



## UNIDAD DIDÁCTICA Nº 9. ÓPTICA GEOMÉTRICA.

### 1 ÓPTICA GEOMÉTRICA.

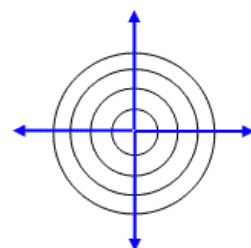
La Óptica Geométrica se ocupa de los cambios de dirección que experimenta la luz cuando atraviesa un medio material. Para ello se considera que:

a.- La trayectoria de la luz se puede describir mediante leyes geométricas.

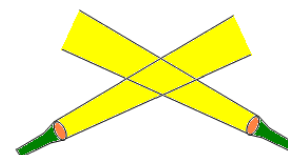
b.- La propagación de la luz se representa mediante el **rayo luminoso**. Como sabes, la luz es una onda electromagnética, pero muchos aspectos de la óptica se pueden estudiar y entender sin necesidad de utilizar el carácter electromagnético de la misma. Para ello ha sido de mucha utilidad el concepto de rayo. La luz se puede representar por una línea recta perpendicular a los frentes de onda, cuyo sentido indica la propagación de la misma.

c.- Es fundamental conocer la reflexión y la refracción que pueden experimentar los rayos luminosos en su desplazamiento por un medio material.

d.- Los rayos de luz son independientes. Al cruzarse dos rayos no se afectan entre sí. Este hecho es de gran importancia pues nos permite explicar los fenómenos de sombra y de penumbra que se forman cuando una luz ilumina un objeto.



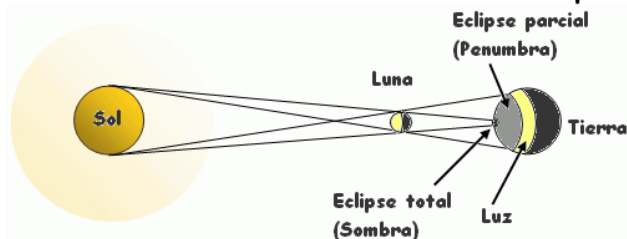
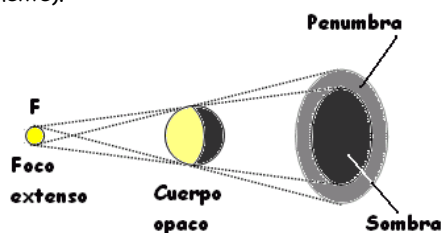
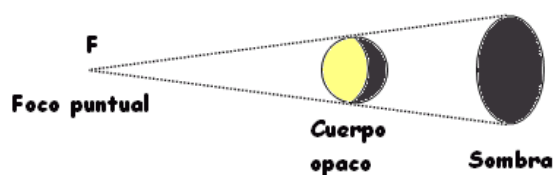
El rayo es siempre perpendicular al frente de onda.



Al cruzarse dos rayos de luz, se no se produce interferencia.

Si un foco de luz que podemos considerar como puntual (dimensiones despreciables frente a la distancia al objeto) ilumina un objeto, detrás aparecerá una zona de sombra

Si el foco de luz no es puntual, al iluminar un objeto, detrás aparecerá una zona de sombra y otra de penumbra (iluminada parcialmente).



Los eclipses de sol pueden explicarse mediante el concepto de rayo.

La Luna es 400 veces más pequeña que el sol pero está cuatrocientas veces más cerca. Esto implica que cuando la Luna se interpone exactamente entre la Tierra y el Sol, es capaz de cubrir el disco solar, con lo que tendremos un eclipse total.

Sin embargo, al ser el Sol un foco extenso (no puntual), sobre la Tierra habrá una zona donde habrá sombra absoluta y otra zona alrededor de esta de penumbra.

## 2 CONCEPTOS BÁSICOS EN LA ÓPTICA GEOMÉTRICA

Como ya sabes, en la óptica geométrica representamos la luz como líneas denominadas rayos. Además necesitamos dos conceptos más:

### 2.1.- Índice de refracción.

El valor de la velocidad de la luz depende del medio en el que se propaga. En el vacío, la velocidad de la luz la representamos por "c". Su valor es de 300.000 km/s ( $3 \cdot 10^8$  m/s) y es el mayor valor posible.

En cambio en cualquier otro medio, la velocidad de la luz siempre será menor que en el vacío.

Por este motivo, cualquier medio en el que la luz se pueda mover se caracteriza por una magnitud escalar denominada **índice de refracción**, representado por la letra "n". Esta magnitud representa el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio considerado.

| Medio                        | Índice de refracción |
|------------------------------|----------------------|
| Agua (25 °C)                 | 1,33                 |
| Alcohol etílico (20 °C)      | 1,36                 |
| Disulfuro de carbono (20 °C) | 1,63                 |
| Aire (1 atm y 20 °C)         | 1,0003               |
| Cristal (crown)              | 1,52                 |
| Cristal (flint denso)        | 1,66                 |
| Glicerina                    | 1,47                 |
| Diamante                     | 2,42                 |

Matemáticamente:

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

El índice de refracción no tiene dimensiones y jamás puede ser menor que la unidad.

**El índice de refracción varía de un medio a otro por que la velocidad de la luz cambia al cambiar la longitud de onda de la misma. La frecuencia no cambia.**

Es posible calcular la longitud de onda en cualquier medio. Para ello, como la luz pasa de un medio a otro manteniendo inalterable la frecuencia, se cumple que:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 \cdot f_0}{\lambda \cdot f_0}$$

De donde:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

Como sabes, un medio puede ser homogéneo (la misma composición en todos los puntos del mismo) y heterogéneo (la composición varía según el punto considerado), en principio, en los medios homogéneos, la velocidad de la luz sería independiente de la dirección en que se propague. Sin embargo esto no es así. En algunas sustancias, la velocidad de la luz puede depender además de la dirección en que la luz atraviesa la sustancia. Por ello nos interesa distinguir dos tipos de medios con respecto a la luz:



La calcita es un medio homogéneo y anisótropo. Se produce el fenómeno de la birrefringencia.

- **Medios homogéneos e isótropos.** Son medios que tienen la misma composición en todos sus puntos y además, el índice de refracción no varía con la dirección en el que la luz atraviesa el medio.

- **Medios homogéneos y anisótropos.** Tienen la misma composición en todos sus puntos, pero el índice de refracción depende de la dirección en el que la luz atraviesa el medio.

## 2.2.- Principio de Fermat.

Enunciado por el francés **Pierre de Fermat** en 1657.

Cuando la luz va de un punto a otro la trayectoria de la luz es aquella en la que el camino recorrido es mínimo.

Esto trae como consecuencia que la trayectoria de la luz es rectilínea en el caso el que la luz se propague en un medio homogéneo e isótropo.

## 3 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ.

### 3.1.- Reflexión de la luz.

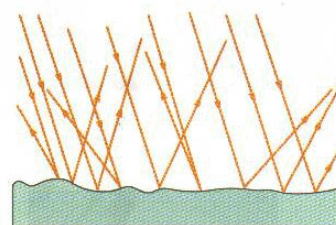
Se denomina así al cambio de dirección que experimenta la luz cuando choca con un medio que no puede atravesar.

La reflexión de la luz puede ser de dos tipos:

**a.- Reflexión difusa.** Cuando la superficie sobre la que incide la luz es irregular. Entonces cada rayo de luz se refleja con distinto ángulo. Este tipo de reflexión es responsable de que veamos los objetos.

**b.- Reflexión especular.** La superficie sobre la que incide la luz es lisa y está pulimentada (metal o espejo). En estas circunstancias, todos los rayos de luz se reflejan según una única dirección.

En el caso de la reflexión especular hay dos leyes que ya conoces (**Leyes de la Reflexión**) y vamos a recordar:



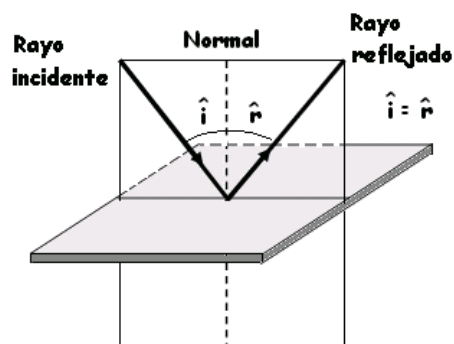
En la reflexión difusa, cada rayo de luz se refleja con distinto ángulo.



Reflexión especular en la superficie del agua.

a.- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal (línea perpendicular a la superficie reflectora) están en el mismo plano.

b.- El ángulo formado por el rayo incidente y la normal (ángulo de incidencia) es igual al formado por el rayo reflejado y la normal (ángulo de reflexión).



Esquema de la reflexión especular.

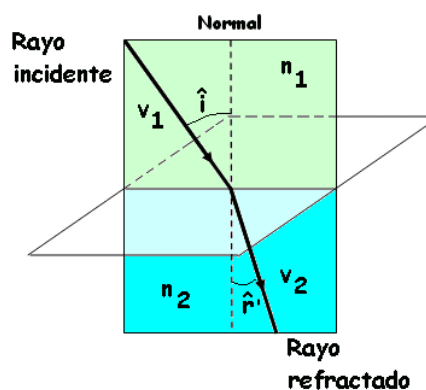
### 3.2.- Refracción de la luz.

Denominamos así al cambio de dirección que experimenta la luz cuando pasa de un medio en que se mueve con una determinada velocidad a otro en el que se mueve con otra distinta.

También existen dos leyes de la refracción:

a.- En rayo incidente, el rayo refractado y la recta normal a la superficie de separación de ambos medios, están en el mismo plano.

b.- La ley de Snell, que afirma que el cociente entre las velocidades de propagación de la luz en ambos medios es igual al cociente entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción respectivamente.



Esquema de la refracción.

Matemáticamente:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}}$$

Utilizando el concepto de índice de refracción:

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

$$\frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} \quad n_2 = \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} n_1$$

$$n_2 \cdot \text{sen } \hat{r} = n_1 \cdot \text{sen } \hat{i}$$

Esta es otra forma de expresar la ley de Snell.

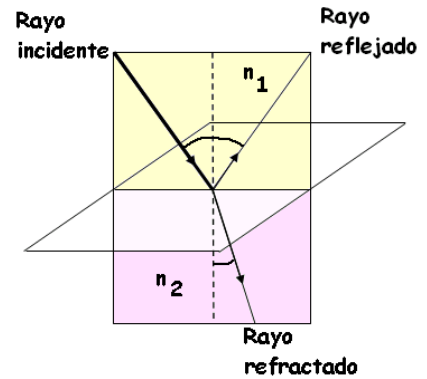
De aquí se deduce que:

Si la luz pasa de un medio de menor índice de refracción (medio menos refringente), a otro con mayor índice de refracción (medio más refringente), el rayo refractado se acerca a la normal. Si es al contrario, el rayo refractado se aleja de la normal.

La reflexión precisa que la superficie sobre la que incide la luz pueda reflejarla. En el caso de que la luz sea absorbida no se producirá.

La refracción precisa que el medio sea transparente a la luz. En caso contrario se producen otros fenómenos simultáneamente como la absorción, o la interacción de la luz con la materia del medio, que pueden impedir la observación de la refracción.

Cuando se produce refracción, también se suele producir simultáneamente la reflexión. Es decir, cuando llega un rayo de luz al medio, parte se refleja y parte se refracta.



La reflexión y la refracción suelen producirse simultáneamente.

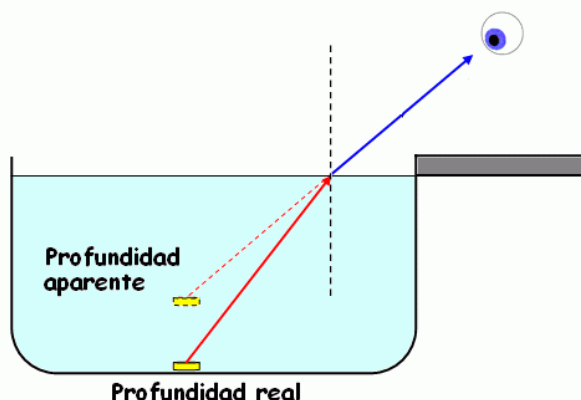
Mediante la reflexión y la refracción se puede justificar muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza. Por ejemplo:

#### Profundidad aparente y profundidad real de una piscina.

Al mirar una piscina notamos que parece menos profunda de lo que en realidad es. En este fenómeno interviene la refracción y además el cerebro.

Si miramos el fondo de la piscina (o un objeto situado en el fondo), los rayos de luz que parten del objeto se alejan de la normal al llegar al aire (la luz pasa de un medio con mayor índice de refracción a otro de menor índice) en incidir en nuestro ojo.

