

TEMA 3: FENÓMENOS ONDULATORIOS Y ÓPTICA FÍSICA

1. PRINCIPIO DE HUYGENS

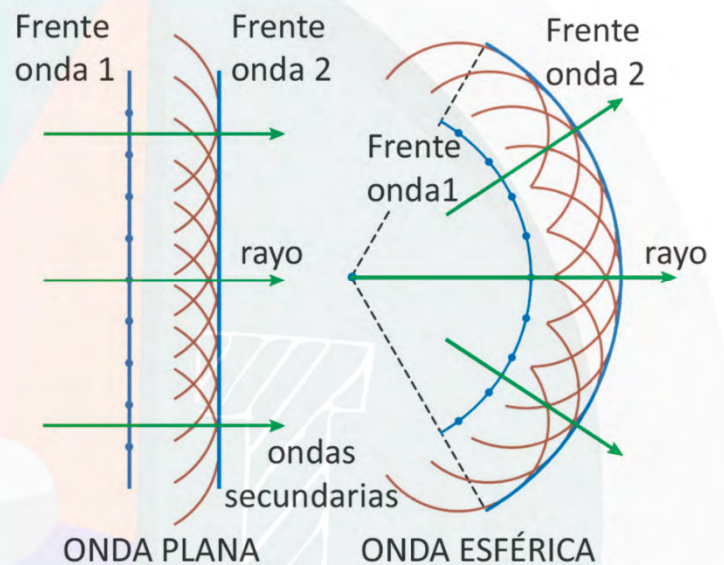
Frente de onda: lugar geométrico de los puntos a los que llega simultáneamente la energía.

Rayo: dirección de avance de la energía, que es perpendicular a los frentes de onda en los puntos por los que pase.

Christian Huygens, en 1678, enunció el principio que lleva su nombre, y que explica la propagación de cualquier onda desde un punto de vista geométrico:

“Todo punto de un frente de onda actúa como foco emisor de una onda esférica, con la energía que le ha llegado, y con las mismas frecuencia y velocidad que la onda original”.

Para aplicar el principio se dibujan ondas esféricas, usando como centro cada uno de los puntos de un frente de ondas, y todas con el mismo radio. Un frente de onda posterior será la envolvente (tangente común) a todas esas onditas esféricas.



Así, un frente de onda plano da lugar a frentes de onda planos, y uno esférico da lugar a frentes de onda esféricos.

Muchos fenómenos ondulatorios se pueden explicar de manera sencilla usando este principio, lo que condujo a Huygens a defender la teoría ondulatoria de la luz, en oposición a la teoría corpuscular de la luz de Newton.

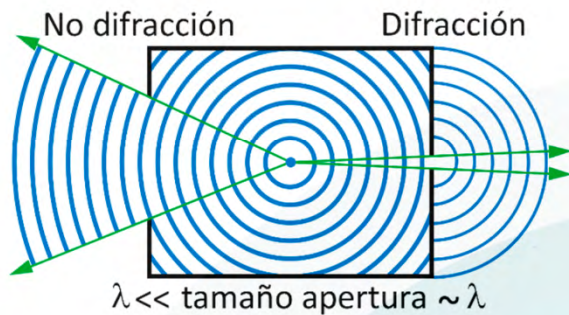
Nosotros veremos los fenómenos ondulatorios más relevantes. Algunos de ellos solamente de manera cualitativa, y otros, además, de manera cuantitativa.



2. DIFRACCIÓN DE ONDAS

(Cualitativamente)

Es el fenómeno por el cual una onda que se encuentra un orificio, o un obstáculo, de un tamaño similar a su longitud de onda, se propaga en todas direcciones.



