_i$  es el índice de refracción del primer medio, o medio en el que se propaga el rayo incidente, y  $n_t$  es el índice de refracción del segundo medio o medio en el que se propaga el rayo refractado.

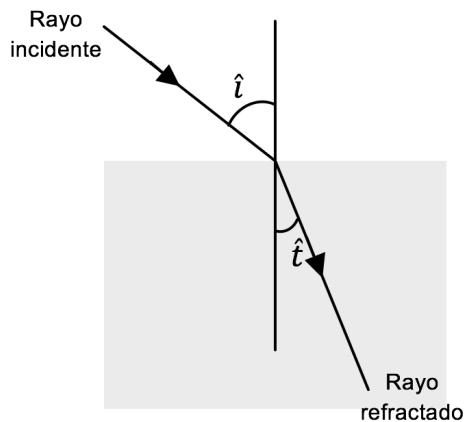


Al pasar de un medio a otro en el cual la velocidad es distinta, **la longitud de onda va a variar**, mientras que la frecuencia permanece inalterada.

En la refracción podemos distinguir entre dos casos:

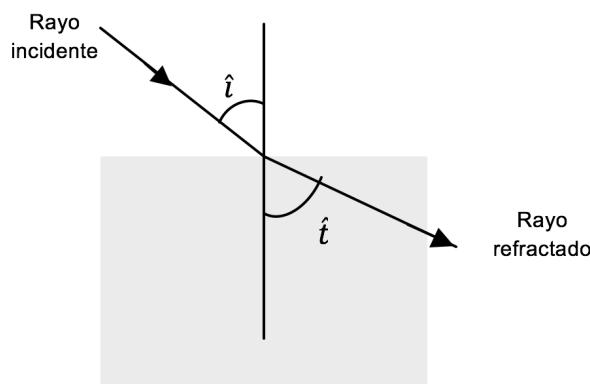
1. Cuando la luz pasa de un medio de menor índice de refracción a otro con mayor índice de refracción. En este caso, si aplicamos la ley de Snell comprobaremos que el ángulo de refracción es menor que el de incidencia:

$$n_i < n_t \rightarrow \hat{i} > \hat{t}$$



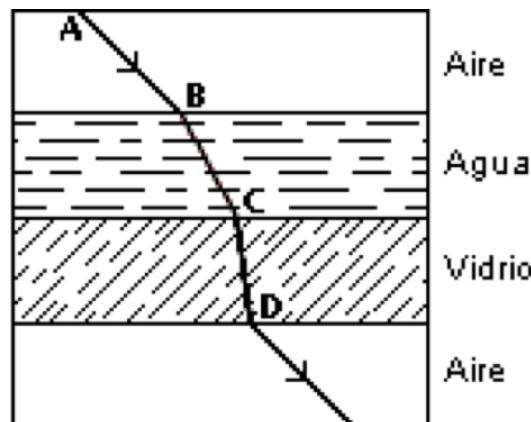
2. Cuando la luz pasa de un medio de mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción. En este caso, si aplicamos la ley de Snell comprobaremos que el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia:

$$n_i > n_t \rightarrow \hat{i} < \hat{t}$$



Dependiendo del valor del índice de refracción en el medio incidente y en el transmitido la luz se refractara con un ángulo mayor o menor como se muestra en la siguiente figura:

Material	n
Vacio	1
Aire	1,0003
Agua	1,33
Vidrio	1,52
Diamante	2,42

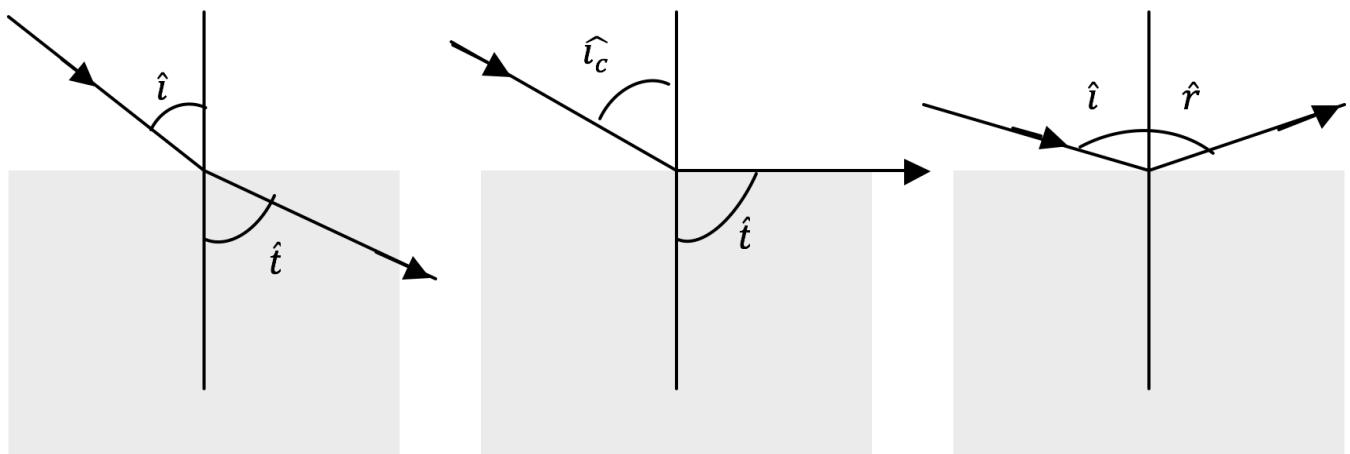


*Rayo refractado que atraviesa tres medios diferentes*

## Reflexión total

La reflexión total es el fenómeno que se produce cuando un rayo de luz atraviesa un medio de índice de refracción menor que el índice de refracción en el que se encuentra ( $n_i > n_t$ ). Bajo ciertas condiciones se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente.

Este fenómeno solo se produce para ángulos de incidencia superiores a un cierto valor crítico ( $\hat{i}_c$ ). Para ángulos mayores la luz deja de atravesar la superficie y es reflejada internamente de manera total.



El ángulo límite es aquel para que el ángulo de refracción es de 90 grados. Como se puede ver en la figura anterior cuando el ángulo de incidencia es mayor que el valor crítico se produce la reflexión total. Podemos calcularlo aplicando la ley de Snell:

$$\operatorname{sen} \hat{i}_c = \frac{n_t \times \operatorname{sen} 90}{n_i} \rightarrow \hat{i}_c = \operatorname{arc sen} \frac{n_t}{n_i}$$

**Ejemplo:** Un rayo de luz incide sobre la superficie de un cristal con un ángulo de  $60^\circ$ . Sabiendo que el vidrio tiene un índice de refracción de 1,53. Calcular:

- a) Velocidad de propagación de la luz en el vidrio.
- b) Ángulo con el que se refracta el rayo.

a) Para calcular la velocidad de propagación en el vidrio hacemos uso del concepto de índice de refracción:

$$n = \frac{c}{v} \rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,53} = 1,96 \times 10^8 \text{ m/s}$$

b) Para calcular el ángulo con el que se refracta el rayo aplicamos la ley de Snell:

$$n_i \times \operatorname{sen} \hat{i} = n_t \times \operatorname{sen} \hat{t} \rightarrow \hat{t} = \sin^{-1} \frac{n_i \times \operatorname{sen} \hat{i}}{n_t} = 34,5^\circ$$

**Ejemplo:** Si un haz de luz se propaga por el aire, determinar el valor del ángulo límite para un vidrio cuyo índice de refracción es 1,70

Aplicamos la ley de Snell para calcular el ángulo límite:

$$n_i \times \operatorname{sen} \hat{i}_c = n_t \times \operatorname{sen} 90^\circ \rightarrow \hat{i}_c = \sin^{-1} \frac{n_t}{n_i} = 36^\circ$$

## 4.2 Dispersión de la luz

Una de las observaciones realizadas por Newton fue que, cuando se hacía pasar un rayo de luz solar (blanca) por un prisma, la luz se descomponía en un conjunto de colores que se denominó **espectro**. De esta forma se demostró que la luz blanca es en realidad una composición de ondas de distinta frecuencia. Este fenómeno se denomina **dispersión**.

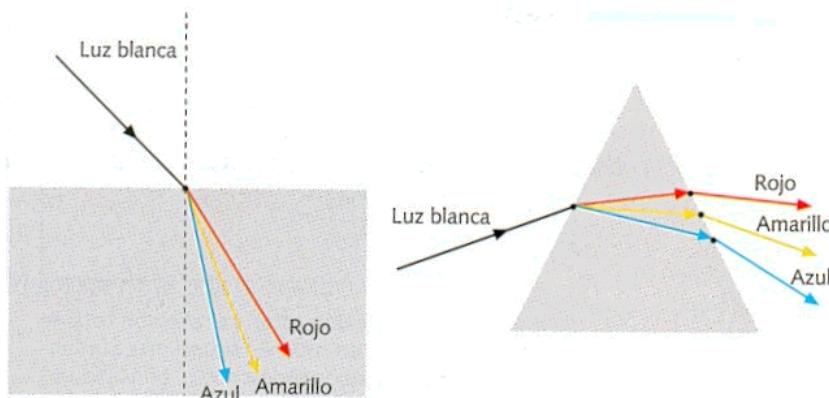
La luz que se compone de varios colores (varias frecuencias) se denomina **policromática**, y cuando la luz es de un color (o una única frecuencia) se denomina **monocromática**.

En el aire (y en el vacío) la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia (o longitud de onda) de la luz. De esta manera todos los colores tienen el mismo índice de refracción (i.e la misma velocidad). Esto no ocurre en todos los materiales.

Cuando un rayo de luz blanca atraviesa el prisma (vidrio), el ángulo de desviación para cada radiación es diferente, siendo el más desviado el violeta, y el que sufre menor desviación el rojo. Este hecho es debido a que el índice de refracción del prisma varía ligeramente para cada frecuencia, lo que explica los diferentes ángulos de refracción para cada color:

Color	Longitud de onda (nm)	Índice de refracción
Rojo	640	1.50917
Amarillo	589	1.51124
Verde	509	1.51534
Azul	486	1.51690
Violeta	434	1.52136

Las pequeñas diferencias en los índices de refracción implican que existirán pequeñas diferencias en las velocidades de cada radiación. Recordemos que al producirse la refracción, el rayo refractado no modifica su frecuencia pero sí modifica su velocidad, y por tanto su longitud de onda.



**Ejemplo:** El cuarzo fundido tiene un índice de refracción que decrece con la longitud de onda de la luz. Para el extremo violeta es  $n_V = 1,472$ , mientras que para el extremo rojo es  $n_R = 1,455$ . Cuando la luz blanca (con todas las longitudes de onda desde el rojo al violeta) incide desde el aire sobre una superficie de cuarzo fundido con un ángulo de incidencia de  $20^\circ$  se forma un espectro.

a) ¿Qué se refracta más el rojo o el violeta? (explíquese incluyendo un dibujo).

b) Determine la separación angular de los rayos refractados para los extremos rojo y violeta.

a) Aplicamos la ley de Snell para los dos colores teniendo en cuenta que el medio incidente es el aire:

$$\begin{aligned}\text{sen} \hat{i} &= n_V \times \text{sen} \hat{t}_V \\ \text{sen} \hat{i} &= n_R \times \text{sen} \hat{t}_R\end{aligned}$$

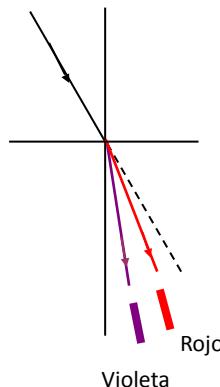
Igualando ambas ecuaciones:

$$n_R \times \text{sen} \hat{t}_R = n_V \times \text{sen} \hat{t}_V \rightarrow \text{sen} \hat{t}_R = \frac{n_R}{n_V} \times \text{sen} \hat{t}_V$$

Como se cumple que:

$$n_V > n_R \rightarrow \text{sen} \hat{t}_R > \text{sen} \hat{t}_V \rightarrow \hat{t}_R > \hat{t}_V$$

Por lo tanto el rayo rojo se refracta más que el violeta:



b) Calculamos los ángulos con que se refractan aplicando la ley de Snell:

$$\hat{t}_V = \sin^{-1} \frac{\text{sen} \hat{i}}{n_V} = 13,44^\circ$$

$$\hat{t}_R = \sin^{-1} \frac{\text{sen} \hat{i}}{n_R} = 13,60^\circ$$

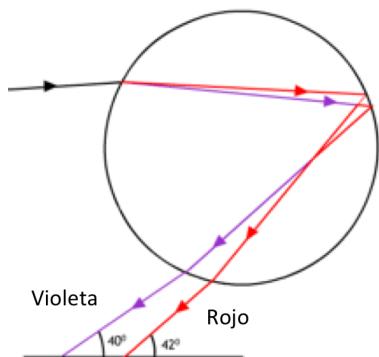
La separación entre los dos rayos viene dada por:

$$t_R - t_V = 9,6^\circ$$

## Formación del arco iris

La dispersión de la luz del sol por las gotas de lluvia da lugar al **arco iris**.