Pero para nuestro cerebro los rayos de luz siempre viajan en línea recta así, que cree que la trayectoria del rayo es la marcada con el trazo discontinuo, dando la sensación de menor profundidad.



Este mismo fenómeno es el que explica que al introducir un lápiz en el agua, parezca partido. Los rayos de luz, procedentes del agua, que llegan a nuestro cerebro lo hacen con distinto ángulo a los que proceden de la parte del lápiz que está fuera de ella.



La refracción de la luz es responsable de ver la cuchara partida.

## Ejercicio resuelto

1.- Un rayo de luz amarilla, emitido por una lámpara de vapor de sodio, posee una longitud de onda en el vacío de  $5,9 \cdot 10^{-9}$  m.

a) Determina la frecuencia, velocidad de propagación y longitud de onda de la luz en el interior de trozo de vidrio de  $n = 1,5$ .

b) Explica lo que es la reflexión total y calcule el ángulo a partir del cual se verifica dicho fenómeno para el caso del vidrio.

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

**Solución:**

a.- La longitud de onda en el vidrio la podemos calcular sin más que utilizar la expresión:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{5,9 \cdot 10^{-9}}{1,5} = 3,93 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

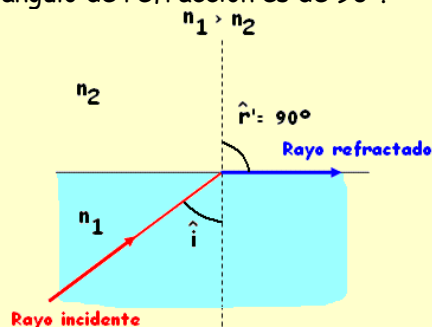
La frecuencia no varía al cambiar de un medio a otro.

La velocidad de propagación podemos calcularla según:

$$n = \frac{c}{v} \quad v = \frac{c}{n} = 2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

b.- La explicación mírala en la teoría (apartado 4.1).

Como la reflexión total se verifica cuando la luz pasa del vidrio al aire. El ángulo límite es el ángulo de incidencia a partir del cual el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ .



Aplicando la ley de Snell y teniendo en cuenta que el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ .

$$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } 90^\circ$$

$$1,5 \cdot \text{sen } i = 1 \cdot 1 \quad \text{sen } \hat{i} = \frac{1}{1,5} \quad \hat{i} = \text{arcsen} \frac{1}{1,5} = \underline{41,81^\circ}$$

A partir de  $41,81^\circ$  se verifica la reflexión total.

## Para resolver

1'. - Calcula la velocidad de propagación y la longitud de onda en el agua y en el vidrio de un rayo de luz amarilla cuya longitud de onda en el vacío es 589 nm. ¿Cuál es el índice de refracción relativo del vidrio respecto al agua? Los índices de refracción absolutos del agua y el vidrio son 1,33 y 1,52 respectivamente. Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Sol.:  $v_{\text{H}_2\text{O}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;  $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 442,8 \text{ nm}$ ;  $v_{\text{vidrio}} = 1,97 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;  $\lambda_{\text{vidrio}} = 387,5 \text{ nm}$ ;  $n_{v,a} = 1,14$ .

2'. - ¿Qué le ocurre a un rayo de luz al pasar de un medio a otro con mayor índice de refracción? ¿Y si pasa a otro de menor índice de refracción?

3'. - Calcula la velocidad de la luz en el benceno si su índice de refracción es de 1,48. Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Sol.:  $2,03 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

4'. - El índice de refracción del diamante es 2,38 para una luz cuya longitud de onda es 620 nm en el aire. ¿Cuál será la longitud de onda cuando pase a través del diamante? Sol.: 260,5 nm.

5'. - Un rayo de luz incide con un ángulo de  $30^\circ$  sobre una superficie plana que separa dos medios con índices de refracción 1,62 y 1,44. La luz pasa del medio más refringente al menos refringente. ¿Cuál es el ángulo de refracción? Sol.:  $r = 34,2^\circ$ .

6'. - La velocidad de la luz en el etanol es de 220000 km/s. ¿Cuál es el índice de refracción absoluto del etanol?

Cuando la luz pasa del aire al etanol, ¿se produce algún cambio en su frecuencia o en su longitud de onda? Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Sol.: 1,36; ¿?

7'. - Una lámina de vidrio de 0,8 cm de espesor tiene un índice de refracción de 1,52. ¿Cuánto tiempo tarda un rayo de luz en atravesarla). Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Sol.:  $4,06 \cdot 10^{-11} \text{ s}$ .

8'. - Un vaso contiene aceite y agua. Como ambos líquidos no se mezclan, se forman dos capas perfectamente diferenciadas; la de arriba de aceite y la inferior de agua. El aceite tiene un índice de refracción mayor que el del agua. Razona en que líquido la velocidad de la luz es mayor y dibuja la marcha de un rayo luminoso oblicuo que hace el recorrido aire  $\rightarrow$  aceite  $\rightarrow$  agua.

9'. - Un rayo de luz de 545 nm de longitud de onda en el aire, penetra en el agua ( $n = 1,33$ ). ¿Cuál es su frecuencia en el agua? ¿Y su longitud de onda? Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

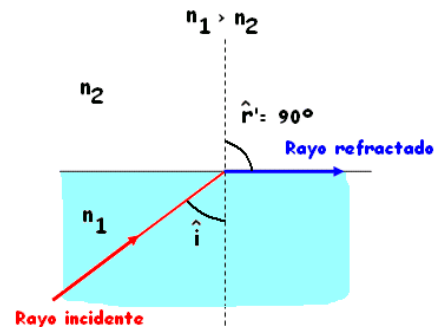
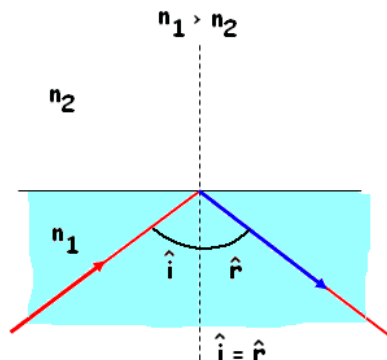
Sol.:  $f = 5,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ;  $\lambda = 409,8 \text{ nm}$ .

## 4 ÁNGULO LÍMITE Y REFLEXIÓN TOTAL.

### 4.1.- El fenómeno de la reflexión total.

Cuando la luz pasa de un medio a otro cuyo índice de refracción es menor, como sabes, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. Hay un ángulo crítico a partir del cual el rayo refractado se ha alejado tanto de la normal que está dispuesta perpendicularmente al medio. A este ángulo se le denomina **ángulo límite**.

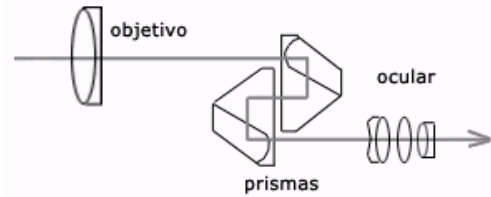
Por encima de este ángulo, la luz ya no se refracta sino que no puede pasar de un medio a otro y se produce exclusivamente la reflexión. A este fenómeno se le denomina **reflexión total**.



El fenómeno de la reflexión total se usa en muchos dispositivos. Por ejemplo:

### El periscopio y los gemelos.

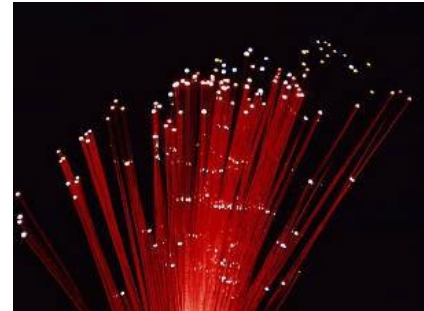
En los periscopios se usa un conjunto de prismas en los que se produce la reflexión total. Los prismas tienen de base un triángulo isósceles. Así cualquier rayo que incide perpendicularmente a una de las caras no se refracta sino que se refleja totalmente ya que incide en cualquiera de las otras dos caras con un ángulo de  $45^\circ$  y el ángulo límite del sistema aire-vidrio es de  $42^\circ$ .



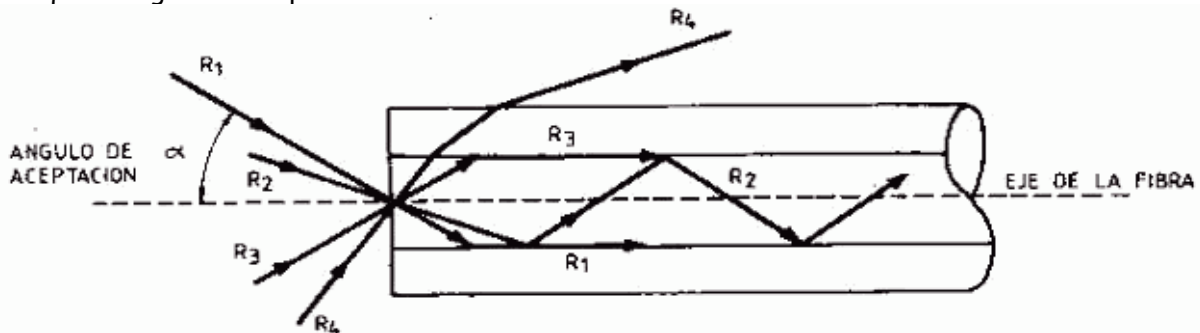
En los prismáticos se usan dos prismas donde se produce la reflexión total.

### El cable de fibra óptica.

La fibra óptica está formada por filamentos de vidrio muy finos envueltos en un material cuyo índice de refracción es menor que el del vidrio. En el interior de los cables de vidrio, se producen reflexiones totales de la luz. De esta forma la señal que incide en el filamento interno no puede escapar del cable, con lo que aparecerá íntegramente en el otro extremo. Para ello, la luz debe incidir con determinado ángulo menor o igual que el ángulo de aceptación.



Cables de fibra óptica



Sección lateral de una fibra óptica. Todos los rayos incidentes entre R1 y R3 (dentro del ángulo máximo de aceptación) se propagan por la fibra óptica

### 4.2.- El fenómeno de los espejismos.

El índice de refracción depende del tipo de medio, pero también de la densidad de éste y de la temperatura, siendo menor con la densidad del medio

En los días calurosos, las capas de aire que están cerca del suelo están más calientes y por tanto su índice de refracción disminuye (tanto más cuanto más cerca del suelo).



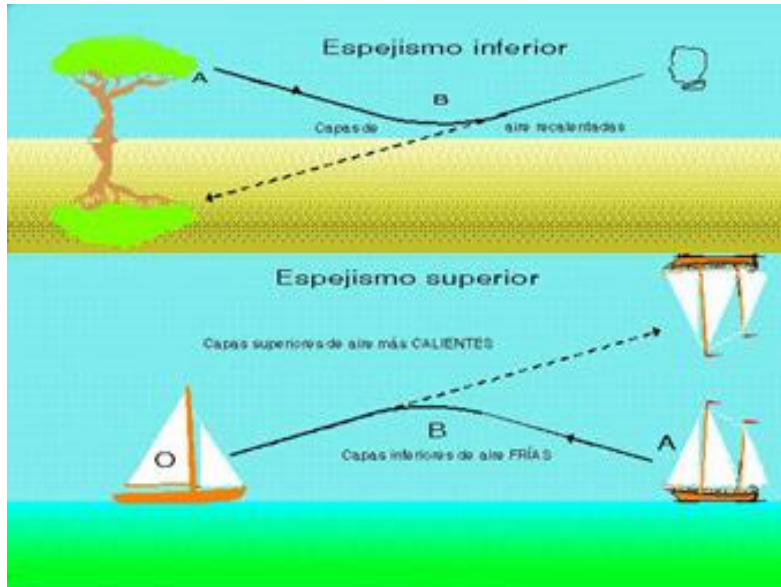
Espejismo en el desierto, los camellos parecen andar sobre el agua.

Esto puede provocar que cualquier rayo de luz proveniente de un objeto situado en la lejanía, o de las mismas nubes del cielo, se curven al acercarse a nosotros hasta que se produce la reflexión total y su pendiente se invierte. Como el cerebro piensa que los rayos de luz vienen en línea recta, tenemos la sensación de que lo que estamos viendo es un objeto reflejado sobre el suelo o sobre el



asfalto (la sensación de agua a lo lejos en la carretera no es más que el cielo reflejado).

El espejismo no es un fenómeno que ocurra exclusivamente en lugares cálidos. Si el aire próximo al suelo es más frío que el que está inmediatamente encima, también se producirá una curvatura del aire, pero en este caso al revés. El observador creerá que el objeto observado está en el aire o que el sol está en el horizonte, cuando ya ha desaparecido.