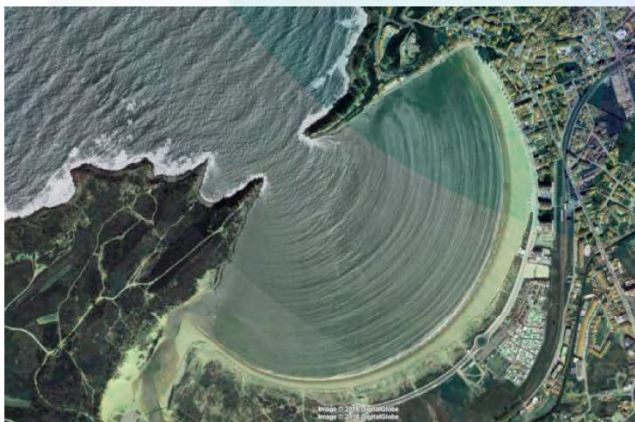
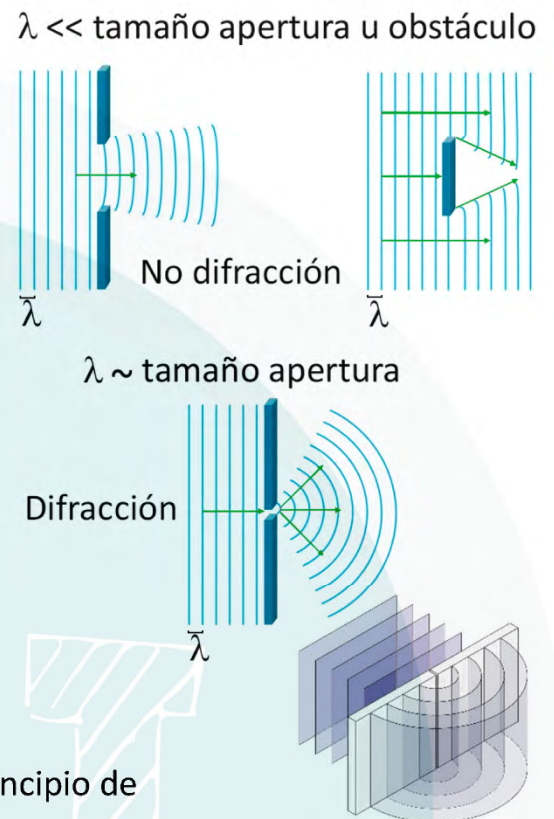
Si el tamaño del orificio, o del obstáculo no es similar al de la longitud de onda de la onda, esta se propaga sin cambiar de dirección (parte izquierda de la primera figura y parte superior de la segunda figura).

Cuanto más se asemeje el tamaño al de λ más se aprecia la difracción (parte derecha de la primera figura y parte inferior de la segunda figura).

El fenómeno se explica, de manera sencilla, mediante el principio de Huygens.

Las longitudes de onda de la luz visible, viajando por el vacío, o por el aire son muy pequeñas (entre 400 y 700 nm) $\rightarrow$ no apreciamos la difracción de la luz a simple vista.

Las longitudes de onda de los sonidos audibles, cuando viajan por el aire, sí son macroscópicas (entre 17 mm y 17 m) $\rightarrow$ sí lo apreciamos. Esto explica como el sonido parece doblar esquinas.



Difracción de ondas en el mar.