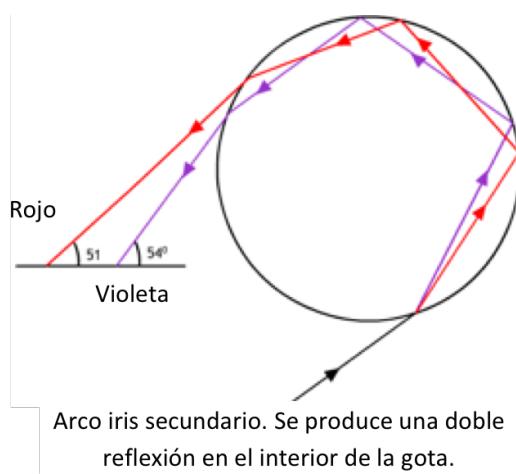
Cuando tenemos el sol situado a nuestra espalda, en las gotas de lluvia se produce la refracción y reflexión de la luz de forma similar a lo que ocurre con un prisma, de forma tal que la luz blanca emerge nuevamente descompuesta en sus colores como consecuencia de la dispersión que se produce en el interior de la gota.



Arco iris primario. Una única reflexión en el interior de la gota

**El arco iris primario** se forma debido a la reflexión que tiene lugar en el interior de las gotas (ver figura). Descartes demostró que cada color es más intensamente refractado en la dirección de desviación máxima para ese color. Esta dirección se corresponde con  $42^{\circ}$  para el color rojo y  $40^{\circ}$  para el violeta. Los demás colores muestran desviaciones máximas comprendidas entre estos valores.

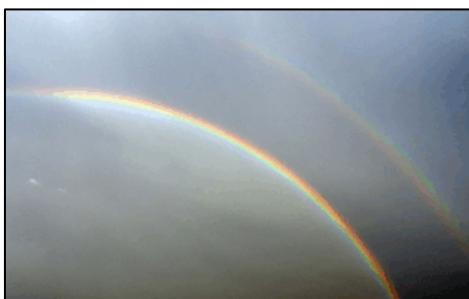
Todas las gotas colocadas en un semicírculo que forme  $42^{\circ}$  con el observador refractarán fuertemente la luz roja. Lo mismo sucederá con los demás colores. El observador verá semicírculos coloreados con el color rojo situado en el arco superior y el violeta en el inferior. En algunas ocasiones podemos observar un arco iris doble. A este arco iris se le conoce como **arcoíris secundario**. Aparece como consecuencia el color violeta emerge con una mayor inclinación ( $54^{\circ}$ ) que el rojo ( $51^{\circ}$ ).



El arco iris secundario aparece sobre el primario, es más débil y los colores están invertidos. El arco superior es de color violeta y el inferior rojo.

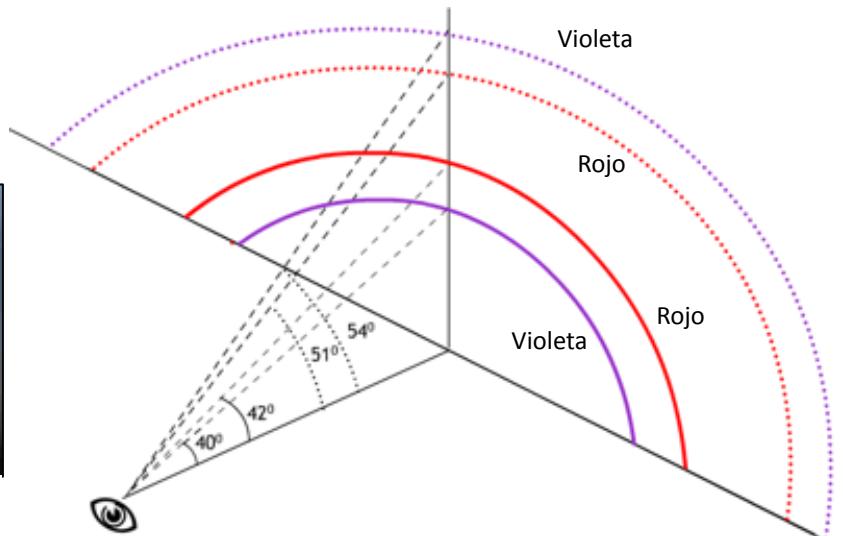
Si la posición del observador se eleva se puede observar una porción mayor de arco. Si la altura es suficiente se puede observar el arco iris como un círculo completo.

La situación quedaría de la siguiente forma:



Fotografía en la que se observan el arco iris primario (inferior) y el secundario (superior)

Fuente: Wikipedia



Esquema que muestra como percibe un observador los rayos refractados que forman el arco iris.

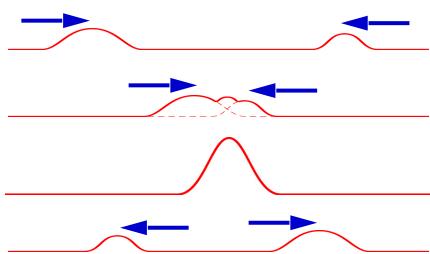
## 4.3 Interferencia

La interferencia entre dos ondas (la luz es una onda electromagnética) tiene lugar cuando ambas coinciden en una región del espacio al mismo tiempo. Cuando esto sucede se suman atendiendo al principio de superposición:

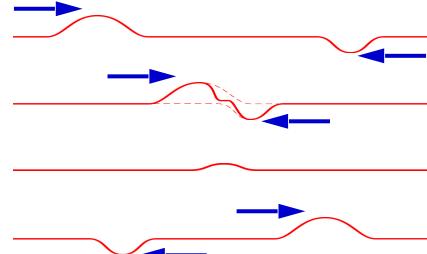
"Cuando coinciden dos o más ondas, la perturbación resultante en cada punto será la suma de las perturbaciones que producirían cada onda por separado"

Existen dos tipos de interferencias:

- **Constructiva:** la señal (perturbación) es reforzada. Esto ocurre si las ondas interfieren en fase.
- **Destructiva:** la perturbación resultante es menor que las originales. Esto ocurre si las ondas interfieren en oposición de fase.
- 



Interferencia constructiva

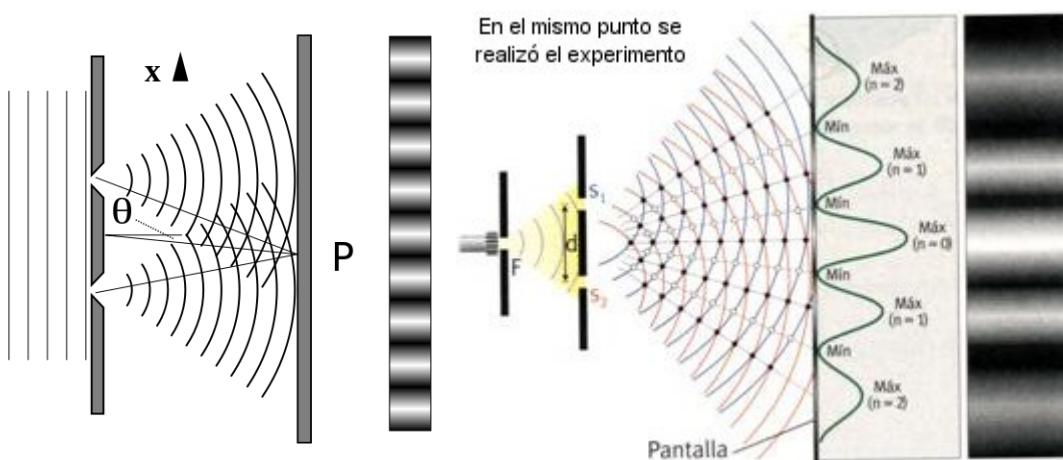


Interferencia destructiva

El fenómeno de interferencias es otro fenómeno típico de los movimientos ondulatorios, y por tanto también se puede utilizar para distinguir un movimiento ondulatorio de otro que no lo sea.

## Experimento de la doble rendija de Young

Como ejemplo vamos a estudiar la interferencia producida entre dos focos que emiten ondas de la misma frecuencia. Se les llaman **focos coherentes** y se caracterizan porque oscilan en la misma fase.



En estos casos la diferencia de fase entre las ondas de cada foco para un determinado punto es siempre la misma y viene determinada por la diferencia de camino recorrido por las ondas.

Las ondas interfieren y producen un **patrón de interferencia** que se proyecta en una pantalla donde se aprecian franjas brillantes y oscuras:

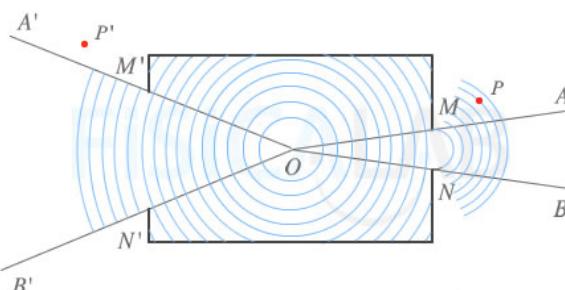
- Las **franjas brillantes** son producidas por la interferencia constructiva de las ondas que han alcanzado en fase la pantalla.
- Las **franjas oscuras** son producidas por la interferencia destructiva de las ondas que han alcanzado en oposición de fase la pantalla.

## 4.4 Difracción

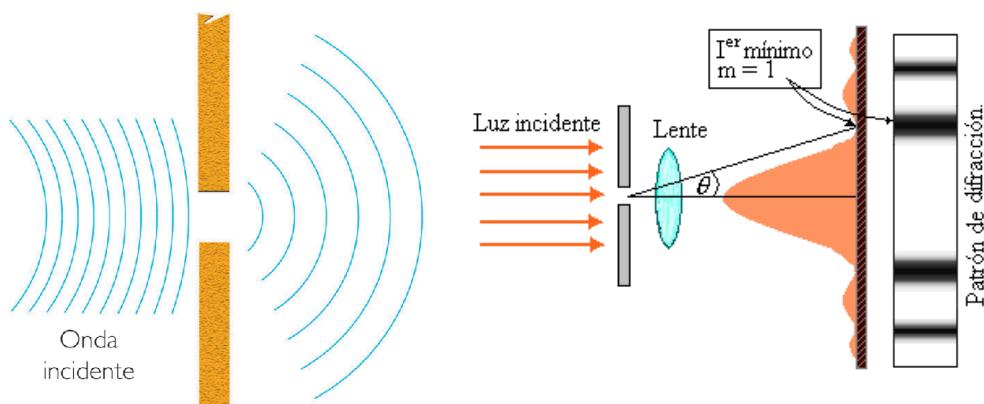
La difracción de las ondas luminosas tiene lugar cuando se encuentran en su camino un obstáculo, por ejemplo un orificio, cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda de la luz que se propaga. Podemos definir la difracción como:

*"Distorsión sufrida por las ondas en su propagación cuando se encuentra un obstáculo de dimensiones comparables a la longitud de onda"*

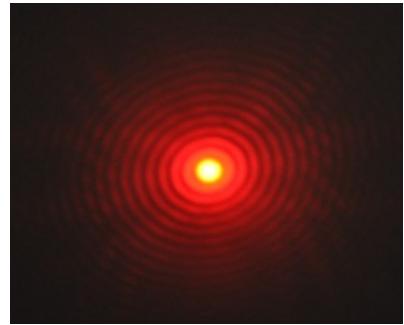
En la siguiente figura se observa que para que el fenómeno de difracción se produzca el orificio debe ser del orden de la longitud de onda ( $\lambda \sim MN$ ). En este caso se engendra en él como centro, según el principio de Huygens un foco emisor de ondas, propagándose estas en todas direcciones.