#### Para resolver

10'.- El diamante tiene un ángulo límite de  $24^\circ$ . Calcula el índice de refracción y la velocidad de propagación de la luz en el medio de que se trate. Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Sol.:  $n_D = 2,46$ ;  $v = 1,22 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

11'.- Un haz de luz incide desde el aire sobre la superficie del agua con un ángulo de  $45^\circ$ . ¿Cuánto miden los ángulos de reflexión y refracción? Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,33$ . Sol.: reflex:  $r = 45^\circ$ ; refrac:  $r = 32,1^\circ$ .

12'.- Un rayo luminoso que se propaga en el aire, incide en una cubeta llena de agua formando un ángulo de  $30^\circ$  con la normal a la superficie de separación de ambos medios. Sabiendo que en el agua, la velocidad de propagación de la luz es de  $225000 \text{ km/s}$ , calcula:

a.- La dirección que tendrá el rayo luminoso al propagarse en el agua.

b.- ¿Qué condición debe darse para que pueda producirse el fenómeno de la reflexión total al incidir el rayo luminoso desde el aire en el agua?

Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Sol.: a)  $r = 22,02^\circ$ ; b) que  $n_{\text{aire}} > n_{\text{agua}}$  ( $v_{\text{aire}} < v_{\text{agua}}$ )

13'.- Calcula los ángulos límites para los sistemas agua-aire y vidrio-aire, sabiendo que el índice de refracción del agua es de 1,33, del aire 1 y del vidrio 1,5. Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Sol.: a) agua-aire  $48,59^\circ$ ; b) vidrio-aire =  $41,81^\circ$ .

14'.- Un foco luminoso puntual se encuentra situado en el fondo de un estanque lleno de agua de  $n = 4/3$  y a 1 metro de profundidad. Emite luz en todas las direcciones. En la superficie del agua se forma un círculo luminoso de radio R. Explica este fenómeno y calcula el radio R del círculo luminoso. Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Sol.:

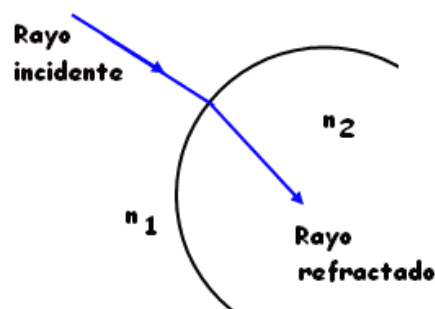
## 5 SISTEMAS ÓPTICOS

Si disponemos una serie de superficies que separan medios de distinto índice de refracción, tendremos un sistema óptico.

Hay distintas formas de clasificar a los sistemas ópticos. Sin embargo, vamos a ver únicamente los más sencillos.

**Con una sola superficie:**

- **Dioptrio.** Solamente tiene una superficie. Si la superficie es plana se denomina lámina. En él se verifica la refracción.



Dioptrio simple

- **Catadióptrico.** En el sistema óptico se producen simultáneamente la reflexión y la refracción. Cada rayo incidente origina dos rayos, uno refractado y otro reflejado.



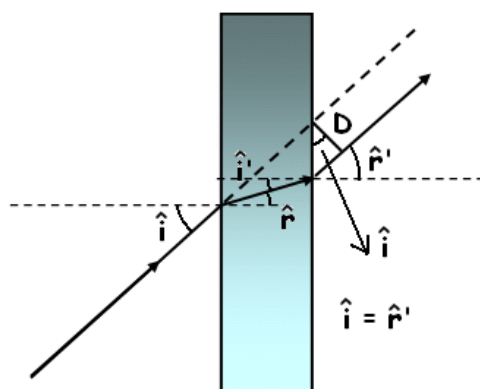
Los triángulos de peligro llevan un catadióptrico para ser visibles en la carretera.

**Con varias superficies.**

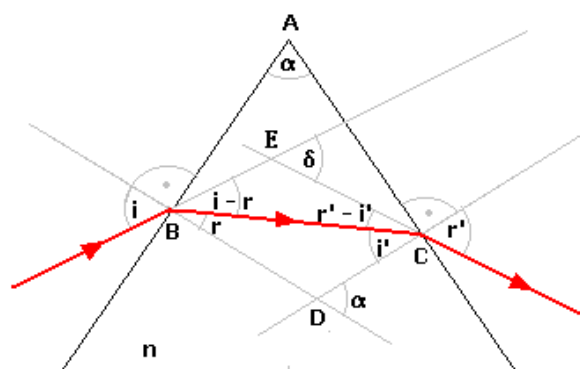
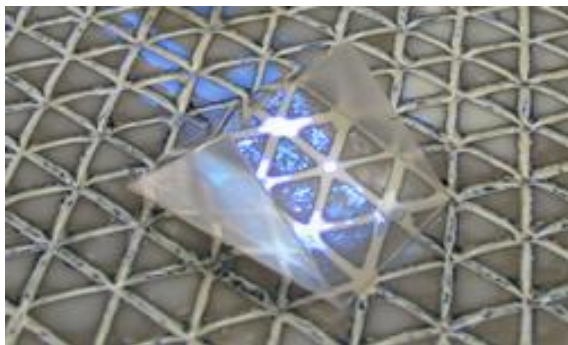
Si el sistema óptico está formado por dos superficies planas que limitan un medio de índice de refracción, podemos tener dos posibilidades:

a.- **Las superficies planas son paralelas.** De esta forma, el rayo que entra por una de las superficies sale por la otra paralelo al primero pero desviado lateralmente.

A la distancia **D** que existe entre las direcciones del rayo emergente y el rayo incidente se le denomina **desviación del rayo**. Puede calcularse mediante consideraciones geométricas.



b.- **Prisma.** Las superficies forman entre sí un ángulo. El rayo emergente se desvía angularmente con respecto al incidente.



Desviación que experimenta un rayo de luz al atravesar un prisma.

Es importante conocer las siguientes características del prisma:

- **Ángulo de refringencia o ángulo del prisma ( $\alpha$ )**. Es el formado por dos de las caras rectangulares del prisma a través de las cuales pasa la luz.
- **Desviación sufrida ( $\delta$ )** es el ángulo que forman las direcciones del rayo incidente y del emergente.

Se puede demostrar que:

$$\alpha = \hat{r} + \hat{i}$$

$$\delta = \hat{i} + \hat{r}' - \alpha$$

c.- **Lentes**. También están formados por dos superficies, pero por lo menos una de ellas está curvada. Las lentes son sistemas ópticos centrados, puesto que como veremos más adelante, los centros de los radios de curvatura de ambas superficies están alineados.



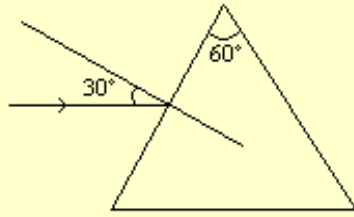
Una lupa es una lente.

Cuando asociamos distintos sistemas ópticos tendremos un **instrumento óptico**. Como ejemplo:

- El ojo humano.
- Sistemas fotográficos.
- Proyector de cine o diapositivas.
- Prismáticos y telescopios.
- Microscopios.

### Ejercicio resuelto

2.- La sección de un prisma de vidrio, tiene forma de un triángulo equilátero. Un rayo de luz formado por luz roja y azul incide sobre una de las caras con un ángulo de  $30^\circ$ . Si se produce dispersión calcula el ángulo que formarán entre sí los rayos rojo y azul una vez que salgan del prisma. Los índices de refracción supongamos que son de 1,45 para el rojo y de 1,5 para el azul. El esquema del dibujo es tal como sigue:



**Solución:**

a.- En primer lugar, se produce la refracción al entrar la luz desde el aire al vidrio.

Aplicando la ley de Snell para cada color:

ROJO

$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen} \hat{i} = n_{\text{rojo}} \cdot \text{sen} \hat{r}$$

$$\text{sen} \hat{r} = \frac{n_{\text{aire}} \cdot \text{sen} \hat{i}}{n_{\text{rojo}}} = \frac{1 \cdot \text{sen} 30^\circ}{1,45} = 0,3448$$

$$\hat{r} = \text{arcsen} 0,3448 = 20,17^\circ$$

AZUL

$$n_{\text{aire}} \cdot \text{sen} \hat{i} = n_{\text{azul}} \cdot \text{sen} \hat{r}$$

$$\text{sen} \hat{r} = \frac{n_{\text{aire}} \cdot \text{sen} \hat{i}}{n_{\text{azul}}} = \frac{1 \cdot \text{sen} 30^\circ}{1,5} = 0,3333$$

$$\hat{r} = \text{arcsen} 0,3333 = 19,47^\circ$$

Después, al llegar a la otra cara del prisma, se produce la segunda refracción y el rayo de luz vuelve otra vez al aire.

Necesitamos conocer el ángulo con el que incide el rayo de luz en la otra cara:

ROJO

$$\alpha = \hat{r} + \hat{i}$$

$$\hat{i} = \alpha - \hat{r} = 60 - 20,17 = 39,83^\circ$$

$$n_{\text{rojo}} \cdot \text{sen} \hat{i} = n_{\text{aire}} \cdot \text{sen} \hat{r}$$

$$\text{sen} \hat{r} = \frac{n_{\text{rojo}} \cdot \text{sen} \hat{i}}{n_{\text{aire}}} = \frac{1,45 \cdot \text{sen} 39,83^\circ}{1} = 0,9287$$

$$\hat{r} = \text{arcsen} 0,9287 = 68,24^\circ$$

AZUL

$$\alpha = \hat{r} + \hat{i}$$

$$\hat{i} = \alpha - \hat{r} = 60 - 19,47 = 40,53^\circ$$

$$n_{\text{azul}} \cdot \text{sen} \hat{i} = n_{\text{aire}} \cdot \text{sen} \hat{r}$$

$$\text{sen} \hat{r} = \frac{n_{\text{azul}} \cdot \text{sen} \hat{i}}{n_{\text{aire}}} = \frac{1,5 \cdot \text{sen} 40,53^\circ}{1} = 0,9748$$

$$\hat{r} = \text{arcsen} 0,9748 = 77,10^\circ$$

Luego, el ángulo que forman ambos rayos entre sí es de:

$$\varphi = 77,1 - 68,24 = \underline{\underline{8,86^\circ}}$$

**Para resolver**

15'.- Sobre un prisma de vidrio de ángulo 45 grados e índice de refracción 1 '55 incide un rayo de luz monocromática. Si el ángulo de incidencia es de 45 grados, calcula el ángulo de emergencia y la desviación producida en el rayo. Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $n_{\text{aire}} = 1$ . Sol. 28'38; 28'38.

16'.- Sobre una lámina de vidrio de caras planas y paralelas, de espesor 2 cm y de índice de refracción  $n = 3/2$ , situada en el aire, incide un rayo de luz monocromática con un ángulo  $\hat{i} = 30^\circ$ .

a.- Comprueba que el ángulo de emergencia es el mismo que el ángulo de incidencia.

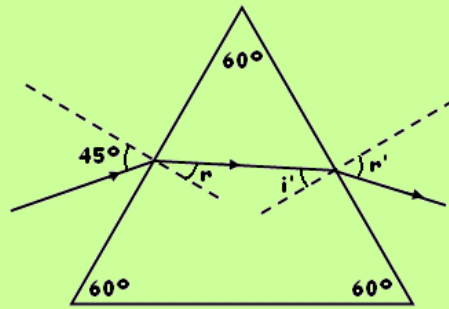
b.- Determina la distancia recorrida por el rayo dentro de la lámina y el desplazamiento lateral del rayo emergente.

Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $n_{\text{aire}} = 1$ . Sol.: b ) 2,12 cm ; 0,388 cm

17'.- Un rayo de luz monocromática llega a un prisma equilátero bajo un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ . El índice de refracción del prisma es 1,50. ¿Cuál es el ángulo de refracción del rayo en el aire después de atravesar el prisma?

Dato:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $n_{\text{aire}} = 1$ .

Sol:  $52,37^\circ$ .



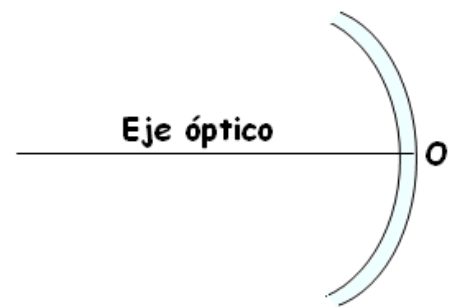
## 6 CONCEPTOS DE ÓPTICA GEOMÉTRICA.

Todos los sistemas ópticos que vamos a estudiar tienen en común una serie de elementos:

- **Eje óptico.** Eje de simetría del sistema óptico. Divide al sistema en dos mitades iguales.

- **Vértice o centro (O).** Punto en el que el eje óptico corta al sistema óptico.

Además, existen más elementos que iremos estudiando en cada tipo de sistema óptico.



### 6.1.- Objeto e imagen.

En óptica al punto P de donde parten los rayos luminosos se le denomina **objeto**.

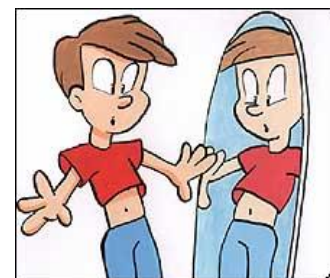
Estos rayos luminosos pueden llegar al sistema óptico y se reflejan o se refractan. Al punto donde se cruzan estos rayos reflejados o refractados (o bien sus prolongaciones en sentido contrario, si esos rayos divergiesen entre sí), se le denomina **imagen** de P respecto al sistema óptico y se representa por P'.



La imagen de la pantalla de cine es una imagen real.

En el caso en que los rayos que salen de P se corten realmente en P', se dice que P' es una **imagen real** de P. Esta imagen al ser real puede recogerse en una pantalla.

Si los rayos que salen de P no se cortan realmente en P' porque divergen, sino que lo hacen sus prolongaciones en sentido contrario, la imagen así obtenida es una **imagen virtual** y no se puede recoger en una pantalla.



Nuestro reflejo en un espejo plano es una imagen virtual.

### 6.2.- Nomenclatura de los sistemas ópticos.

Existe un convenio sobre como se representan todos los elementos geométricos que aparecen en los sistemas ópticos. Recojo aquí los más importantes:

- Todos los puntos se representan por letras mayúsculas, mientras que las distancias se representan por letras minúsculas.

- Todos los ángulos se representan por letras griegas.
- Los elementos del espacio imagen se nombran igual que sus homólogos del espacio objeto pero con apóstrofes.
- Las distancias del objeto y la imagen al sistema óptico se miden desde el sistema óptico y se denominan  $s$  y  $s'$  respectivamente.
- Las alturas o tamaños del objeto y de la imagen se designan por  $y$  e  $y'$ .
- Siempre se representa el objeto en el lado izquierdo del sistema óptico y se considera que los rayos marchan por tanto de izquierda a derecha.

## 7 IMÁGENES FORMADAS EN ESPEJOS.

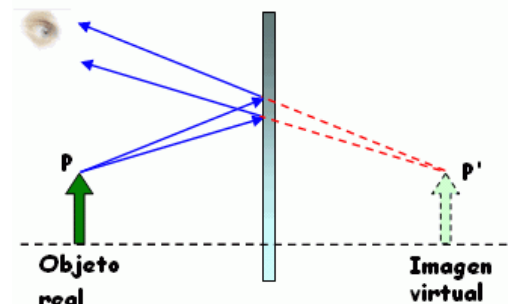
Los espejos son superficies donde la reflexión que se produce es especular. En función de la forma de la superficie, los espejos pueden ser planos o esféricos.

### 7.1.- Espejos planos.

Cuando miramos un objeto en un espejo siempre vemos el objeto como si estuviese detrás del espejo.

Para formar la imagen en un espejo plano es necesario utilizar dos rayos por cada punto del objeto. Estos rayos al llegar al espejo se reflejan y divergen entre sí. Al prolongar los rayos reflejados en sentido contrario, observaremos que se cortan en un punto situado al otro lado del espejo y a una distancia  $s'$  igual a  $s$ .

La imagen así obtenida es una imagen virtual, puesto que se obtiene prolongando los rayos reflejados. Es del mismo tamaño que el objeto y además presenta inversión lateral.



Formación de imágenes en un espejo plano.

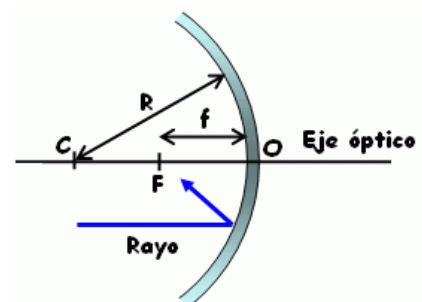
### 7.2.- Espejos esféricos.

#### Características de los espejos esféricos.

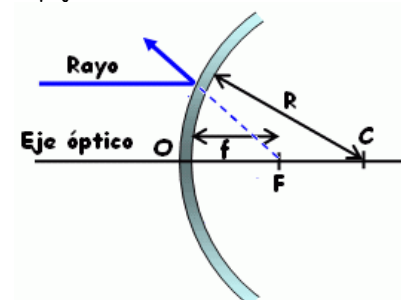
Estos espejos son casquetes de esferas. Si la superficie que está pulimentada es la interior se les denomina espejo cóncavo ( $R < 0$ ). Si es la exterior son espejos convexos ( $R > 0$ ).

Además de los elementos generales de todo sistema óptico, en el espejo plano hay que distinguir:

- **Centro de curvatura (C).** Es el radio del casquete esférico.
- **Radio de curvatura (R).** Es la distancia que hay desde C hasta el punto O medida sobre el eje óptico.
- **Foco.** Punto del eje óptico por el pasan los rayos incidentes o las prolongaciones de estos.
- **Distancia focal (f).** Distancia sobre el eje óptico desde el punto F hasta O.



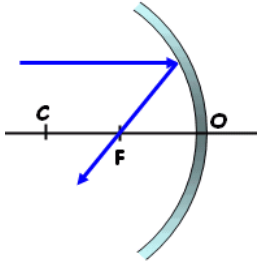
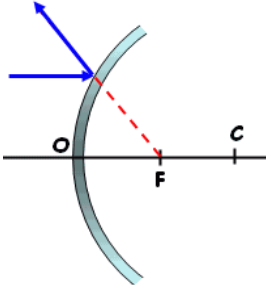
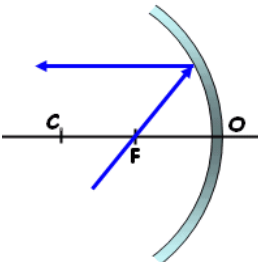
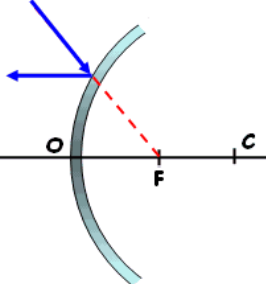
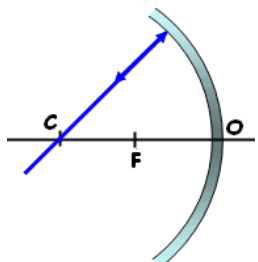
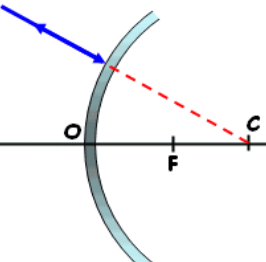
Espejo cóncavo



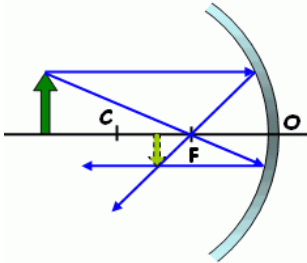
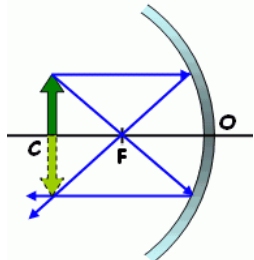
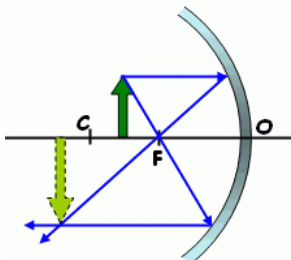
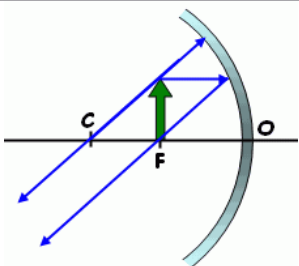
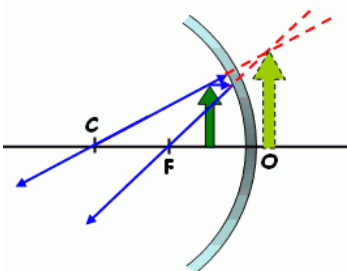
Espejo convexo

## Imágenes formadas mediante espejos cóncavos.

La imagen que se obtiene de un objeto en un espejo esférico es fácilmente predecible conociendo la trayectoria de dos de los tres rayos que te presento a continuación.

| ESPEJOS CÓNCAVOS  | ESPEJOS CONVEXOS  |
|---|---|
| <p data-bbox="188 436 778 510">Un rayo paralelo al eje óptico se refleja en el espejo, pasando el rayo reflejado por el foco.</p>    | <p data-bbox="817 436 1407 548">Un rayo que incide paralelo al eje óptico se refleja pasando su prolongación, en sentido contrario, por el foco.</p>                                |
| <p data-bbox="188 855 778 929">Un rayo que pasa por el foco se refleja paralelo al eje óptico.</p>    | <p data-bbox="817 855 1407 929">Un rayo dirigido hacia el foco se refleja paralelo al eje óptico.</p>    |
| <p data-bbox="188 1229 778 1377">Un rayo que pasa por el centro de curvatura no sufre desviación al reflejarse, volviendo por el mismo camino. (Incide perpendicularmente al espejo).</p>  | <p data-bbox="817 1229 1407 1377">Un rayo que incide perpendicularmente al espejo (su prolongación pasa por el centro de curvatura) se refleja volviendo por el mismo sitio.</p>  |

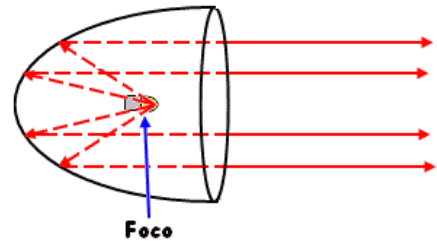
Cuando se sitúa un objeto delante de un espejo cóncavo, el tipo de imagen que se obtiene depende de la distancia a la que se sitúe el objeto.

| Posición del objeto                     | Tamaño de la imagen con respecto al objeto | Posición  | Tipo    | Esquema   |
|---|--|-----------|---------|---|
| Antes del centro de curvatura           | Menor                                      | Invertida | Real    |    |
| En el centro de curvatura               | Del mismo tamaño                           | Invertida | Real    |    |
| Entre el centro de curvatura y el foco. | Mayor                                      | Invertida | Real    |   |
| En el foco                              | No se forma (se forma en el infinito)      |           |         |  |
| Entre el foco y el vértice              | Mayor                                      | Derecha   | Virtual |  |



### Aplicaciones de los espejos cóncavos.

Los faros de los coches tienen geometría parabólica. La lámpara se sitúa en el foco y todos los rayos que emite salen paralelos al eje óptico.



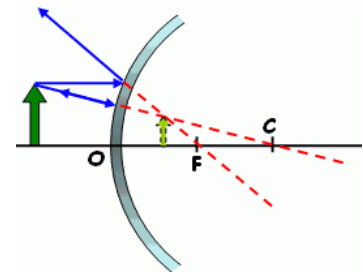
En un faro, la lámpara está en el foco y los rayos salen paralelos

La antena parabólica es otra aplicación. La señal de los satélites, al provenir desde muy lejos puede considerarse que llegan paralelos al foco. De esta forma, los rayos se reflejan coincidiendo en el foco, donde está el detector.



### Imágenes formadas mediante un espejo convexo.

En los espejos convexos, los rayos reflejados siempre divergen, por tanto, la imagen de cualquier punto se formará mediante el corte de las prolongaciones en sentido contrario de los rayos reflejados. Por este motivo, la imagen será siempre menor, derecha y virtual.



### Aplicaciones de los espejos convexos.

Suelen utilizarse cuando se requieren imágenes con gran amplitud de campo. Por ejemplo en los retrovisores exteriores de los coches, o en esquinas o garajes con poca visibilidad.



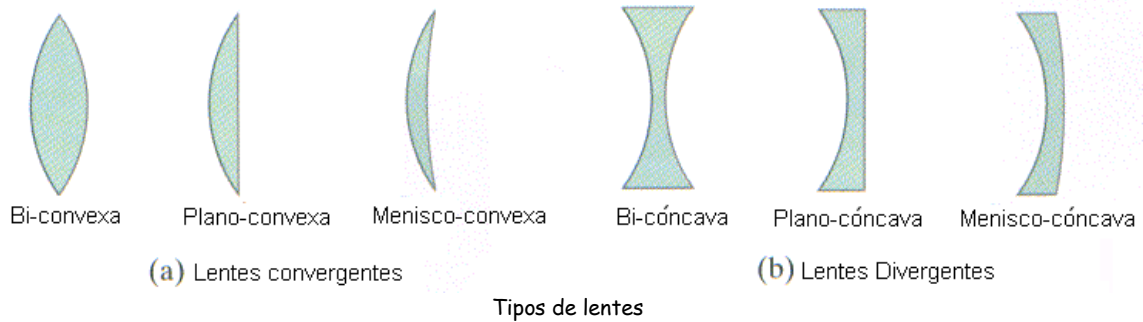
### Para resolver

18'.- Si queremos ver la imagen ampliada de un objeto en un espejo, ¿qué tipo de espejo hay que emplear? ¿De qué tipo es la imagen formada?