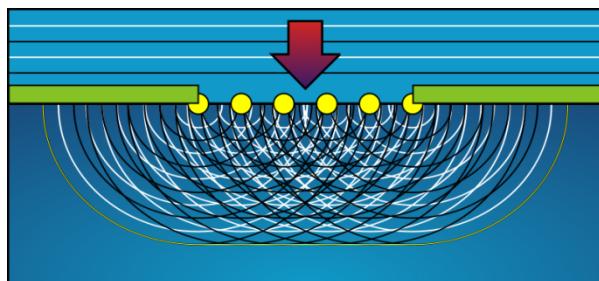
En la siguiente figura vamos a estudiar la difracción producida por una rendija. Proyectaremos sobre una pantalla la imagen obtenida.



Uno esperaría que en la pantalla apareciera una zona iluminada semejante a la rendija. Sin embargo obtenemos una figura de difracción constituida por una estructura de franjas tal y como se muestra en la figura anterior. Si en vez de una rendija tuviéramos un orificio circular pequeño el patrón de difracción estaría constituido por círculos brillantes y oscuros dispuestos de forma alternativa tal y como se muestra en la siguiente figura:



El patrón de franjas obtenido en los fenómenos de difracción puede interpretarse a partir del principio de Huygens. Según este principio, cada punto de la rendija se convierte en un emisor de ondas que interfieren entre sí:



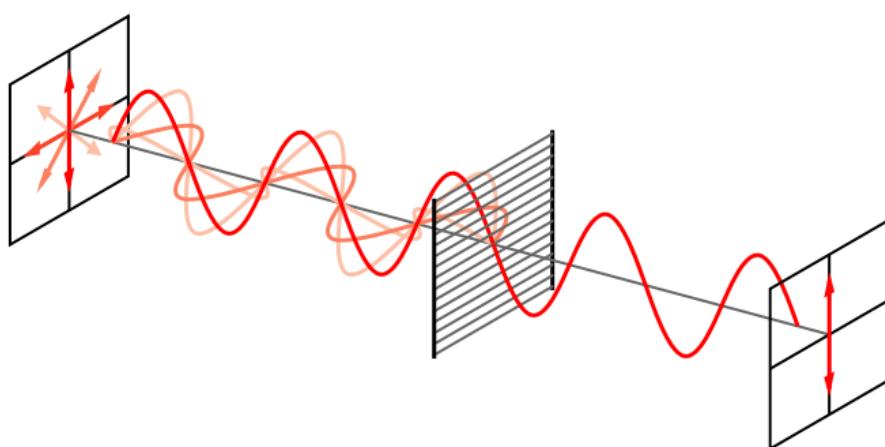
Por lo tanto, podemos entender la difracción como un fenómeno de interferencia.

## 4.5 Polarización

*“Propiedad exclusiva de las ondas transversales que consiste en la vibración del campo eléctrico y magnético siempre en la misma dirección”*

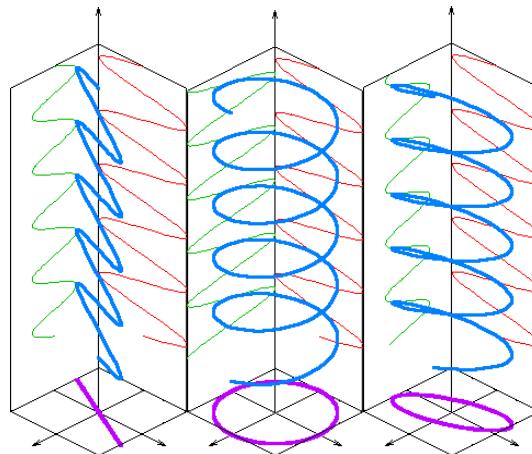
En general la luz natural no está polarizada. Esto quiere decir que en cada instante de tiempo el campo eléctrico y magnético oscilan en una dirección diferente del espacio de forma aleatoria. Existen algunos materiales que absorben selectivamente el campo electromagnético que oscila en una dirección del espacio y dejan pasar la que oscila en dirección perpendicular (polarizador lineal). Estos materiales se utilizan como cristales en algunas gafas para eliminar reflejos.

En la siguiente figura se muestra como la luz natural (no polarizada) se polariza linealmente después de atravesar un polarizador lineal.



Existen diferentes tipos de polarización dependiendo del patrón de oscilación del campo electromagnético:

- **Polarización lineal:** El campo electromagnético oscila en un plano (plano de polarización).
- **Polarización circular:** El plano de polarización va cambiando en cada instante describiendo una circunferencia.
- **Polarización elíptica:** El plano de polarización va cambiando en cada instante describiendo una elipse.
- 



## 5. Óptica geométrica

La **óptica geométrica** es la parte de Física que se encarga de estudiar la propagación de la luz por medios isótropos, atendiendo fundamentalmente a las reflexiones y refracciones que se producen en las superficies de separación. En la óptica geométrica no se tiene en cuenta las propiedades ondulatorias de la luz, y se basa en las siguientes leyes:

- **Ley de propagación rectilínea de la luz:** En medios isótropos (iguales propiedades en todas direcciones) y homogéneo (igual composición en todas partes), la luz se propaga en línea recta.
- **Leyes de la reflexión.**
- **Leyes de la refracción.**

Se denominan **sistemas ópticos** al conjunto de medios materiales y superficies de separación a estudiar. Recordemos que lo que nos interesa en la óptica geométrica son las superficies de separación, ya que son en ellas donde se van a producir las desviaciones de los rayos.

*“Cuando, tras sucesivas reflexiones y refracciones, los rayos de luz que parten de un punto u objeto concurren en otro punto, decimos que dicho punto es **imagen** del primero”.*

Las imágenes que se forman en los sistemas ópticos se pueden clasificar según diferentes criterios. Según la naturaleza de la imagen, podemos tener:

- **Imágenes reales:** Los rayos procedentes de un punto (**objeto**), tras la reflexión o refracción convergen en otro punto (**imagen**). Las imágenes reales han de ser proyectadas en una en una pantalla para ser visibles.
- **Imágenes virtuales:** Los rayos procedentes de un punto (**objeto**), después de reflejarse o refractarse salen divergentes y no se cortan, pero sus prolongaciones en sentido contrario a la propagación si se corta en el punto imagen.

Según la posición de las imágenes, pueden ser:

- **Derechas.** Están en la misma posición que el objeto.
- **Invertidas.** Están en posición contraria al objeto.

### Convenio de signos

Para el estudio de la óptica geométrica se sigue un criterio de signos basados en las denominadas normas DIN, y que se resumen en las siguientes:

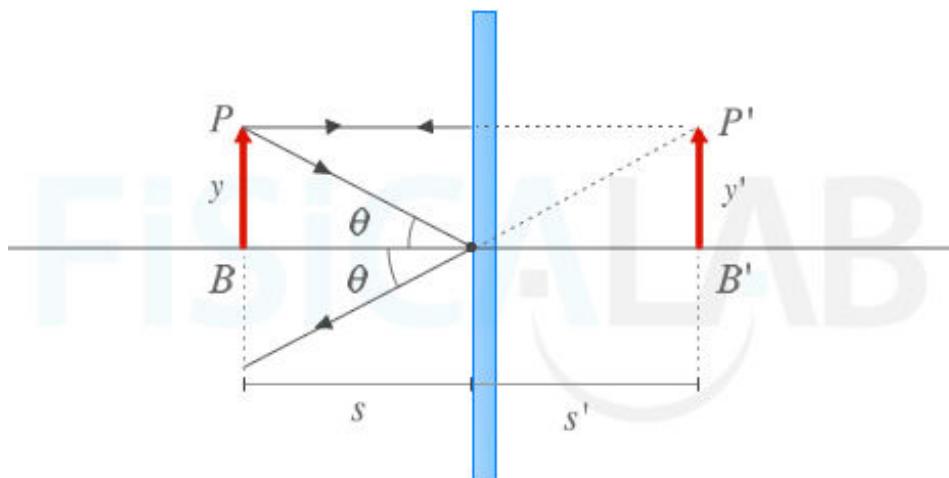
- Los símbolos y magnitudes que se refieren al objeto y a la imagen son los mismos, pero para la imagen se le añade el signo “prima”; ejemplo: objeto P y la imagen será P'.
- La luz incidente se supone que se propaga de izquierda a derecha.
- Los puntos se representan con letras mayúsculas, y las distancias con letras minúsculas.
- Se consideran como origen de coordenadas el punto O denominado **polo** o **vértice** (punto de corte del eje óptico con la superficie de separación).
- Las distancias hacia arriba y hacia la derecha del polo o vértice son positivas, y hacia abajo y hacia la izquierda son negativas.

## 5.1 Formación de imágenes en espejos

Los espejos son superficies perfectamente pulidas y opacas capaces de reflejar la luz que llega. Según la forma de la superficie pulimentada, los espejos pueden ser planos, esféricos, etc.

### Espejos planos

Para construir la imagen que un objeto forma en un espejo plano únicamente hay que aplicar las leyes de la reflexión. Se comprueba que la imagen se forma porque convergen las prolongaciones de los rayos reflejados, por tanto se trata de una **imagen virtual**. Además las distancias AO y OF son iguales, podemos deducir que la imagen va a ser **simétrica** y del **mismo tamaño** que el objeto.

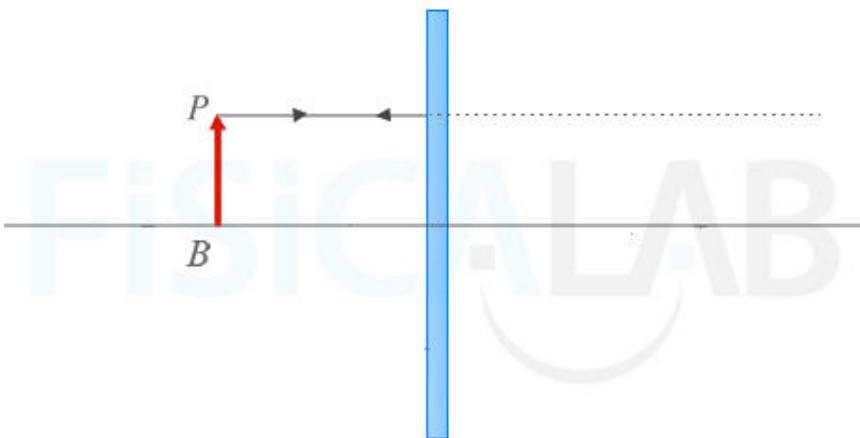


"Un espejo plano produce una imagen virtual, simétrica y del mismo tamaño que el objeto".

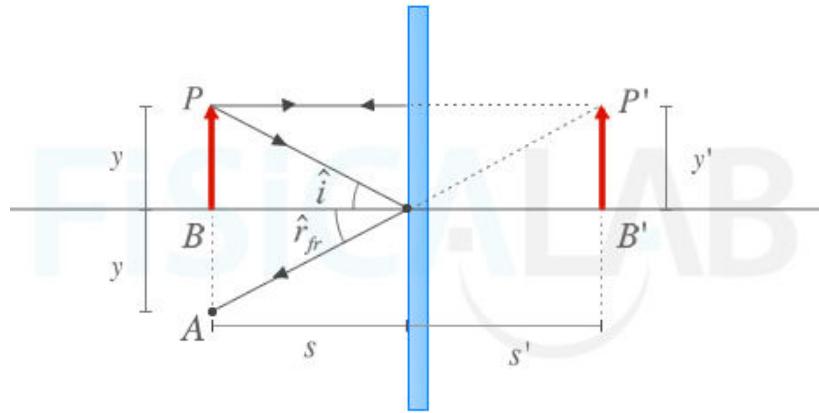
#### Diagrama de rayos

Para dibujar el diagrama de rayos es conveniente seguir los siguientes pasos:

- 1.Traza un rayo paralelo al eje óptico desde el punto P del objeto. Dicho rayo se prolongará detrás del espejo. Utiliza puntos suspensivos para la prolongación:



2. Traza otro rayo de la punta P al vértice óptico y dibuja el rayo reflejado. Las prolongaciones de los dos rayos dan lugar a la imagen virtual:



## Espejos esféricos

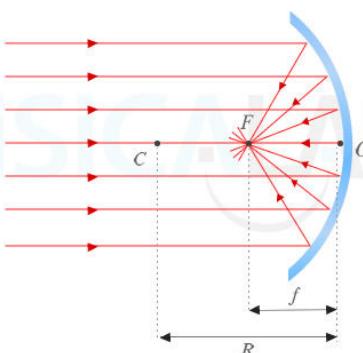
Los esféricos se denominan esféricos cuando la superficie está constituida por un casquete esférico. Se llaman **cóncavos** cuando la superficie reflectora es la zona interior, y **convexos** cuando la superficie reflectora es la exterior. En los espejos esféricos tenemos los siguientes elementos:

- Centro de curvatura, C:** centro de la superficie esférica en la que está incluido el espejo (el centro de la circunferencia).
- Radio de curvatura, R:** distancia desde el centro de curvatura hasta la superficie del espejo (es el radio de la circunferencia).
- Polo, vértice o centro óptico, O:** Es el centro de espejo y se toma como origen del sistema de coordenadas.
- Eje principal o eje óptico:** recta que pasa por el centro de curvatura y por el centro óptico.
- Foco, F:** punto del eje óptico donde se concentra los rayos cuando inciden paralelos al eje óptico. También se cumple que los rayos que inciden pasan por el foco se reflejan paralelos al eje óptico.
- Distancia focal, f:** Es la distancia que existe entre el centro O y el foco F.