19'.- En el borde de una carretera se ha colocado un espejo cóncavo. Al acercarse un coche, ¿cuándo se verá mayor en el espejo, cuando está lejos o cuando está cerca? ¿Se verá derecho o invertido el coche? Puedes ayudarte de un esquema de rayos adecuado.

## 8 IMÁGENES FORMADAS EN LENTES.

Una lente es un sistema óptico centrado, que se obtiene asociando dos dioptrios que limitan entre ellos un medio transparente de distinto índice de refracción. Al menos uno de los dos dioptrios debe ser esférico.



Las lentes las podemos clasificar en:

- **Lentes convergentes.** Al ser atravesadas por un haz de rayos paralelos al eje óptico, hacen que estos converjan en un punto. Siempre son más gruesas por el centro que por los extremos.
- **Lentes divergentes.** Al ser atravesadas por un haz de rayos paralelos al eje óptico, hacen que estos diverjan (se separen). Siempre son más gruesas por los extremos que por el centro.



A la izquierda, lente divergente. A la derecha, convergente.

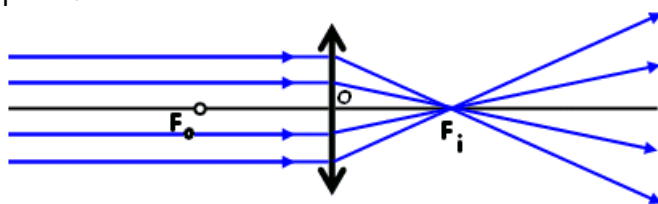
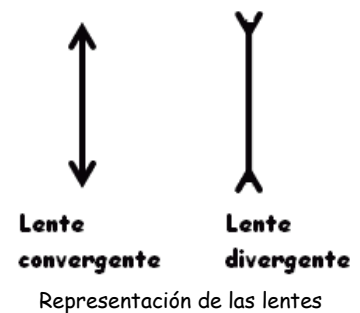


Además, según sea el espesor de la lente, las clasificamos en gruesas o delgadas. Vamos a considerar lentes delgadas porque así los cálculos se simplifican. De esta forma, el centro óptico de la lente coincide con el centro geométrico.

En las lentes hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

Si la lente es convergente:

- **Foco objeto ( $F_o$ ).** Es un punto del eje óptico que tiene la característica de que todo rayo que pase por el, al refractarse sale paralelo al eje del sistema.
- **Foco imagen ( $F_i$ ).** Está en el eje óptico y cumple la condición de que todo rayo que incida paralelo al eje óptico al refractarse pasa por él.

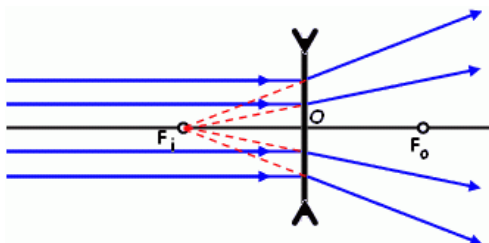


En una lente convergente, los rayos que inciden paralelos se cortan en el foco imagen.

Si la lente es divergente:

- **Foco objeto ( $F_o$ ).** Si los rayos que inciden en la lente, al atravesarla y refractarse salen paralelos entonces las prolongaciones de los rayos incidentes se cortan en un punto que denominamos foco objeto.

- **Foco imagen ( $F_i$ ).** Si los rayos que inciden en la lente lo hacen paralelos al eje principal, entonces las prolongaciones de los rayos refractados en sentido contrario se cortan en un punto que denominamos foco imagen.



En una lente divergente, los rayos se separan y sus prolongaciones en sentido contrario se cortan en el foco imagen.

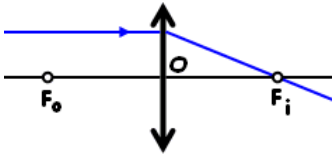
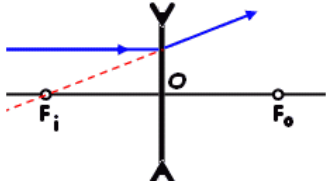
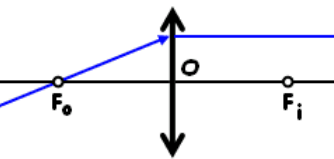
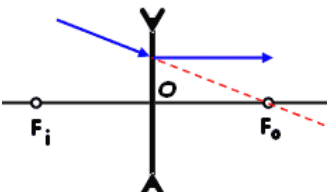
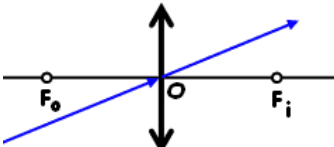
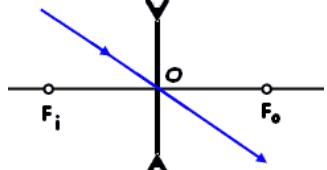
Además se cumple que:

- **Distancia focal objeto ( $f$ ).** Distancia sobre el eje óptico desde el punto  $F_o$  hasta  $O$ .

- **Distancia focal imagen ( $f'$ ).** Es la distancia sobre el eje óptico entre  $F_i$  y  $O$ .

### Formación de imágenes en lentes.

Al igual que ocurre con los espejos, es posible construir la imagen de cualquier punto dibujando la trayectoria de al menos dos de los tres rayos cuya refracción es conocida:

| LENTE CONVERGENTE  | LENTE DIVERGENTE   |
|--|--|
| <p>Un rayo incidente paralelo al eje óptico pasará por el foco imagen una vez que se refracte.</p>  | <p>Un rayo que incida paralelo al eje óptico se refracta pasando su prolongación, en sentido contrario, por el foco imagen.</p>  |
| <p>Un rayo que pasa por el foco objeto se refractará saliendo paralelo al eje principal.</p>        | <p>Un rayo incidente cuya prolongación pasa por el foco objeto se refractará saliendo paralelo al eje óptico.</p>                |
| <p>Un rayo que pase por el centro óptico de la lente no sufre desviación al refractarse.</p>        | <p>Un rayo que pase por el centro óptico de la lente no sufre desviación al refractarse.</p>                                     |

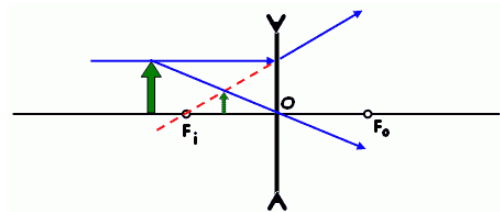
**Imágenes formadas mediante una lente convergente.**

Cuando se sitúa un objeto delante de una lente convergente, el tipo de imagen que se obtiene depende de la distancia a la que se sitúe el objeto.

| Posición del objeto       | Tamaño de la imagen con respecto al objeto | Posición de la imagen | Tipo    | Esquema |
|---------------------------|--|-----------------------|---------|---------|
| Más allá de $2f$          | Menor                                      | Invertida             | Real    |         |
| En $2f$                   | Igual                                      | Invertida             | Real    |         |
| Objeto entre $2f$ y $F_o$ | Mayor                                      | Invertida             | Real    |         |
| Objeto en $F_o$           | No hay imagen (Se forma en el infinito)    |                       |         |         |
| Objeto entre $F_o$ y $O$  | Mayor                                      | Derecha               | Virtual |         |

**Imágenes formadas mediante una lente divergente.**

La imagen será siempre menor, derecha y virtual.



**Potencia de una lente.**

La potencia de una lente es la inversa de su distancia focal imagen  $f'$ .

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

Si la distancia focal  $f'$  se mide en metros, la potencia se expresa en dioptrías. Una dioptría es la potencia de una lente de distancia focal igual a un metro. El signo de la potencia es el mismo que el de la distancia focal imagen; por tanto, las lentes convergentes tienen potencia positiva y las divergentes negativa.

Cuando se tienen varias lentes en contacto la una con la otra; la potencia del conjunto es la suma de las potencias de cada lente.

$$P = P_1 + P_2$$

### Para resolver

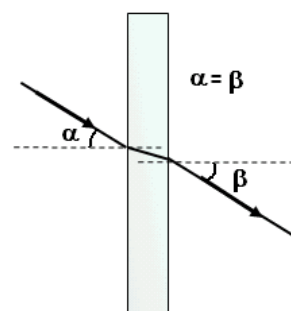
20'. - Diga si es cierto o falso y razona la respuesta.

"Se puede distinguir una lente convergente de otra divergente simplemente por el tacto".

## 9 DISPERSIÓN DE LA LUZ. LOS COLORES.

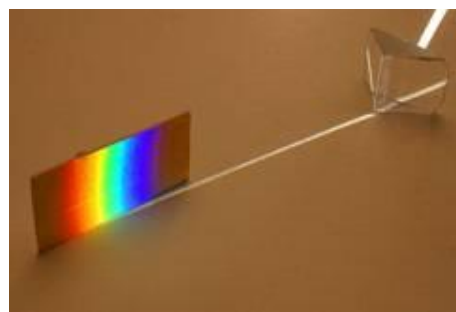
### 9.1.- Dispersión de la luz.

Al atravesar un rayo de luz una sustancia limitada por dos caras planas y paralelas (como el vidrio de una ventana), la luz se refracta dos veces. Al entrar y al salir de la sustancia. Sin embargo, la segunda refracción es de sentido contrario a la primera, con cual un rayo de luz no se desvía al atravesar una lámina de caras paralelas. Únicamente tiene un desplazamiento lateral pero continúa en la misma dirección.



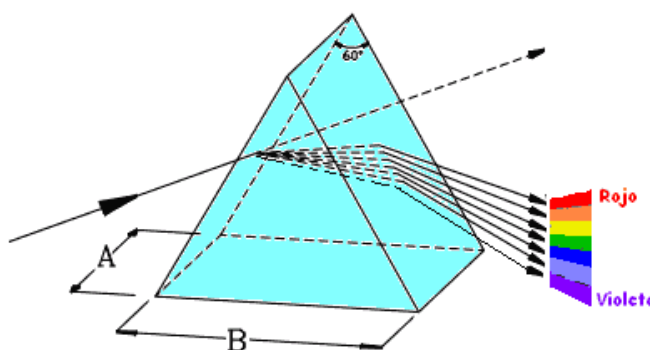
Sin embargo, no ocurre lo mismo cuando un rayo de luz atraviesa un prisma. También ocurren dos refracciones sucesivas, pero no son de sentido contrario, sino que la segunda acentúa la primera.

Un prisma óptico es un cuerpo de material transparente de sección triangular, cuyas caras son cuadriláteros con figura de rectángulo. Si tomamos una de las caras rectangulares, se denomina ángulo de refringencia o ángulo del prisma al que forman las otras dos caras entre sí.



Dispersión de la luz mediante un prisma

Cuando un haz de luz blanca procedente del sol atraviesa un prisma de cristal, cada una de las longitudes de onda que forman la luz es refractada por el mismo prisma que el índice de refracción varía con la longitud de onda. **El ángulo de refracción dependerá de la longitud de onda, siendo mayor cuanto menor sea su longitud de onda.** A este fenómeno se le denomina **dispersión** de la luz.



De esta forma, un haz de luz incidente blanca se divide en los siete colores que propuso Isaac Newton: violeta, añil, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Además están el ultravioleta antes del violeta y el infrarrojo después del rojo, que no son apreciados por el ojo humano.

### 9.3.- Los colores de los objetos.

El color del objeto depende de la frecuencia de la luz que los diferentes objetos emiten o reflejan, pero también de la interpretación que hace el cerebro de las mismas. Por ejemplo, una rosa es roja porque a nuestro cerebro llega luz de determinada frecuencia que nuestro cerebro interpreta como roja.

#### Color de los objetos por reflexión.

Los objetos opacos que no emiten luz, tienen color por la forma que tienen de reflejar o difundir la luz. Al incidir la luz sobre los cuerpos, estos absorben determinadas frecuencias y reflejan otras. Por ejemplo, una naranja absorbe todas las frecuencias y refleja la frecuencia que nuestro cerebro interpreta como naranja; por eso la vemos de ese color.

Si refleja todas las frecuencias lo apreciaremos como blanco y si las absorbe todas será negro.



Hay que hacer notar que los cuerpos reflejan la luz que les llega. Si utilizamos otra luz, el color puede ser algo diferente. Por ejemplo si a la naranja la iluminamos con luz que no tenga la frecuencia correspondiente al naranja, lo la veremos de ese color precisamente porque no puede reflejarla al no existir.

#### Color por transmisión.

Si el objeto es completamente transparente dejará pasar todas las frecuencias de luz, pero si el objeto es transparente a determinadas frecuencias y absorbe otras, dejará pasar únicamente las frecuencias no absorbidas. Esto sucede en los vidrios coloreados.



Vidriera de colores

#### Para resolver

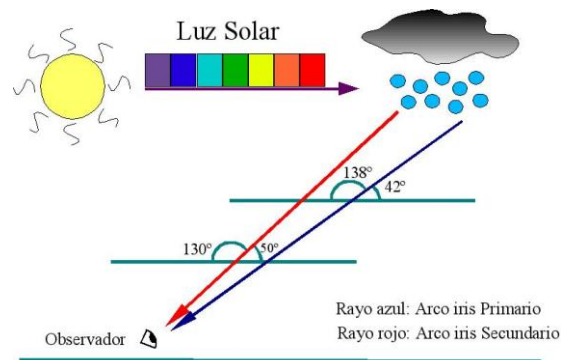
21'. - ¿De qué color se vería una tela roja si se ilumina con luz blanca? ¿Y con luz azul?

### 9.4.- El arco iris.

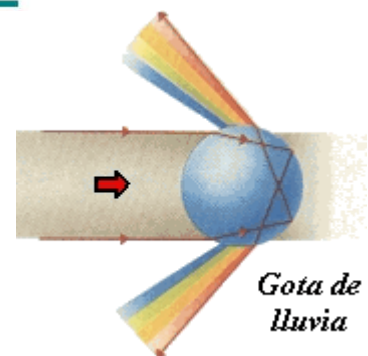
El arco iris es consecuencia de la reflexión y refracción de la luz en las gotas de agua. Para que esto se produzca es necesario que la luz del sol entre a las gotas con un cierto ángulo (el ángulo que forman las direcciones del observador con el sol y el observador con cualquier punto del arco iris

debe ser de unos  $138^\circ$ ).

En cada gota de agua se produce una refracción al entrar la luz, y una reflexión en el fondo de la gota, que provoca a su vez que la luz vuelva a salir fuera (produciéndose una nueva refracción). En este proceso, la luz se descompone en los siete colores conocidos.



El mismo fenómeno ocurre para todos los rayos que llegan del sol. De esta forma, salen múltiples rayos de luz, que forman un halo de colores alrededor de cada gota. Los rayos de luz de colores salen con un ángulo de unos  $42^\circ$  con el rayo inicial de entrada, debido a la propia geometría del proceso.



Pero únicamente los que pueden llegar al ojo son los que podemos ver. Estos son únicamente los que forman el arco característico, que en realidad es un círculo que está cortado por el horizonte. Desde una montaña o un avión, tendríamos posibilidad de ver el arco completo.

Esto implica también que dos personas no ven el mismo arco iris, pues su posición distinta hace que cada uno vea rayos distintos. Podemos decir que cada persona ve su propio arco iris.

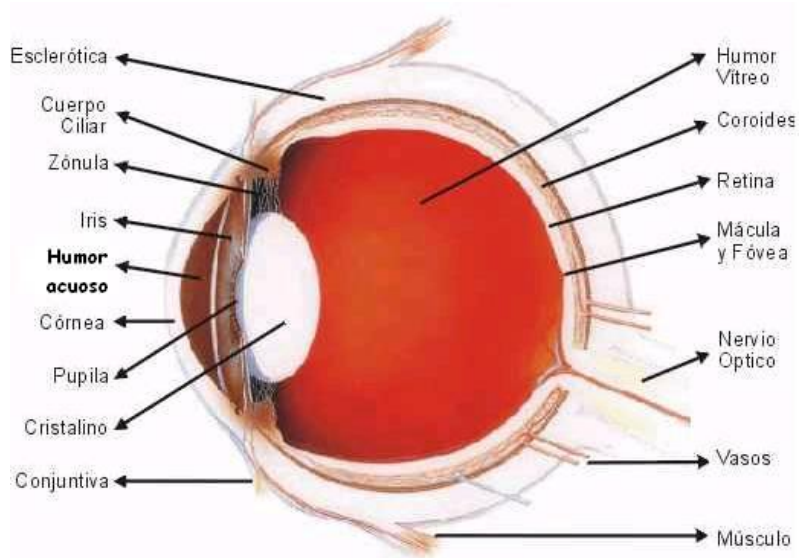
Cada gota es responsable de la formación de todos los colores



## 10 INSTRUMENTOS ÓPTICOS.

### 10.1.- El ojo humano.

La luz, tanto si procede de una fuente productora como si son rayos reflejados por diferentes materias, penetra en el ojo por la **córnea** que es transparente y actúa como una lente convexa haciendo que los rayos se desvíen hacia un mismo punto. Después atraviesa un líquido transparente denominado **humor acuoso** hasta llegar al **iris**, cuya función es actuar como un diafragma, contrayéndose o dilatándose para regular la cantidad de luz que llega al interior del ojo.



En el centro del iris hay un orificio denominado **pupila**. La luz entra por aquí y llega hasta el **cristalino**. Es un cuerpo transparente y elástico, que cambia de forma por las presiones de los músculos ciliares y actúa como una lente que al aumentar o reducir su curvatura permite enfocar con precisión los rayos de luz el fondo del ojo después de que atraviesen el **humor vítreo**.

La luz llega al fondo del ojo que posee una capa sensible a la luz denominada **retina**. Es una superficie formada por células fotosensibles, donde la luz se convierte en señales eléctricas que, a través del nervio óptico son transmitidas a la parte posterior del cerebro para que las interprete.

Hay dos tipos de células fotosensibles. Los **bastones** y los **conos**. En ambos se producen una serie de reacciones fotoquímicas cuando la luz incide sobre ellos. Estas reacciones generan una señal eléctrica que llega al cerebro y son interpretadas.

Los bastones son responsables de la visión en blanco y negro y los segundos de la visión en color. Dentro de la retina hay una zona del ojo especialmente sensible donde hay mayor número de células fotorreceptoras (sobre todo conos) y por eso es donde se suelen formar las imágenes. Es la fovea o mancha amarilla.

### 10.2.- Defectos de la visión.

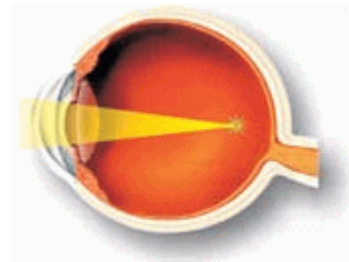
Una persona con una visión normal se dice que es **emétrope**. En ese caso el ojo puede ajustarse para percibir claramente los objetos situados en el infinito (punto lejano) y a unos 25 cm (punto cercano). Sin embargo, hay personas con defectos en la visión. Los más comunes son:



Ojo emétrope.

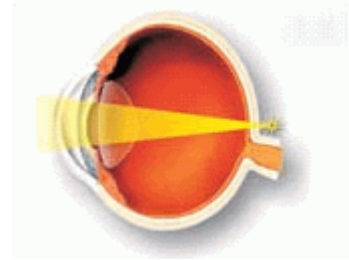


**Miopía.** Una persona miope puede ver bien los objetos cercanos pero no los lejanos. Esto sucede porque el globo ocular es demasiado largo o bien la cornea tiene demasiada curvatura. La imagen no se forma en la retina sino un poco antes. Se corrige con lentes divergentes. De esta forma los rayos de luz que entran al ojo lo hacen un poco más separados y se consigue el enfoque perfecto.



Ojo miope.

**Hipermetropía.** Estas personas pueden ver bien los objetos lejanos pero no los cercanos. El globo ocular es demasiado corto o bien la cornea es demasiado plana. La imagen se forma detrás de la retina. Se corrige con lentes convergentes. Así los rayos de luz procedentes de los objetos convergen un poco y la imagen se forma antes.



Ojo hipermetrope

**Astigmatismo.** Se produce porque la cornea no tiene la misma curvatura en todas las direcciones. Los puntos se ven realmente como trazos. Se corrige mediante lentes cilíndricas (que tienen más curvatura en una dirección que en otra, para compensar la del ojo).



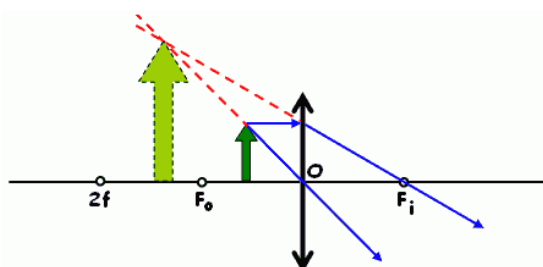
Astigmatismo

**Presbicia.** El poder de acomodación del cristalino se pierde con la edad y la imagen de un objeto cercana se forma delante de la retina. Es por ello que muchas personas mayores tienen problemas para leer de cerca (un libro o un periódico) se corrige con lentes convergentes.



### 10.3.- La lupa.

Es simplemente una lente biconvexa. Si el objeto se sitúa entre el foco y el centro geométrico de la lente, obtendremos una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto, por lo que la lupa sirve para aumentar los pequeños detalles.



Esquema de formación de la imagen en una lupa.



### 10.4.- El microscopio.

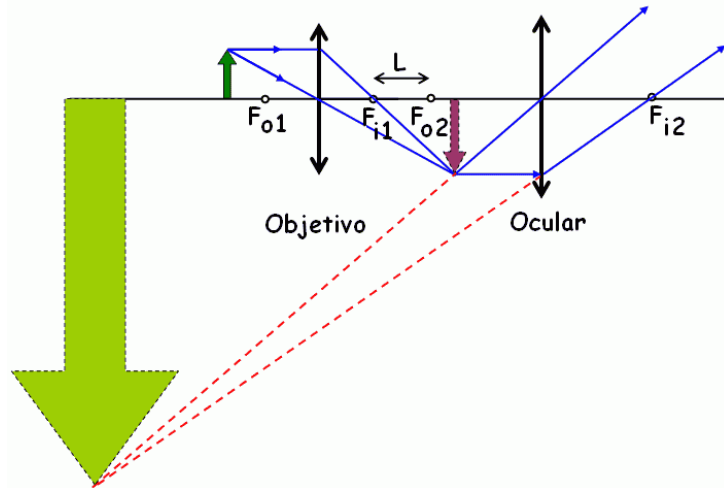
Los microscopios son aparatos que, en virtud de las leyes de formación de imágenes ópticas aumentadas a través de lentes convergentes, permiten la observación de pequeños detalles de una

muestra dada que a simple vista no se percibirían.

Constan de dos lentes convergentes. Una es el **objetivo** y otra el **ocular**.

El objetivo tiene una distancia focal pequeña y el ocular la tiene mayor.

Al colocar un objeto entre el foco y dos veces la distancia focal del objetivo, éste produce una imagen real e invertida y de mayor tamaño que el objeto. Esta imagen debe quedar situada entre el foco y el centro óptico de la segunda lente (el ocular) para que así actúe de objeto para esta segunda lente, que producirá una imagen virtual de mayor tamaño y mucho mayor que el objeto inicial. Esto se consigue mediante el acto de enfocar.

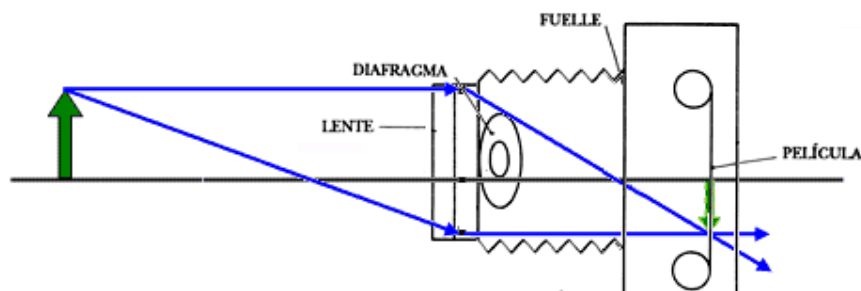


El aumento del microscopio lo obtenemos mediante la siguiente expresión:

$$A = -\frac{25 \cdot L}{f_1 \cdot f_2}$$

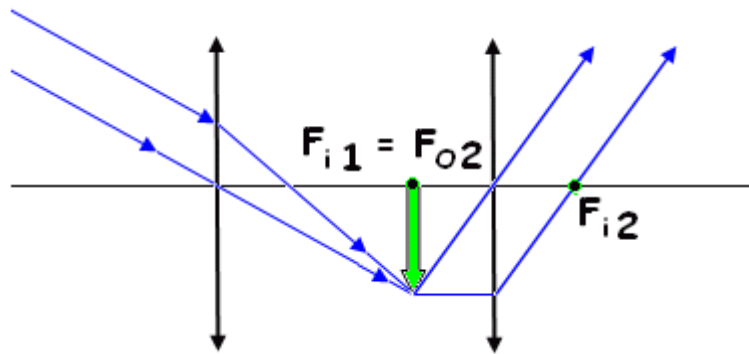
### 10.5.- Cámara fotográfica.