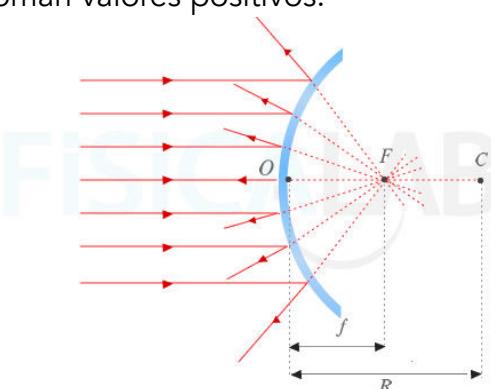
Aplicando cálculos geométricos y trigonometría se puede determinar que la distancia focal de un espejo esférico es igual a la mitad del radio de curvatura:

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

Hay que tener en cuenta que para los espejos cóncavos tanto la distancia focal como el radio toman valores negativos, y en los espejos convexos toman valores positivos.



Espejo cóncavo.



Espejo convexo

## Formación de imágenes en espejos esféricos

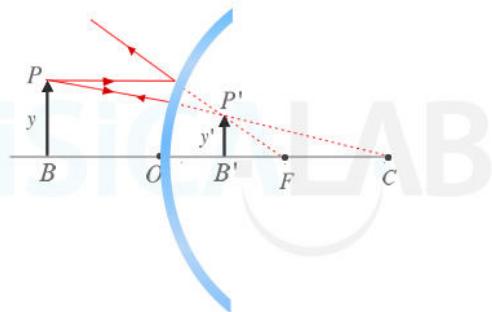
Para situar la imagen tras reflejarse en un espejo esférico no es necesario trazar todos los rayos, sólo serán necesarios determinar el punto de cruce de dos rayos. No obstante existen tres rayos fáciles de determinar:

- Todo rayo que llegue paralelo al eje se refleja de forma que él o su prolongación pase por el foco F.
- Todo rayo que incida normal a la superficie, es decir, que el rayo o su prolongación pase por el centro de curvatura C, se refleja y vuelve por la misma dirección.
- Todo rayo que se dirija al foco (él o su prolongación pase por el foco F), al reflejarse se propaga de forma paralela al eje óptico.

Considerando las reglas anteriores es fácil determinar la imagen formada en los espejos esféricos. Se puede plantear los siguientes casos:

### Imagen formada por un espejo convexo:

"En un **espejo convexo** siempre se produce una **imagen virtual, derecha y de menor tamaño al objeto**".

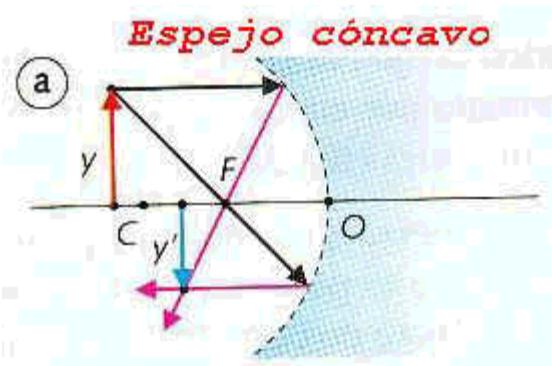


Espejo convexo.  $R > 0$

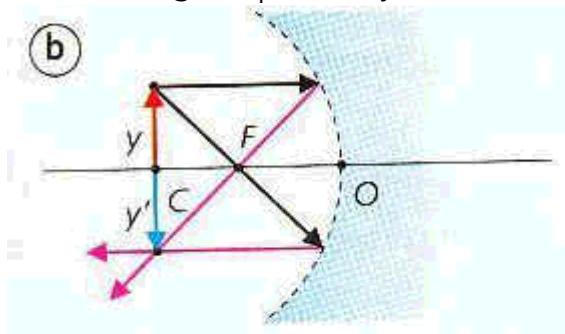
### Imagen formada por un espejo cóncavo:

En el caso de los espejos cóncavos se puede dar diversas situaciones que vamos a resolver a continuación.

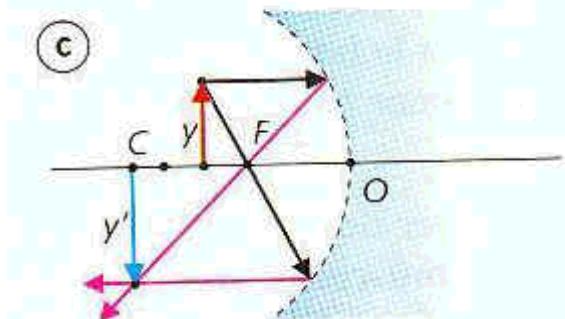
- a) El objeto se encuentra entre el infinito y el centro de curvatura: La imagen es **real, invertida** y situada entre el centro y el foco. Su tamaño es **menor** que el objeto.



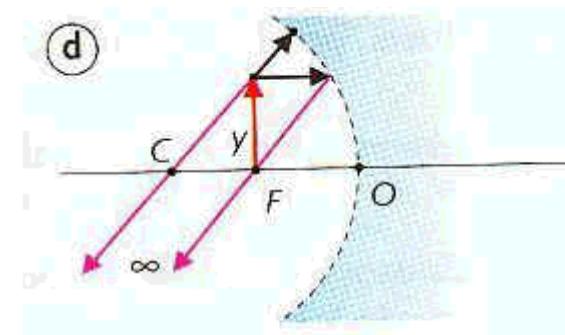
- b) El objeto se encuentra en el centro de curvatura: La imagen es **real, invertida** y situada en el mismo punto. Su **tamaño igual** que el objeto



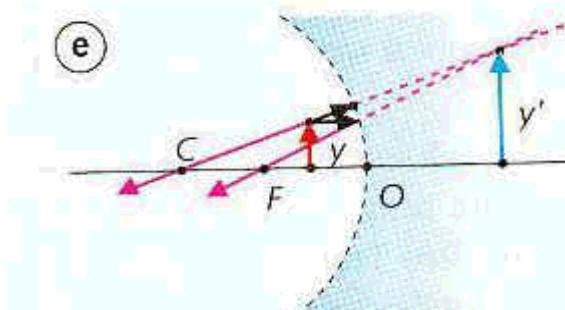
- c) El objeto se encuentra entre el centro de curvatura y el foco: La imagen es **real, invertida** y situada a la izquierda del centro de curvatura. Su tamaño es **mayor** que el objeto.



- d) El objeto se encuentra en el foco: Los rayos reflejados son paralelos y la imagen se forma en el infinito.



- e) El objeto se encuentra entre el foco y el espejo: La imagen es **virtual**, y conserva su orientación, es decir, es **derecha**. Su tamaño es **mayor** que el objeto.



## Ecuación de los espejos

Para determinar con exactitud la posición y el tamaño de la imagen formada se recurre a métodos analíticos. Si denominamos  $s$  y  $s'$  las distancias desde el centro óptico hasta el objeto y la imagen respectivamente, se obtiene que cumplen la siguiente condición:

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

Esta expresión es conocida como **ecuación general de los espejos**.

Se denomina **aumento lateral**,  $A_L$ , al cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto, y su valor esta relacionado con las distancias al objeto y a la imagen de la siguiente forma:

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

**Ejercicio:** Para el maquillaje se utilizan espejos en los que al mirarnos vemos que nuestra cara es mucho más grande de lo normal. ¿qué tipo de espejos son?

## 5.2 Formación de imágenes en dioptrios

Se denominan **dioptrio** a la superficie de separación entre dos medios transparentes y con índice de refracción diferentes. Al igual que los espejos, pueden ser planos, esféricos, etc.

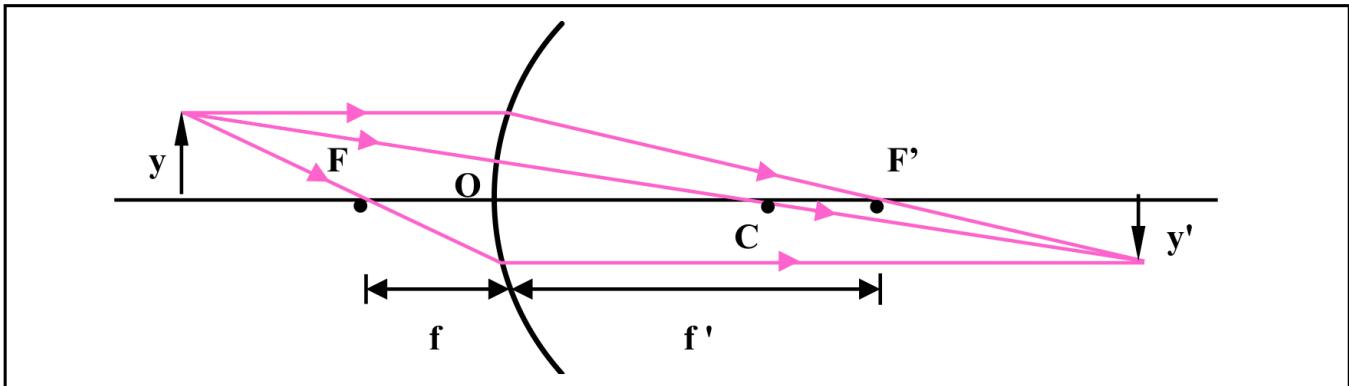
Para estudiar el comportamiento de los rayos en un dioptrio es necesario aplicar las leyes de la refracción o ley de Snell. Todo dioptrio se caracteriza por tener dos focos: los rayos que llegan paralelos al eje óptico, tras atravesar el dioptrio convergen en el **foco imagen  $F'$** , y el punto de donde parten los rayos que tras atravesar el dioptrio salen paralelos al eje formando la imagen en el infinito se denomina **foco objeto  $F$** . Las distancias desde el centro óptico  $O$  hasta los focos se llaman distancias focales ( $f$  y  $f'$ ), y están relacionadas con los índices de refracción y con el radio de curvatura de la siguiente forma:

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n_1}{n_2} \quad f + f' = R$$

Para formar la imagen conviene recordar lo siguiente:

- El rayo que llegue paralelo al eje se refracta pasando por el foco imagen.
- El rayo que llegue pasando por el foco objeto se refracta y sale paralelo al eje.
- El rayo que incide perpendicularmente (dirigido al centro de curvatura) no se desvía.

## Dioptrio esférico

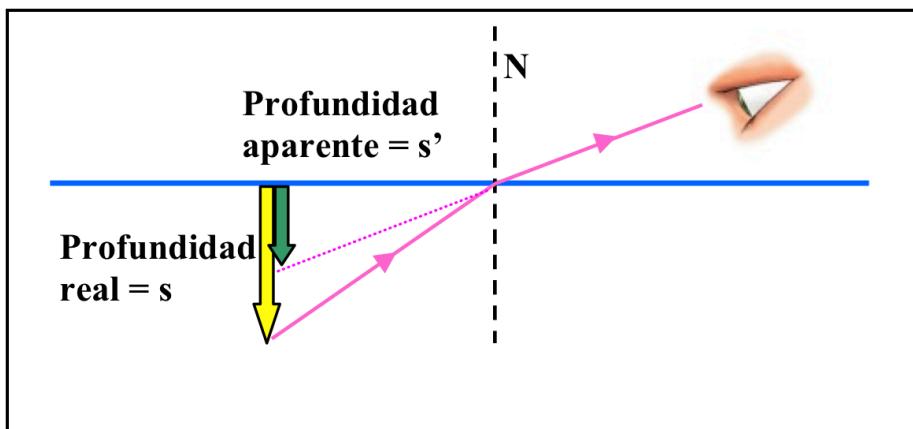


Según esto, la distancia a la que se forma la imagen y el aumento lateral se calcula según las ecuaciones:

$$\frac{f}{s} + \frac{f'}{s'} = 1 \quad y \quad A_L = \frac{y'}{y} = \frac{fs'}{f's}$$

## Dioptrio plano

El dioptrio plano sería el caso de cualquier superficie de separación plana entre dos medios transparente (por ejemplo, aire y agua), y se puede considerar con las ecuaciones del dioptrio esférico, teniendo en cuenta que el radio de curvatura es infinito.