Básicamente es una cámara oscura con un orificio donde se sitúa una lente convergente. La lente está cubierta con un obturador. Al abrirlo, la luz procedente del objeto a fotografiar, que normalmente está situado a una distancia mayor de  $2f$  a fotografiar entra por el orificio y atraviesa la lente, produciendo una imagen de menor tamaño e invertida sobre la película fotográfica, impresionándola. Si se quiere fotografiar un objeto mucho más cercano, es necesario enfocar, moviendo el objetivo hacia delante.



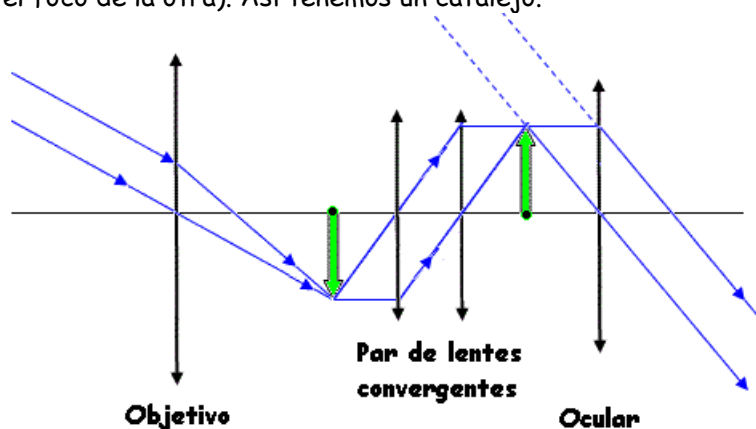
### 10.6.- Anteojo astronómico.

Formado por dos lentes convergentes. La primera (objetivo) nos proporciona una imagen real e invertida de un objeto lejano justo en el foco imagen ( $F_{i1}$ ). Si se hace que el foco objeto ( $F_{o2}$ ) de la segunda lente (ocular) coincida con el foco imagen de la primera, el ojo observará una imagen virtual e invertida en el infinito.



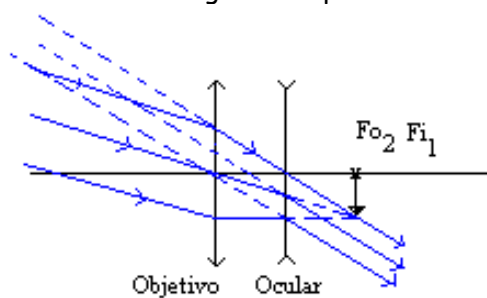
### 10.7.- Anteojo terrestre.

No resulta útil observar en la Tierra, las imágenes invertidas. Por ello entre ambas lentes se coloca lo que se denomina un par de lentes inversoras (dos lentes convergentes situadas de forma que el ambas se sitúan en el foco de la otra). Así tenemos un catalejo.



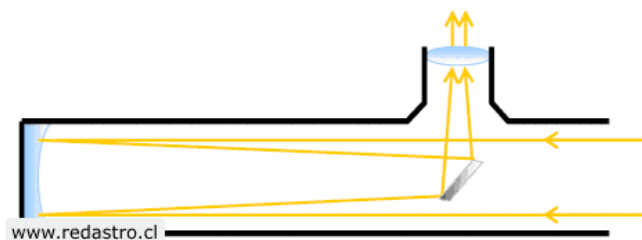
### 10.8.- Anteojo de Galileo.

Es similar al anteojo terrestre, salvo en que se emplea como ocular una lente divergente, que produce una imagen derecha y virtual de la imagen dada por la lente cóncava del objetivo.



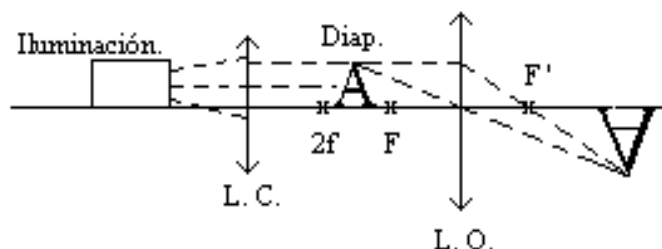
### 10.9.- Telescopio.

Es muy difícil construir lentes convergentes y divergentes sin imperfecciones, lo que limita la construcción de telescopios de gran tamaño. Por ello, cuando se quiere construir telescopios grandes se utiliza un espejo esférico en lugar de utilizar una lente como objetivo.



## 10.10.- Proyector.

Es una combinación de lentes y espejos. Un espejo cóncavo refleja la luz de una bombilla hasta una lente condensadora (a veces un par de lentes) que dirige la luz hasta el objeto (en este caso la película o la diapositiva). La luz atraviesa la película y llega a una lente convergente (el objetivo). De esta forma se obtiene una imagen real, invertida y de mayor tamaño que el objeto, proyectada sobre una pantalla. Para que la imagen salga derecha, la diapositiva se coloca invertida. El objetivo es móvil para poder enfocar con precisión.



### Ejercicio resuelto

#### 3.- CUESTIONES

- Si te dicen que una persona debe ponerse gafas de  $+2,0$  dioptrías. ¿Se trata de una lente convergente o divergente? ¿Qué defecto óptico padece esa persona y como lo corrige la lente?
- ¿De qué color se vería un objeto azul si lo iluminásemos con luz roja? ¿Y con luz blanca? Justifica tu respuesta.
- Explica el funcionamiento de una lupa. ¿Podemos utilizar una lente divergente como lupa?

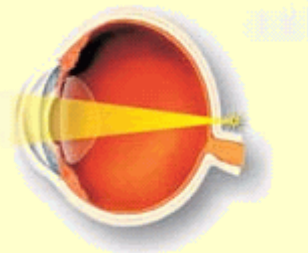
**Solución:**

a.- Al ser la potencia de la lente positiva, entonces las gafas son convergentes. Este tipo de lentes las usan los hipermetropes.

En un ojo normal, los rayos de luz procedentes del objeto atraviesan la cornea y después el cristalino, formándose la imagen en la retina. En cambio el ojo hipermetrope tiene la cornea menos curvada de lo normal, o bien el ojo es más corto. Con lo cual la imagen se forma después de la retina. Estas personas tienen mala visión cercana.

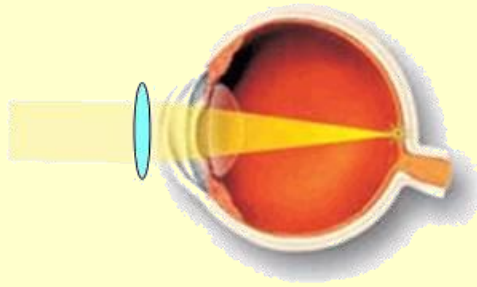


Ojo normal



Ojo hipermetrope

El defecto se corrige con lentes convergentes, que consiguen que los rayos de luz procedentes del objeto lleguen más juntos y la imagen se forme en la retina.



b.- El color de los objetos depende de la frecuencia o frecuencias de la luz que sean capaces de reflejar así como de la luz con que se los ilumine.

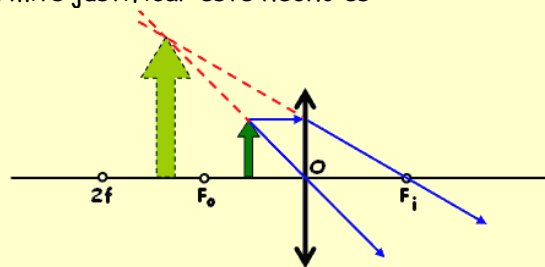
Si un objeto es por ejemplo rojo es porque al iluminarlo con cualquier luz que lleve el color rojo, reflejará el rojo y absorberá todas las demás frecuencias. Si es verde, reflejará este color y absorberá el resto.

Por este motivo, si iluminamos un objeto que es azul con luz roja, se vería negro, porque solo puede reflejar el color azul y absorberá el resto, entre ellos el rojo. Si la luz incidente no lleva azul, entonces el color que veremos será negro.

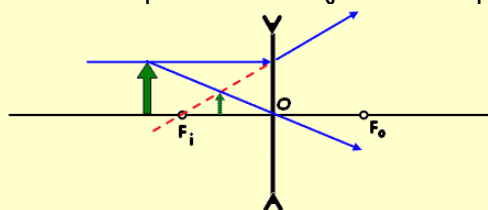
Al iluminarlo con luz blanca, lo veremos de color azul, pues la luz blanca si posee el color azul, con lo que el objeto absorberá el resto de colores y reflejará únicamente el color azul.

c.- La lupa es una lente convergente y actúa como tal cuando el objeto a observar se sitúa entre el foco y la misma lente. Entonces obtenemos una imagen de mayor tamaño, virtual y derecha, lo que nos permitirá ver el objeto más grande.

El esquema de rayos que permite justificar este hecho es:



Una lente divergente jamás puede actuar como una lupa, pues las imágenes que se obtienen son siempre de mayor tamaño, sea cual sea la posición del objeto con respecto a la lente.



## EJERCICIOS DE SELECTIVIDAD PROPUESTOS EN ANDALUCÍA.

### a.- Cuestiones

22.- Un rayo de luz pasa de un medio a otro, e n el que se propaga a mayor velocidad.

a) Indique cómo varían la longitud de onda, la frecuencia y el ángulo que forma dicho rayo con la normal a la superficie de separación, al pasar del primero al segundo medio.

b) Razone si el rayo de luz pasará al segundo medio, independientemente de cuál sea el valor del ángulo de incidencia.

23.- 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.

**24.-** a) ¿Por qué la profundidad real de una piscina llena de agua es siempre mayor que la profundidad aparente?

b) Explique qué es el ángulo límite y bajo qué condiciones puede observarse.

**25.-** a) Construya gráficamente la imagen obtenida en un espejo cóncavo de un objeto situado entre el espejo y el foco. ¿Qué características tiene dicha imagen?

b) Los espejos convexos se emplean, por sus características, en los retrovisores de los automóviles, en los espejos de los cruces en las calles, etc. Explique por qué.

**26.-** a) Explique, con ayuda de un esquema, los fenómenos de refracción de la luz y de reflexión total.

b) El índice de refracción de las sustancias disminuye al aumentar la longitud de onda. ¿Se desviará más la luz roja o la azul cuando los rayos inciden en el agua desde el aire? Razone la respuesta.

**27.-** Dibuje la marcha de los rayos e indique el tipo de imagen formada con una lente convergente si:

a) La distancia objeto,  $s$ , es igual al doble de la focal,  $f$ .

b) La distancia objeto es igual a la focal.

**28.-** a) Explique qué es una imagen real y una imagen virtual y señale alguna diferencia observable entre ellas.

b) ¿Puede formarse una imagen virtual con un espejo cóncavo? Razone la respuesta utilizando las construcciones gráficas que considere oportunas.

## b. - Problemas

**29.-** Un haz de luz que viaja por el aire incide sobre un bloque de vidrio. Los haces reflejado y refractado forman ángulos de  $30^\circ$  y  $20^\circ$ , respectivamente, con la normal a la superficie del bloque.

a) Calcule la velocidad de la luz en el vidrio y el índice de refracción de dicho material.

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

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

**30.-** a) ¿Cuál es la longitud de onda de una estación de radio que emite con una frecuencia de 100 MHz?

b) Si las ondas emitidas se propagaran por el agua, razone si tendrían la misma frecuencia y la misma longitud de onda. En el caso de que varíe alguna de estas magnitudes, determine su valor.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \text{agua/aire} = 1,3$$

**31.-** Un rayo de luz que se propaga por un medio a una velocidad de  $165 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  penetra en otro medio en el que la velocidad de propagación es  $230 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

a) Dibuje la trayectoria que sigue el rayo en el segundo medio y calcule el ángulo que forma con la normal si el ángulo de incidencia es de  $30^\circ$ .

b) ¿En qué medio es mayor el índice de refracción? Justifique la respuesta.