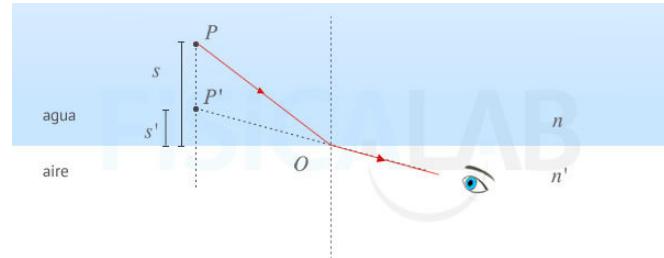
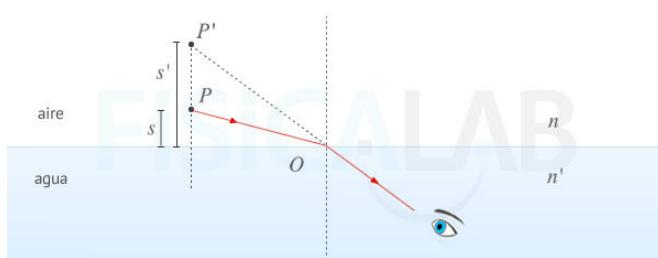


La ecuación resultante para determinar la posición de la imagen en el dioptrio plano es:

$$s' = \frac{n_2}{n_1} s$$

En el caso de un cuerpo sumergido en agua puede deducirse que al ser la constante de refracción del agua mayor que la del aire ( $n_2 > n_1$ ), la distancia de la imagen es menor que la del objeto ( $s' < s$ ), es decir, aparentemente el objeto se ve como si estuviera a menor profundidad.

**Ejercicio:** Explicar por qué cuando sumergimos un lápiz en un vaso de agua nos da la impresión de que el lápiz está roto.



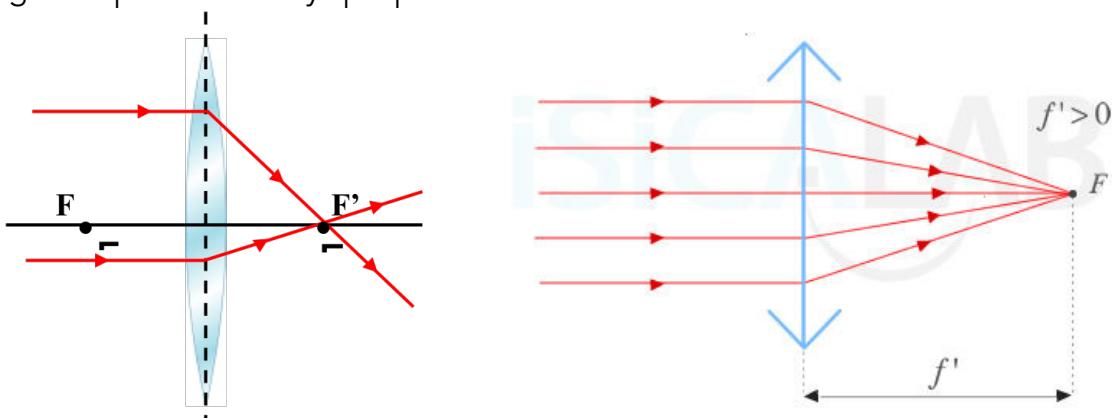
Las dos imágenes de la figura ilustran dos ejemplos concretos de dioptrio plano, y las variables que aparecen en la ecuación fundamental. Observa como el objeto y su imagen están siempre en el mismo lado. Observa, también, como la **profundidad aparente** del objeto varía, ya que el ojo sitúa su posición prolongando en linea recta, hacia atrás, los rayos que le llegan del mismo. En la imagen izquierda  $n' > n$ , y el objeto parece estar más lejos de lo que realmente está. En la imagen derecha,  $n' < n$ , y el objeto parece estar más cerca de lo que realmente está.

### 5.3 Formación de imágenes en lentes delgadas

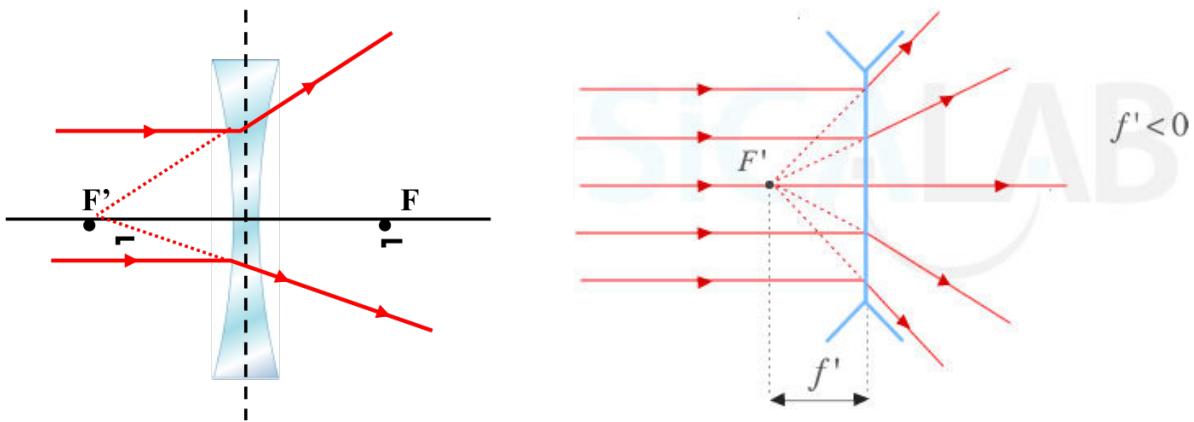
*“Una **lente** está formada por un medio transparente limitado por dos superficies, que pueden ser esféricas o planas.”*

Una lente puede considerarse como la asociación de dos dioptrios. Si el grosor de la lente es despreciable comparado con los radios de los dioptrios se denomina **lente delgada**. Las lentes delgadas tienen los mismos elementos descritos para los planos los dioptrios, con la particularidad de que las distancias focales objeto e imagen son iguales, pero colocadas cada uno en un lado de la lente ( $f = -f'$ ). Las lentes, según el comportamiento de los rayos pueden ser:

- **convergentes** cuando todo haz de rayos paralelos al eje al atravesar la lente convergen en un punto. El foco imagen  $F'$ , está situado detrás de la lente. Las lentes convergentes son más gruesa por el centro y que por los extremos.



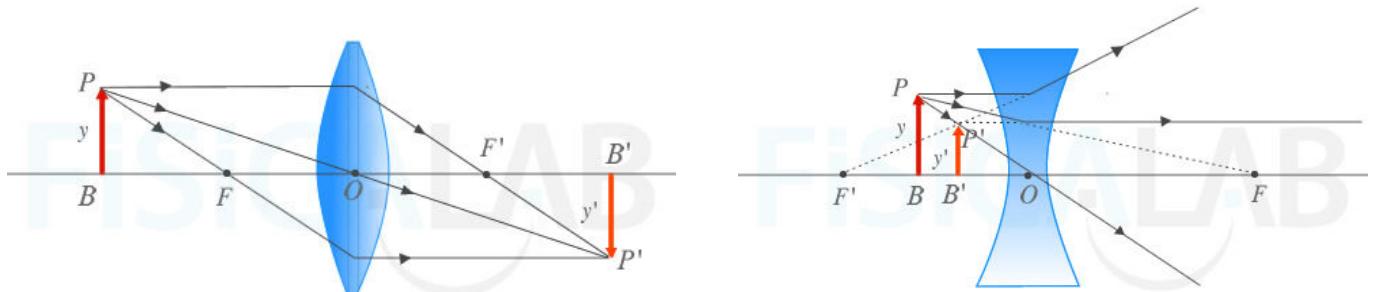
- **divergentes** cuando el haz de rayos paralelos al atravesar la lente divergen, es decir, se separan y sus prolongaciones son las que convergen en un punto. El foco imagen  $F'$ , está situado delante de la lente. Las lentes divergentes son más estrechas por el centro que por los extremos.



## Construcción de imágenes en lentes delgadas

El comportamiento de las lentes depende de si son convergentes o divergentes, y de la distancia a la que esté situada el objeto. De todas formas, la construcción esquemática de las imágenes es simple de realizar y sigue unos criterios análogos a los establecidos para los dioptrios esféricos. Para construir la imagen utilizaremos los siguientes **rayos principales**:

- El rayo que llegue paralelo al eje atraviesa la lente pasando (el rayo o su prolongación) por el foco imagen.
- El rayo que llegue pasando por el foco objeto (o su prolongación) al atravesar la lente sale paralelo al eje.
- El rayo que pase por el centro de la lente no se desvía.



Al aplicar los criterios para la formación de imágenes en lentes delgadas podemos obtener los siguientes casos:

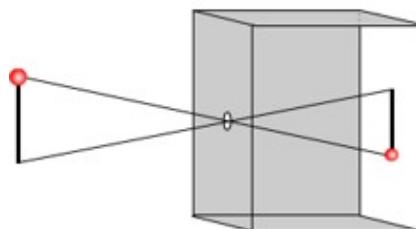
- Lentes convergentes
  - $s > |l|2f \rightarrow$  Imagen **real invertida de menor tamaño**.
  - $s = |l|2f \rightarrow$  Imagen **real invertida de igual tamaño**.
  - $|l|f < s < |l|2f \rightarrow$  Real invertida y de mayor tamaño.
  - $s=|l|f \rightarrow$  **No se forma imagen**.
  - $s < |l|f \rightarrow$  **Virtual derecha y de mayor tamaño**.
- Lentes divergentes: En las lentes divergentes, independientemente de la posición del objeto, la imagen que se obtiene es siempre **virtual, derecha y de menor tamaño**.

**EJERC:** Dibujar el esquema de la imagen que se formaría en una lente convergente con el objeto situado a una distancia igual a la mitad del foco.

## 5.4 Instrumentos ópticos

### Cámara oscura: cámara fotográfica

El instrumento óptico más simple es la cámara oscura, donde no existe ningún elemento óptico, sólo un pequeño orificio que, debido a la propagación rectilínea de la luz, forma una imagen invertida de la imagen.



"Se hace pasar la luz a través de un pequeño agujero hecho en un cuarto cerrado por todos sus lados. En la pared opuesta al agujero, se formará la imagen de lo que se encuentre enfrente".

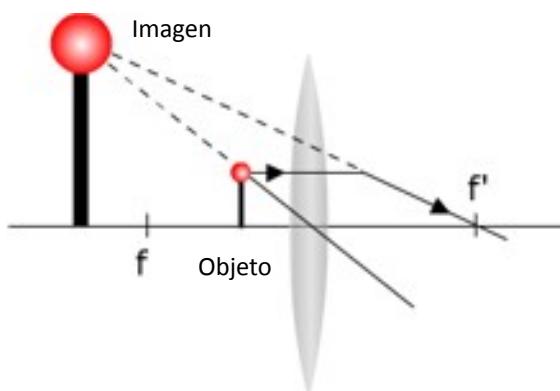
En el s. XVI **Giovanni Battista della Porta** dotó a la cámara oscura de una lente biconvexa que mejoraba notablemente la nitidez de la imagen.

La cámara oscura evolucionó con el tiempo hacia la cámara fotográfica, en la que la imagen se forma sobre una película fotosensible.