**32.-** Una onda de radio, de frecuencia 25 MHz y amplitud  $2 \cdot 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , se propaga a lo largo del eje OX por un medio cuyo índice de refracción es 1,5.

a) Calcule la velocidad de propagación y la longitud de onda en este medio.

b) Escriba la ecuación del campo eléctrico de la onda.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

**33.-** Un rayo de luz monocromática, que posee una longitud de onda de  $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  en el aire, incide con un ángulo de  $30^\circ$  sobre la superficie del agua, cuyo índice de refracción es 1,33. Calcule:

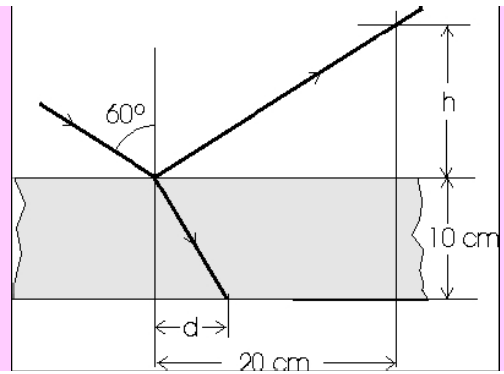
a) La frecuencia, la velocidad de propagación y la longitud de onda de la luz en el agua.

b) El ángulo que forman entre sí el rayo reflejado y el refractado.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

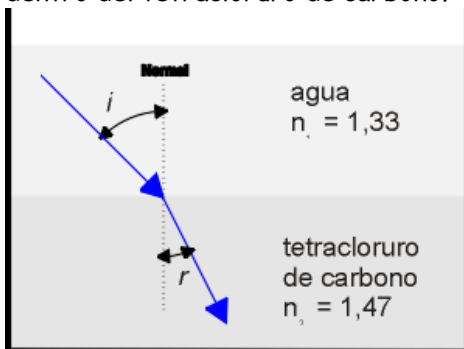
34.- Una lámina de vidrio, de índice de refracción 1,5, de caras paralelas y espesor 10 cm, está colocada en el aire. Sobre una de sus caras incide un rayo de luz, como se muestra en la figura. Calcule:

- a) La altura  $h$  y la distancia  $d$  marcadas en la figura.  
 b) El tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina.  
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



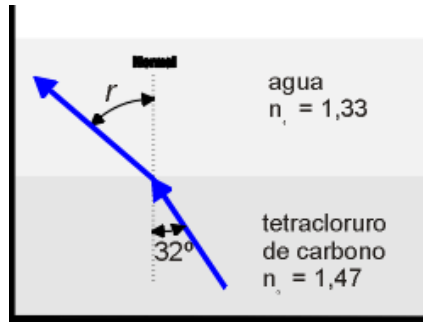
### EJERCICIOS DE REPASO (todos ' ).

- 1.- Un rayo de luz pasa desde el vidrio ( $n = 1,5$ ) hasta el aire. Determina: a) el Ángulo de refracción si el de incidencia es de  $30^\circ$ .  
 b) El Ángulo límite y c) si se producirá reflexión total para un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ .  
 Sol.: 1) a)  $48,6^\circ$ ; b)  $41,8^\circ$ ; Sí.
- 2.- Una capa de aceite ( $n = 1,45$ ) flota sobre agua ( $n = 1,33$ ). Un rayo penetra dentro del aceite con un ángulo incidente de  $40^\circ$ . Encuentra el ángulo que el rayo hace en el agua.  
 Sol. :  $28,9^\circ$
- 3.- Un rayo luminoso que se propaga en el aire llega a la superficie de un estanque lleno de agua ( $n = 1,33$ ) bajo un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ . ¿Cuál es el ángulo de refracción del rayo dentro del agua? Sol.:  $32,1^\circ$ .
- 4.- Un rayo de luz forma un ángulo de  $60^\circ$  con la normal a la superficie de un pisapapeles cúbico de vidrio. ¿Cuál es el ángulo de refracción del rayo al penetrar en el vidrio?  $n_{\text{aire}} = 1$ . Sol.:  $35,26^\circ$ .
- 5.- Un depósito rectangular contiene hasta su mitad tetracloruro de carbono ( $n = 1,47$ ) y el resto agua. Un rayo luminoso que se propaga hacia abajo a través del agua llega a la superficie de separación de ambos líquidos con un ángulo de incidencia de  $56^\circ$ . ¿Bajo qué ángulo se propagará dentro del tetracloruro de carbono?



Sol.:  $48,6^\circ$

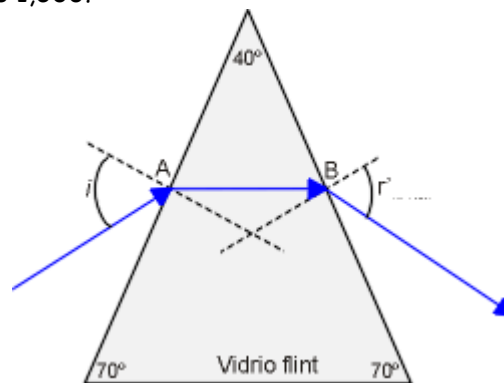
- 6.- En el depósito del problema anterior, un rayo que se propaga hacia arriba dentro del tetracloruro de carbono llega a la superficie de separación de ambos líquidos bajo un ángulo de incidencia de  $32^\circ$ . ¿Cuál será su ángulo de refracción dentro del agua?



Sol.:  $35,9^\circ$

7.- Un rayo luminoso incide sobre una lámina de vidrio de caras paralelas bajo un ángulo de incidencia de  $40^\circ$ . a) ¿Cuál es el ángulo de refracción en el vidrio? b) ¿Qué ángulo forma con la normal a la superficie al salir de nuevo al aire? (El índice de refracción del vidrio es 1,50 y el del aire = 1) Sol.:  $40^\circ$ .

8.- Un rayo de luz amarilla ha de atravesar simétricamente el prisma representado en la figura; esto es, el rayo AB dentro del vidrio ha de ser paralelo a la base del prisma, para lo cual el ángulo  $r'$  ha de ser igual al ángulo  $i$ . ¿Cuánto ha de valer el ángulo de incidencia  $i$ , si el índice del vidrio para la luz amarilla es 1,600?



Sol.:  $33,2^\circ$

9.- Considérese dos espejos planos uno en cada pared, y coincidiendo sus bordes con las esquinas de una habitación rectangular. Colóquese un objeto cerca de una esquina entre ambos espejos y hágase un esquema de las imágenes que se formarían tanto por reflexiones sencillas como por reflexiones dobles (como imagen de otra imagen).

10.- Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de  $30^\circ$ .

a.- ¿Qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul componentes de la luz blanca, si los valores de los índices de refracción del vidrio para estos colores son, respectivamente,  $n_{rojo} = 1,612$  y  $n_{azul} = 1,671$ .

b.- ¿Cuáles serán los valores de la frecuencia y de la longitud de onda correspondientes a cada una de estas radiaciones en el vidrio, si las longitudes de onda en el vacío son, respectivamente,  $\lambda_{rojo} = 656,3 \text{ nm}$  y  $\lambda_{azul} = 486,1 \text{ nm}$ ?

Datos: velocidad de la luz en el vacío :  $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ .

Sol.: a)  $\Delta r = 0,66^\circ$ ; b)  $f_R = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $f_{AZ} = 6,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $\lambda_R = 407,2 \text{ nm}$ ;  $\lambda_{AZ} = 291 \text{ nm}$ .

11.- ¿Cuál es la frecuencia de la luz que tiene una longitud de onda en el aire de 546 nm? ¿Cuál es su frecuencia en el agua? ¿Y su velocidad en el agua? ¿Y su longitud de onda en el agua?

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

Sol.:  $f_{aire} = f_{agua} = 5,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ; 410 nm

12.- Un rayo luminoso incide en una cara lateral de un cubo de vidrio de  $n = 1,5$ , que está sumergido en agua, de  $n = 1,33$ . ¿Con qué ángulo debe incidir el rayo para que al salir la luz haya reflexión total en la cara superior horizontal del cubo?



Sol.:  $31,43^\circ$

**13.**- Un rayo de luz monocromática que se propaga en el aire incide sobre una sustancia transparente con un ángulo de  $58^\circ$  respecto a la normal. Se observa que los rayos reflejado y refractado son mutuamente perpendiculares:

a.- ¿Cuál es el índice de refracción de la sustancia transparente para esta luz?

b.- ¿Cuál es el ángulo límite para la reflexión total interna en esta sustancia, si la luz se propagase desde ésta hacia el aire?

Datos:  $n_{\text{aire}} = 1$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Sol.: a)  $1,6$ ; b)  $38,67^\circ$

**14.**- Un rayo de luz amarilla, emitido por una lámpara de sodio, tiene una longitud de onda en el vacío de  $589 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ . Determina:

a.- Su frecuencia

b.- Su velocidad de propagación y su longitud de onda en el interior de una fibra de cuarzo, cuyo índice de refracción es  $n = 1,458$ .

c.- El ángulo de incidencia mínimo para el rayo de luz que, propagándose por el interior de la fibra de cuarzo, encuentra la superficie de discontinuidad entre el cuarzo y el aire y experimenta reflexión total.

Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .  $n_{\text{aire}} = 1$ .

Sol.: a)  $f = 5,09 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ; b)  $v = 2,06 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;  $\lambda = 4,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ;  $\hat{i}_L = 43,3^\circ$ .

**15.**- Una lámina de vidrio de caras planas y paralelas, situada en el aire, tiene un espesor de 8 cm y un índice de refracción  $n = 1,6$ . Calcula para un rayo de luz monocromática que incide en la cara superior de la lámina con un ángulo de  $45^\circ$ :

a.- Los valores del ángulo de refracción en el interior de la lámina y del ángulo de emergencia correspondientes.

b.- El desplazamiento experimentado por el citado rayo al atravesar la lámina.

c.- Dibujar la marcha geométrica del rayo.

Datos:  $n_{\text{aire}} = 1$ .

Sol.: a)  $26,23^\circ$ ;  $45^\circ$ ; b)  $2,87 \text{ cm}$

**16.**- A un prisma óptico de ángulo de refringencia  $\alpha = 50^\circ$  llega un rayo de luz monocromático bajo un ángulo de incidencia de  $40^\circ$ . Sabiendo que el ángulo de desviación producido por el prisma es de  $30^\circ$  y que el medio que rodea al prisma es aire:

a.- Calcular el valor del ángulo de emergencia del citado prisma.

b.- Calcular el valor del índice de refracción del prisma.

c.- Dibujar la marcha del rayo a través del prisma.

Datos:  $n_{\text{aire}} = 1$ .

Sol.: a)  $40^\circ$ ; b)  $1,52$ .

## EJERCICIOS DE SELECTIVIDAD PROPUESTOS EN LA UNIVERSIDAD DE ANDALUCÍA.

**17.**- Un rayo de luz monocromática, que posee una longitud de onda de  $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  en el aire, incide con un ángulo de  $30^\circ$  sobre la superficie del agua, cuyo índice de refracción es  $1,33$ . Calcule:

a.- La frecuencia, la velocidad de propagación y la longitud de onda de la luz en el agua.

b.- El ángulo que forman entre sí el rayo reflejado y el refractado.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Sol.: a)  $f = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $v = 2,26 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;  $\lambda = 451 \text{ nm}$ ; b)  $172,08^\circ$ .

**18.**- Construya gráficamente la imagen de:

a.- Un objeto situado a  $0,5 \text{ m}$  de distancia de un espejo cóncavo de  $2 \text{ m}$  de radio.

b.- Un objeto situado a la misma distancia delante de un espejo plano.

Explique en cada caso las características de la imagen y compare ambas situaciones.

Sol.: a) Espejo cóncavo: Imagen virtual y mayor; b) Imagen virtual de igual tamaño. Ambas presentan inversión lateral.

19. - Un rayo de luz, cuya longitud de onda en el vacío es  $6 \cdot 10^{-7}$  m se propaga a través del agua.

a.- Defina el índice de refracción y calcule la velocidad de propagación y la longitud de onda de esa luz en el agua.

b.- Si el rayo emerge del agua al aire con un ángulo de  $30^\circ$ , determine el ángulo de incidencia del rayo en la superficie del agua.

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

$$\text{Sol.: Sol.: a) } v = 2,26 \cdot 10^8 \text{ m/s}; \lambda = 451 \text{ nm}; \hat{i} = 41,68^\circ.$$

20. - Un rayo de luz monocromática emerge desde el interior de un bloque de vidrio hacia el aire. Si el ángulo de incidencia es de  $19,5^\circ$  y el de refracción de  $30^\circ$ .

a.- Determine el índice de refracción y la velocidad de propagación de la luz en el vidrio.

b.- Como sabe, pueden existir ángulos de incidencia para los que no hay rayo refractado; es decir, no sale luz del vidrio. Explique este fenómeno y calcule los ángulos para los que tiene lugar.

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

$$\text{Sol.: a) } n = 1,5; v_{\text{vid}} = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}; \text{ b) Se trata de la Reflex. total. Para } \hat{i} > 48,75^\circ$$