### Lupa

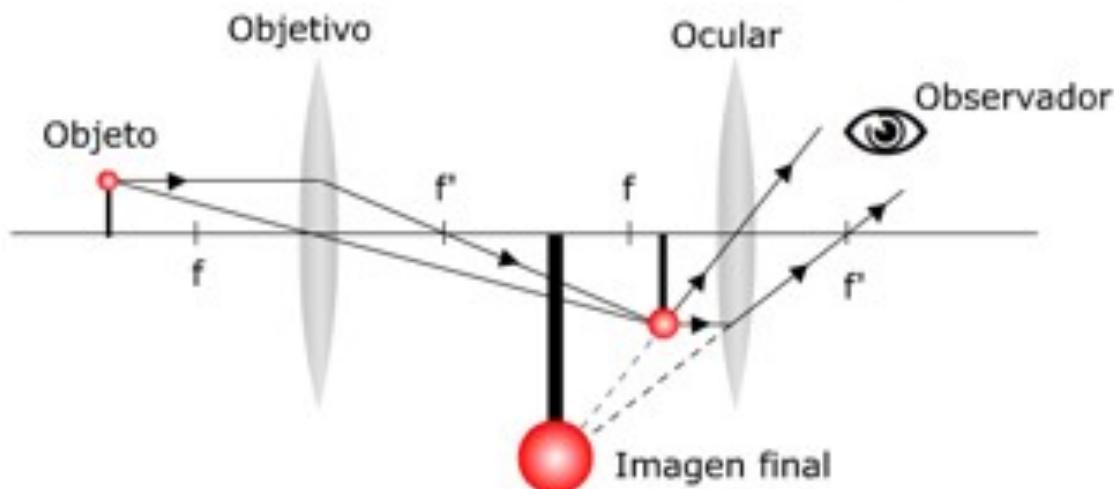
Un simple lente convergente nos permite ver los objetos aumentados si los situamos entre el foco y la lente. Se obtiene una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño, situada detrás del objeto. La potencia de la lupa depende de su distancia focal. Las lupas más potentes tienen una distancia focal corta, lo que se consigue dando un radio de curvatura pequeño a la lente (lente muy curvada)



## Microscopio

El microscopio ya es un verdadero sistema óptico. Se utiliza para ver objetos muy próximos y de pequeño tamaño. Consta de dos lentes convergentes. La que se sitúa más próxima al ojo se denomina **ocular** y la que está próxima al objeto, **objetivo**.

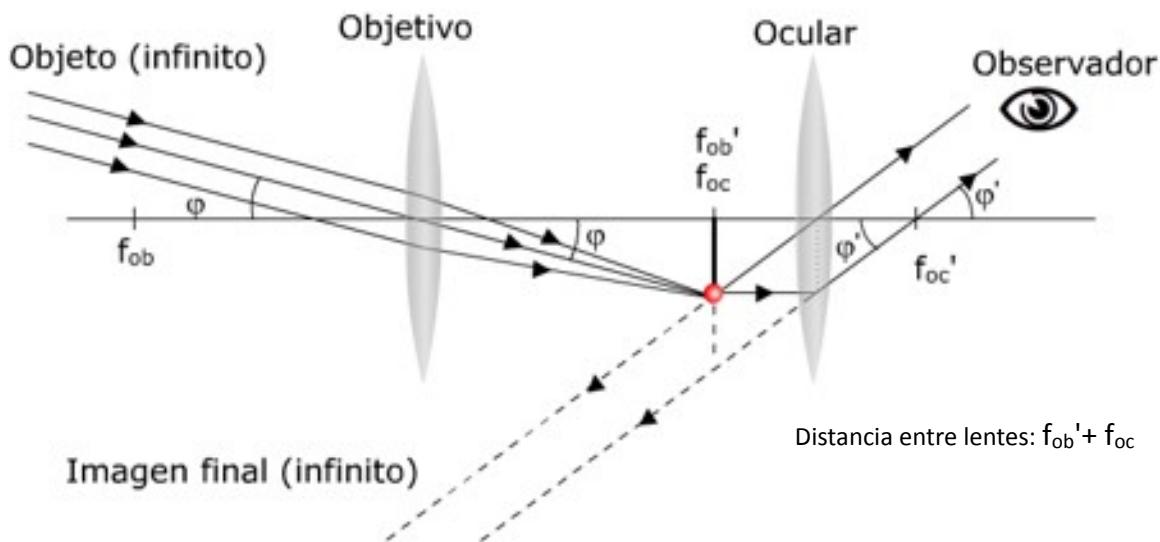
El objeto se coloca a una distancia mayor que la distancia focal del objetivo y su imagen (real) ampliada, sirve de objeto para la segunda lente. Si la imagen de la primera lente se coloca entre el foco y la segunda lente, ésta proporcionará una imagen nuevamente ampliada.



## Telescopio

Se utiliza para ver objetos grandes situados a mucha distancia. Consta de dos lentes convergentes, objetivo y ocular.

Como el objeto está a una distancia muy grande los rayos procedentes de él llegan paralelos, con lo que se refractan en el objetivo formando una imagen en el plano focal imagen (plano que contiene al foco imagen). El foco imagen del objetivo y el foco objeto del ocular coinciden, por tanto la imagen formada por el ocular (virtual) se encuentra en el infinito. Es invertida y mayor.



# CUESTIONES TEÓRICAS

## Teoría de ondas

1. a) ¿Qué es una onda electromagnética? Si una onda electromagnética que se propaga por el aire penetra en un bloque de metacrilato, justifique qué características de la onda cambian al pasar de un medio al otro.

b) El campo eléctrico de una onda electromagnética que se propaga en un medio es:

$$E(x,t) = 800 \operatorname{sen}(\pi 10^8 t - 1,25 x) \text{ (S.I.)}$$

Calcule su frecuencia y su longitud de onda y determine el índice de refracción del medio.

c = 3·10<sup>8</sup> m s<sup>-1</sup> (**Septiembre 2018**)

2. a) Defina el concepto de onda e indique las características de las ondas longitudinales y transversales. Ponga un ejemplo de cada tipo.

b) ¿Qué es una onda polarizada? Comente la siguiente frase: "Las ondas sonoras no se pueden polarizar". (**2012**)

3. a) Explique son ondas longitudinales y transversales.

b) ¿Qué diferencias señalaría entre las características de las ondas luminosas y sonoras? (**2010**)

4. Describe brevemente la difracción

5. De las siguientes ondas, ¿cuáles pueden ser polarizadas?

a) Ondas sonoras.

b) Luz visible

c) Ondas producidas en la superficie del agua

6. a) ¿Qué se entiende por resonancia y en qué condiciones se produce?

b) Explica lo que se entiende por refracción de una onda y en qué condiciones se produce?

c) Describe, en función de la diferencia de fase, qué ocurre cuando se superponen dos ondas progresivas armónicas de la misma amplitud y frecuencia.

d) Principio de Huygens. Aplicación a las propiedades de las ondas.

e) Ondas estacionarias

## Reflexión y refracción

7. a) Razona 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. (**Julio 2021**)

8. 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  $n_1 < n_2$ . Razona 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. (**Junio 2021**)

9. **a)** ¿Por qué un objeto situado en el fondo de una piscina llena de agua se observa desde el aire aparentemente a menor profundidad de la que en realidad se encuentra? Justifique la respuesta con la ayuda de un esquema.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; n_{\text{aire}} = 1; n_{\text{vidrio}} = 1,5 \quad (\text{Septiembre 2017})$$

10. **a)** Enuncie las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz. Explique la diferencia entre ambos fenómenos. (**Junio 2017**)

11. **a)** Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz y las leyes que lo rigen.

**b)** Razona si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:

**i)** la imagen de un objeto en un espejo convexo es siempre real, derecha y de menor tamaño que el objeto. **ii)** La luz cambia su longitud de onda y su velocidad de propagación al pasar del aire al agua. (**Junio 2014**)

12. **a)** Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz, y escriba sus leyes.

**b)** Explique si tienen la misma frecuencia y la misma longitud de onda tres haces de luz monocromática de colores azul, verde y rojo. ¿Se propagan en el vacío con la misma velocidad? ¿Qué características de esos haces cambian cuando se propagan en vidrio? Razona las respuestas. (**Reserva B Junio 2013**)

13. **a)** Explique los fenómenos de reflexión y refracción de una onda en la superficie de separación de dos medios.

**b)** Razona si es verdadera o falsa la siguiente afirmación: "Las ondas reflejada y refractada tienen igual frecuencia, igual longitud de onda y diferente amplitud que la onda incidente" (**2012**)

14. **a)** Explique los fenómenos de reflexión y refracción de una onda en la superficie de separación entre dos medios.

**b)** ¿Son iguales la frecuencia, velocidad de propagación y la longitud de onda de la luz incidente que las de la luz reflejada y transmitida? Razona la respuesta. (**2011**)

15. **a)** Explique el fenómeno de dispersión de la luz.

**b)** ¿Qué es el índice de refracción de un medio? Razona como cambian la frecuencia y la longitud de onda de una luz laser al pasar del aire al interior de una lámina de vidrio. (**2010**)

16. **a)** Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz.

**b)** ¿Tienen igual frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación la luz incidente, reflejada y refractada? Razona sus respuestas. (**Junio 2010**)

17. **a)** Enuncie las leyes de la reflexión y la refracción de la luz. Explique qué es el ángulo límite e indique para qué condiciones puede definirse.

- 
- b)** ¿Tienen igual frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación el rayo incidente y el refractado? Razona su respuesta. **(2009)**
18. **a)** ¿Qué mide la refracción de un medio? ¿Cómo cambian la frecuencia y la longitud de onda de un rayo laser al pasar del aire a una lámina de vidrio?  
**b)** Explique la dispersión de la luz por un prisma. **(2009)**
19. **a)** Enuncie las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz. Explique qué es el ángulo límite e indique para qué condiciones puede definirse.  
**b)** ¿Tienen igual frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación el rayo incidente y el refractado? Razona su respuesta. **(2009)**
20. Razona las siguientes cuestiones:  
**a)** Cuando un rayo pasa a un medio con mayor índice de refracción, ¿se acerca o se aleja de la normal?  
**b)** ¿Qué es el ángulo límite? ¿Existe este ángulo en la situación anterior? **(2007)**
21. **a)** Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz con ayuda de un esquema.  
**b)** Un haz de luz pasa del aire al agua. Razona cómo cambian su frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación. **(Junio 2006)**
22. **a)** Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz.  
**b)** El índice de refracción del agua respecto del aire es  $n > 1$ . Razona cuáles de las siguientes magnitudes cambian, y cómo, al pasar un haz de luz del aire al agua: frecuencia, longitud de onda, velocidad de propagación. **(2004)**
23. **a)** Explique en qué consiste la reflexión total. ¿En qué condiciones se produce?  
**b)** ¿Por qué la profundidad real de una piscina llena de agua es mayor que la profundidad aparente? **(2003)**
24. Di si es cierto o falso y razona la respuesta: "el índice de refracción del agua es menor que el del aire"
25. La reflexión total solamente se produce cuando la luz pasa de un medio de mayor a otro de menor índice de refracción. Explica por qué.
26. Un rayo de luz pasa del aire al agua con un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ . Discute cuáles de las siguientes magnitudes se modifican cuando la luz penetra en el agua:  
a) Longitud de onda; b) Frecuencia; c) Velocidad de propagación; d) Dirección de propagación.
27. Un haz de luz roja penetra en una lámina de vidrio de 30 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ .  
**a)** Explica si cambia el color de la luz al penetrar en el vidrio y determina el ángulo de refracción  
**b)** ¿Qué tiempo tarda la luz en atravesar la lámina de vidrio?

- 
28. **a)** Enuncie las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz. Explique las diferencias entre ambos fenómenos.
- b)** Compare lo que ocurre cuando un haz de luz incide sobre un espejo y sobre un vidrio de ventana.
29. **a)** ¿Por qué al pasar la luz del aire al agua el rayo se acerca a la normal y en el caso contrario se aleja?
- b)** Si el índice de refracción relativo de una sustancia respecto a otra es mayor que uno, ¿En cuál de los dos medios se propaga la luz con mayor velocidad?
30. **a)** Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con velocidad c. ¿Cambia su velocidad de propagación en un medio material? Defina el índice de refracción de un medio.
31. **a)** Refracción de la luz.
- b)** Cuando la luz pasa del vacío a un medio material, indique cuales de las siguientes magnitudes: frecuencia, longitud de onda, velocidad y amplitud, se modifican y en qué sentido.
32. **a)** Explique en qué consiste el fenómeno de la refracción de la luz y enuncie sus leyes.
- b)** Un haz de luz pasa del aire al agua. Razone cómo cambian su frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación.
33. **a)** Explique, con ayuda de un esquema, los fenómenos de reflexión y refracción de la luz y escriba sus leyes.
- ### Espectro electromagnético y teoría
34. **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. (**Junio 2017**)
35. **a)** Modelos corpuscular y ondulatorio de la luz; caracterización y evidencia experimental.
- b)** Ordene de mayor a menor frecuencia las siguientes regiones del espectro electromagnético: infrarrojo, rayos X, ultravioleta y luz visible y razone si puede tener la misma longitud de onda dos colores del espectro visible: rojo y azul por ejemplo. (**2012**)
36. **a)** Señale los aspectos básicos de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz e indique algunas limitaciones de dichas teorías.
- b)** Indique al menos tres regiones del espectro electromagnético y ordénelas en orden creciente de longitudes de onda. (**Junio 2005**)
37. **a)** ¿En qué consiste la dispersión de la luz? ¿Depende dicho fenómeno del índice de refracción del medio y/o de la longitud de onda de la luz?
- b)** Explique la dispersión de la luz por un prisma, ayudándose por un esquema.

- 
38. a) Explique la naturaleza de las ondas electromagnéticas. ¿Cómo caracterizaría mejor una onda electromagnética, por su frecuencia o por su longitud de onda?
- b) Sí, por desgracia, el Sol se apagara repentinamente, explica cuál de las siguientes radiaciones: infrarroja, visible o ultravioleta, sería la primera en dejar de llegar a la Tierra. ¿Cuál sería la primera en dejar de llegar al fondo del mar?
39. a) Describa brevemente el modelo corpuscular de la luz. ¿Puede explicar dicho modelo los fenómenos de interferencia luminosa?
- b) Dos rayos de luz inciden sobre un punto. ¿Pueden producir oscuridad? Explique razonadamente ese hecho
40. a) Sitúe, en orden creciente de frecuencias, las siguientes regiones del espectro electromagnético: infrarrojo; rayos X; ultravioleta y luz visible. Dos colores del espectro visible: rojo y verde, por ejemplo, ¿pueden tener la misma intensidad? ¿y la misma frecuencia?
41. a) Los rayos X, la luz verde, la luz roja, microondas y los rayos infrarrojos son radiaciones electromagnéticas. Ordénalas en orden creciente de sus frecuencias e indica algunas diferencias entre ellas.
- b) ¿Qué es una onda electromagnética? Explica sus características. ¿Cómo caracterizarías mejor una onda electromagnética: por su frecuencia o por su longitud de onda.

## Óptica geométrica

42. a) Con una lente queremos obtener una imagen virtual mayor que el objeto. Rzone, realizando además el trazado de rayos correspondiente, qué tipo de lente debemos usar y dónde debe estar situado el objeto. (**Junio 2021**)
43. 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. (**Julio 2020**)
44. 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. (**Junio 2019**)
45. a) Señale las diferencias entre lentes convergentes y divergentes, así como al menos un uso de cada una de ellas. (**Septiembre 2018**)
46. 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. (**Junio 2018**)

- 
47. a) Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz y las leyes que los rigen.  
b) Razoné si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones: i) la imagen de un objeto en un espejo convexo es siempre real, derecha y de menor tamaño que el objeto; ii) la luz cambia su longitud de onda y su velocidad al pasar del aire al agua. (**Junio 2014**)
48. a) Explique la marcha de rayos utilizada para la construcción gráfica de la imagen formada por una lente convergente y utilícela para obtener la imagen de un objeto situado entre el foco y la lente. Explique las características de dicha imagen.  
b) ¿Cuáles serían las características de la imagen si el objeto estuviera situado a una distancia de la lente igual a tres veces la distancia focal? (**Septiembre 2013**)
49. a) Explique la formación de imágenes por un espejo convexo y, como ejemplo, considere un objeto entre el centro de curvatura y el foco.  
b) Explique las diferencias entre imagen virtual e imagen real. Razoné si puede formarse una imagen real con un espejo convexo. (**Junio 2012**)
50. a) Explique la formación de imágenes y sus características en una lente divergente.  
b) ¿Pueden formarse imágenes virtuales con lentes convergentes? Razoné la respuesta. (**Junio 2008**)
51. a) Formación de imágenes en espejos.  
b) Los fabricantes de espejos retrovisores para automóviles advierten que los objetos pueden estar más cerca de lo que parece en el espejo. ¿Qué tipo de espejo utilizan y por qué se produce ese efecto? Justifique la respuesta mediante un diagrama de rayos. (**2011**)
52. a) Construya la imagen formada con una lente convergente de un objeto situado a una distancia,  $s$ , de la lente igual al doble de la distancia focal,  $f$ , y comente sus características.  
b) ¿Pueden formarse imágenes virtuales con lentes convergentes? Razoné la respuesta. (**2011**)
53. a) Explica los principios de funcionamiento óptico de una cámara fotográfica. El objetivo, ¿es una lente convergente o divergente? ¿Dónde debe situarse el objeto a fotografiar, por delante o por detrás del foco del objetivo? La imagen que se forma, ¿es real o virtual? ¿Es derecha o invertida? Ilustra tus explicaciones con el trazado de los rayos
54. a) Reflexión de la luz.  
b) Los espejos retrovisores de los coches suelen dar imágenes de menor tamaño que la real. Explicarlo dibujando un esquema de la dirección de los rayos.  
c) ¿Puede formarse una imagen real con un espejo convexo? Razoné la respuesta utilizando los esquemas que considere oportunos.
55. Un objeto luminoso se encuentra delante de un espejo esférico cóncavo. Efectúa la construcción geométrica de la imagen e indica su naturaleza si el objeto está situado a una distancia igual, en valor absoluto, a:  
a) La mitad de la distancia focal del espejo

---

b) El triple de la distancia focal del espejo

56. Describe el funcionamiento de una lupa y analiza las características de sus imágenes. ¿Se pueden recoger estas imágenes en una pantalla?

57. Explica razonadamente, basándote en el trazado de rayos, por qué la profundidad aparente de una piscina llena de agua es menor que la profundidad real.

58. Un espejo esférico cóncavo tiene un radio de curvatura  $R$ . Dibuja los correspondientes diagramas de rayos para localizar la imagen de un objeto situado a una distancia del espejo de:

- a)  $2R$ ; b)  $R$ ; c)  $R/2$ ; d)  $R/3$

Indica en cada caso las características de la imagen.

# PROBLEMAS

## Ondas electromagnéticas

1. **b)** El campo eléctrico de una onda electromagnética que se propaga en un medio es:

$$E(x,t) = 800 \operatorname{sen}(\pi 10^8 t - 1,25 x) \text{ (S.I.)}$$

Calcule su frecuencia y su longitud de onda y determine el índice de refracción del medio.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$  (**Septiembre 2018**)

## Reflexión y refracción

2. **b)** Un rayo de luz con componentes azul y roja de longitudes de onda en el aire de  $4,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  y  $6,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ , 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. (**Julio 2021**)

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{material(azul)}} = 1,47$ ;  $n_{\text{material(roja)}} = 1,44$

3. **b)** Sea un recipiente que contiene agua que llega hasta una altura de  $0,25 \text{ m}$ , 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.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{aceite}} = 1,47$ ;  $n_{\text{agua}} = 1,33$  (**Junio 2021**)

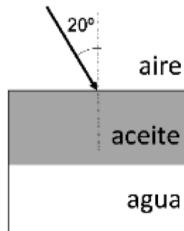
4. **b)** Desde el aire se observa un objeto luminoso que está situado a  $1 \text{ m}$  debajo del agua. **(i)** Si desde dicho objeto sale un rayo de luz que llega a la superficie formando un ángulo de  $15^\circ$  con la normal, ¿cuál es el ángulo de refracción en el aire?; **(ii)** calcule la profundidad aparente a la que se encuentra el objeto.  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{agua}} = 1,33$  (**Septiembre 2018**)

5. **b)** Sobre una de las caras de una lámina de vidrio de caras paralelas y espesor  $8 \text{ cm}$ , colocada horizontalmente en el aire, incide un rayo de luz con un ángulo de  $30^\circ$  respecto de la normal. Calcule el tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina y el desplazamiento horizontal, con respecto a la normal en el punto de incidencia, que experimenta el rayo alemerger por la otra cara de la lámina de vidrio.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{vidrio}} = 1,5$  (**Septiembre 2017**)

6. **b)** Una antena de radar emite en el vacío radiación electromagnética de longitud de onda  $0,03 \text{ m}$ , 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.  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$  (**Junio 2017**)

7. 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?



$$c=3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}; n_{\text{aire}}=1; n_{\text{aceite}}=1,45; n_{\text{agua}}=1,33 \text{ (Junio 2017)}$$

8. b) Una antena de radar emite en el vacío radiación electromagnética de longitud de onda  $0,03 \text{ m}$ , 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.

$$C=3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \text{ (Junio 2017)}$$

9. Un rayo de luz con una longitud de onda de  $300 \text{ nm}$  se propaga en el interior de una fibra de vidrio, de forma que sufre reflexión total en sus caras.

a) Determine para qué valores del ángulo que forma el rayo luminoso con la normal a la superficie de la fibra se producirá reflexión total si en el exterior hay aire. Razone la respuesta.

b) ¿Cuál será la longitud de onda del rayo de luz alemerger de la fibra óptica?

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}; n_{\text{vidrio}} = 1,38; n_{\text{aire}} = 1 \text{ (Junio 2016)}$$

10. Un rayo de luz roja, de longitud de onda en el vacío  $650 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ , emerge al agua desde el interior de un bloque de vidrio con un ángulo de  $45^\circ$ . La longitud de onda en el vidrio es  $433 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ .

a) Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y determine el índice de refracción del vidrio y el ángulo de incidencia del rayo.

b) ¿Existen ángulos de incidencia para los que la luz sólo se refleja? Justifique el fenómeno y determine el ángulo a partir del cual ocurre este fenómeno.

$$n_{\text{agua}} = 1,33 \text{ (Junio 2015)}$$

11. Un buceador enciende una linterna debajo del agua y dirige el haz luminoso hacia arriba formando un ángulo de  $30^\circ$  con la vertical. Explique con ayuda de un esquema la marcha de los rayos de luz y determine:

a) El ángulo con que emergirá la luz del agua.

b) El ángulo de incidencia a partir del cual la luz no saldrá del agua.

$$\text{Datos: } n_{\text{aire}}=1; n_{\text{agua}}=1,33 \text{ (Septiembre 2014)}$$

12. Un haz de luz monocromática tiene una longitud de onda de  $700 \text{ nm}$  en el aire y  $524 \text{ nm}$  en el interior acuoso del ojo humano.

**a)** Explique por qué cambia la longitud de onda la luz en el interior del ojo humano y calcule el índice de refracción del humor acuoso.

**b)** Calcule la frecuencia de esa radiación monocromática y su velocidad de propagación en el ojo humano.

$c=3 \times 10^8$  m/s;  $n_{\text{aire}}=1$  (**Reserva B Septiembre 2013**)

13. Un haz de luz láser que se propaga por un bloque de vidrio tiene una longitud de onda de 450 nm. En el punto de emergencia al aire del haz, el ángulo de incidencia es de  $25^\circ$  y el ángulo de refracción de  $40^\circ$ .

**a)** Dibuje la trayectoria de los rayos y calcule el índice de refracción del vidrio y la longitud de onda de la luz láser en el aire.

**b)** Razona para qué valores del ángulo de incidencia el haz de luz no sale del vidrio.

$c=3 \times 10^8$  m/s;  $n_{\text{aire}}=1$  (**Reserva A Junio 2013**)

14. Un haz compuesto por luces de colores rojo y azul incide desde el aire sobre una de las caras de un prisma de vidrio con un ángulo de incidencia de  $40^\circ$ .

**a)** Dibuje la trayectoria de los rayos en el aire y tras penetrar en el prisma y calcule el ángulo que forman entre sí los rayos en el interior del prisma si los índices de refracción son  $n_{\text{rojo}}=1,612$  para el rojo y  $n_{\text{azul}}=1,671$  para el azul, respectivamente.

**b)** Si la frecuencia de la luz roja es  $4,2 \times 10^{14}$  Hz calcule su longitud de onda dentro del prisma.

$c=3 \times 10^8$  m/s;  $n_{\text{aire}}=1$  (**Junio 2013**)

15. Un haz de luz que se propaga por el interior de un bloque de vidrio incide sobre una superficie del mismo modo que una parte del haz se refleja y la otra se refracta al aire, siendo el ángulo de reflexión  $30^\circ$  y el de refracción  $40^\circ$ .

**a)** Calcule razonadamente el ángulo de incidencia del haz, el índice de refracción del vidrio y la velocidad de propagación de la luz en el vidrio.

**b)** Explique el concepto de ángulo límite y determine su valor para el caso descrito.

$c=3 \times 10^8$  m/s (**2012**)

16. Un haz de luz incide desde el aire en una lámina de vidrio con un ángulo de  $30^\circ$ . Las longitudes de onda en el aire de las componentes azul y roja de la luz son,  $\lambda(\text{azul})=486$  nm y  $\lambda(\text{roja})=656$  nm.

**a)** Explique con ayuda de una esquema cómo se propaga la luz en el vidrio y calcule el ángulo que forman los rayos azul y rojo. ¿Se propagan con la misma velocidad? Justifique la respuesta.

**b)** Determine la frecuencia y la longitud de onda en el vidrio de la componente roja.

$c=3 \times 10^8$  m/s;  $n_{\text{vidrio}}(\text{azul})=1,7$ ;  $n_{\text{vidrio}}(\text{roja})=1,6$  (**2012**)

17. **a)** Un rayo de luz monocromática emerge al aire, desde el interior de un bloque de vidrio, en una dirección que forma un ángulo de  $30^\circ$  con la normal a la superficie. Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y calcule el ángulo de incidencia y la velocidad de propagación de la luz en el vidrio.

**b)** ¿Existen ángulos de incidencia para los que la luz no sale del vidrio? Explique este fenómeno y calcule el ángulo límite.

$c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $n_{\text{vidrio}}=1,5$ ;  $n_{\text{aire}}=1$ . (2011)

18. Un rayo de luz de frecuencia  $5\times 10^{14} \text{ Hz}$  penetra en una lámina de vidrio de caras paralelas con un ángulo de incidencia de  $30^\circ$ .

**a)** Dibuje en un esquema los rayos incidente, refractado en el vidrio y emergente al aire y determine los ángulos de refracción y de emergencia.

**b)** Explique qué características de la luz cambian al penetrar en el vidrio y calcule la velocidad de propagación dentro de la lámina.

$c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $n_{\text{vidrio}}=1,5$  (2011)

19. Una onda electromagnética tiene en el vacío una longitud de onda de  $5\times 10^{-7} \text{ m}$ .

**a)** Explique qué es una onda electromagnética y determine la frecuencia y el número de onda de la onda indicada.

**b)** Al entrar la onda en un medio material su velocidad se reduce  $3/4c$ . Determine el índice de refracción del medio, la frecuencia y la longitud de onda de ese medio.

$c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ; (Junio 2011)

20. Un haz láser que se propaga por un bloque de vidrio tiene una longitud de onda de 550 nm. El haz emerge hacia el aire con un ángulo de incidencia de  $25^\circ$  y un ángulo de refracción de  $40^\circ$ .

**a)** Calcule el índice de refracción del vidrio y la longitud de onda de la luz láser en el aire.

**b)** Razona para qué valores del ángulo de incidencia el haz láser no sale del vidrio.

$c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $n_{\text{aire}}=1$  (2010)

21. Una antena emite una onda de radio de  $6\times 10^7 \text{ Hz}$ .

**a)** Explique las diferencias entre esa onda y una onda sonora de la misma longitud de onda y determine la frecuencia de esta última.

**b)** La onda de radio penetra en un medio material y su velocidad se reduce a  $0,75c$ . Determine su frecuencia y su longitud de onda en ese medio.

$c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $v_{\text{sonido}}=340 \text{ m/s}$  (2010)

22. Un teléfono móvil opera con ondas electromagnéticas cuya frecuencia es  $1,2\times 10^9 \text{ Hz}$ .

**a)** Determine la longitud de onda.

**b)** Esas ondas entran en un medio en el que la velocidad de propagación se reduce a  $5/6c$ . Determine el índice de refracción del medio y la frecuencia y la longitud de onda en dicho medio.

$c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $n_{\text{aire}}=1$ ;  $v_{\text{sonido}}=340 \text{ m/s}$  (2010)

23. Un haz de luz roja penetra en un vidrio de 30 cm de espesor con un ángulo de incidencia de  $30^\circ$ .

**a)** Explique si cambia el color de la luz al penetrar al vidrio y determine el ángulo de refracción.

**b)** Determine el ángulo de emergencia (ángulo que forma el rayo que sale de la lámina con la normal) y el tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina de vidrio.

$c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $n_{\text{vidrio}}=1,3$ ;  $n_{\text{aire}}=1$ . **(2010)**

24. Un rayo laser de  $55\times 10^{-8} \text{ m}$  emerge desde el interior de un bloque de vidrio hacia el aire. El ángulo de incidencia es de  $25^\circ$  y el de refracción es de  $40^\circ$ .

**a)** Calcule el índice de refracción del vidrio y la longitud de onda del rayo laser en el aire.

**b)** Explique para qué valores del ángulo de incidencia el rayo no sale del vidrio.

$n_{\text{aire}}=1$  **(2009)**

25. Una antena emite una onda de radio de  $6\times 10^7 \text{ Hz}$ .

**a)** Explique las diferencias entre esa onda y una onda sonora de la misma longitud de onda y determine la frecuencia de esta última.

**b)** La onda de radio penetra en un medio y su velocidad se reduce  $0.75c$ . Determine su frecuencia y su longitud de onda en ese medio.

$c = 3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $V_s = 340 \text{ m/s}$  **(Junio 2009)**

26. Un foco luminoso puntual está situado bajo la superficie de un estanque de agua.

**a)** Un rayo de luz pasa del aire al agua con un ángulo de incidencia de  $30^\circ$ . Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y calcule el ángulo de refracción.

**b)** Explique qué es el ángulo límite y determine su valor para este caso.

$n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{agua}} = 1.33$  **(2007)**

27. Un haz de luz de  $5 \cdot 10^4 \text{ Hz}$  viaja por el interior de un diamante.

**a)** Determine la velocidad de propagación y la longitud de onda de esa luz en el diamante.

**b)** Si la luz emerge del diamante al aire con un ángulo de refracción de  $10^\circ$ , dibuje la trayectoria del haz y determine el ángulo de incidencia.

Datos:  $c=3\times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $n_{\text{diamante}} = 2.42$  **(Junio 2007)**

28. El espectro visible contiene frecuencias entre  $4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  y  $7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .

**a)** Determine las longitudes de onda correspondientes a dichas frecuencias en el vacío.

**b)** ¿Se modifican estos valores de las frecuencias y de las longitudes de onda cuando la luz se propaga por el agua? En caso afirmativo, calcule los valores correspondientes.

(Índice de refracción del agua respecto al aire:  $n = 1,3$ )  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . **(2004)**

29. Cuando un rayo de luz se propaga a través del agua ( $n = 1,33$ ) emerge hacia el aire para ciertos valores del ángulo de incidencia y para otros no.

**a)** Explique este fenómeno e indique para qué valores del ángulo de incidencia emerge el rayo.

**b)** ¿Cabría esperar un hecho similar si la luz pasara del aire al agua?

30. Un rayo de luz pasa del agua al aire con un ángulo de incidencia de  $30^\circ$  respecto a la normal.

**a)** Haga en un esquema los rayos incidentes y refractado y calcule el ángulo de refracción.

**b)** ¿Cuál debería ser el ángulo de incidencia para que el rayo refractado fuera paralelo a la superficie de separación agua – aire.

(Índice de refracción del agua respecto al aire:  $n = 1,3$ )

31. Un rayo de luz amarilla, emitida por una lámpara de sodio, tiene una longitud de onda en el vacío de  $580 \cdot 10^{-9}$  m.

**a)** Determine la velocidad de propagación y la longitud de onda de dicha luz en el interior de una fibra de cuarzo, cuyo índice de refracción es  $n = 1,5$ .

**b)** ¿Pueden existir valores del ángulo de incidencia para los que un haz de luz, que se propaga por el interior de una fibra de cuarzo, no salga al exterior? Explique el fenómeno y, en su caso, calcule los valores del ángulo de incidencia para los cuales tiene lugar.

Dato:  $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>.

32. El espectro visible en el aire está comprendido entre las longitudes de onda 380 nm (violeta) y 780 nm (rojo).

**a)** Calcule las frecuencias de estas radiaciones extremas. ¿Cuál de ellas se propaga a mayor velocidad?

**b)** Determine entre qué longitudes de onda está comprendido el espectro visible en el agua, cuyo índice de refracción es  $4/3$ .

Dato:  $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>.

33. **a)** Explica en qué consiste y cuándo ocurre el fenómeno de reflexión total de una onda. Define el ángulo límite o crítico.

**b)** Una onda viaja por un medio con la velocidad  $v$  e incide sobre la frontera de separación con otro medio, donde la velocidad de propagación es  $v' = 2.v$ . Si el ángulo de incidencia es  $\phi = 10^\circ$ , calcula el ángulo de refracción,  $\phi'$ . ¿Para qué ángulos de incidencia se producirá reflexión total?

34. Un foco luminoso se encuentra dentro de una piscina llena de agua, cuyo índice de refracción es 1,30. Calcula la velocidad de la luz en el agua y el ángulo límite para la salida de la luz del agua al aire

**Sol. a)**  $2,31 \cdot 10^8$  m/s ; **b)**  $50,3^\circ$

35. Tenemos un recipiente con agua cuya superficie está cubierta por una capa de aceite. Si un haz de luz pasa del aire al aceite con un ángulo de incidencia de  $40^\circ$ , halla el ángulo de refracción en el agua.

Datos:  $n_{\text{aceite}}=1,45$  ;  $n_{\text{agua}}=1,33$

## Óptica geométrica

36. **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. (**Junio 2021**)

---

37. **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. (**Julio 2020**)

38. **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 2019**)

39. **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. (**Junio 2018**)

40. ¿Cuál es la potencia óptica de una lente bicóncava con ambos radios de curvatura iguales a 20 cm y un índice de refracción de 1,4?

**Sol.** **-4 Dioptrías**

41. Un sistema óptico centrado está formado por dos lentes delgadas convergentes de igual distancia focal ( $f = 10 \text{ cm}$ ) separadas 40 cm. Un objeto lineal de 1 cm se coloca delante de la primera lente a una distancia de 15 cm. Determina:

- La posición, el tamaño y la naturaleza de la imagen formada pos la primera lente.
- La posición de la imagen final del sistema, efectuando su construcción geométrica.

**Sol.** a)  $s' = 30 \text{ cm}$ ; b) **No hay imagen final del sistema.**

42. Un objeto situado a 10 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen real a 8 cm del espejo. Si el objeto se mueve a una nueva posición a 20 cm del espejo, ¿cuál es la nueva posición de la imagen? ¿La última imagen es real o virtual?

**Sol.**  $s' = -5,7 \text{ cm}$

43. El ojo normal se asemeja a un sistema óptico formado por una lente convergente (el cristalino) de +15 mm de distancia focal. La imagen de un objeto lejano (en el infinito) se forma sobre la retina, que se considera como una pantalla perpendicular al eje óptico. Calcula:

- La distancia entre la retina y el cristalino
- La altura de la imagen de un árbol de 16 m de altura, que está a 100 m del ojo.

**Sol.** a)  $s' = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ; b)  $y' = -2,4 \text{ mm}$

44. Queremos ver una imagen de nuestra cara para afeitarnos o maquillarnos. La imagen debe ser derecha, virtual y ampliada 1,5 veces si colocamos la cara a 25 cm del espejo.

- ¿Qué tipo de espejo utilizaremos?
- ¿Cuál debe ser la distancia focal?
- Si queremos que la imagen se aumente dos veces, con el mismo espejo, ¿dónde debemos poner la cara?

---

**Sol. b) -75 cm; c) s=-37,5 cm**

45. Un espejo esférico forma una imagen virtual, derecha y de tamaño doble que el objeto cuando éste está situado verticalmente sobre el eje óptico y a 10 cm del espejo. Calcula:

- a) La posición de la imagen
- b) El radio de curvatura

Dibuja la marcha de los rayos.

**Sol. a) 20 cm; b) -40 cm**