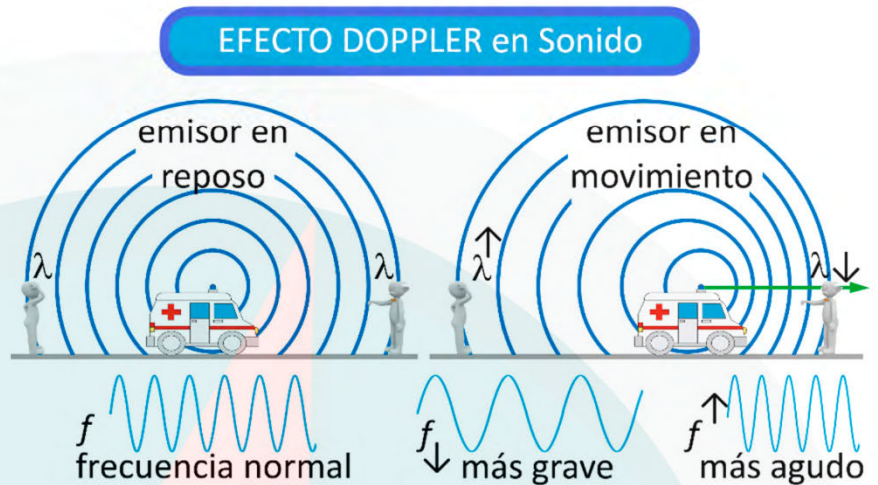


3. EFECTO DOPPLER

(Cualitativamente)

Christian Doppler, en 1843, describió por primera vez este efecto que lleva su nombre. Consiste en el cambio de frecuencia de una onda recibida por un observador con respecto a la emitida por un foco cuando existe un movimiento relativo entre ambos.

Si el foco emisor se encuentra en reposo respecto a un observador, para este, todos los frentes de onda esféricos son emitidos desde el mismo punto y, por tanto, concéntricos. Así los percibe con la f con la que los emite el foco.



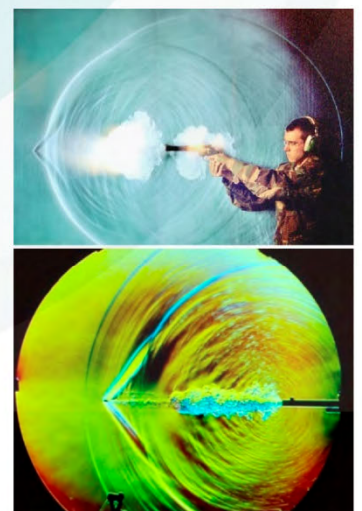
Pero si hay movimiento relativo entre el emisor y el observador, para este cada frente de onda es emitido desde un lugar diferente, más distante del anterior cuanto más rápido sea el movimiento. Si el emisor y el receptor se alejan, el observador percibe una f menor que la emitida por el foco. Si es un sonido lo percibe más grave, y si es luz visible la percibe más roja.

Si el emisor y el receptor se acercan, el observador percibe una f mayor que las emitida por el foco. Si es un sonido lo percibe más agudo, y si es luz visible la percibe más violeta.



Esto explica cómo oímos las sirenas, y junto con la reflexión es la base de los Radars y Sónares, así como la forma de “ver” delfines y murciélagos. (Usan ultrasonidos, con f muy alta y λ muy pequeña).

Si el foco emisor se mueve muy rápido puede llegar a adelantar a las ondas que generó previamente. Justo cuando lo hace se forma el “cono de Mach”



4. INTERFERENCIA DE ONDAS

(Cualitativamente)

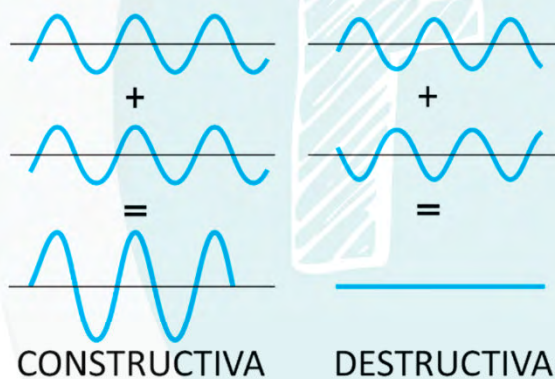
Es el fenómeno que aparece cuando llegan simultáneamente dos o más ondas al mismo punto del espacio.

Se comprueba que las ondas se rigen por el **Principio de Superposición**: el efecto conjunto es la superposición de los efectos individuales: $y_{\text{total}} = y_1 + y_2 + \dots$



Es como una suma algebraica, en la que la cresta se considera positiva y el valle negativo.

Además, **tras interferir cada pulso sigue avanzando por la cuerda como si nada**.

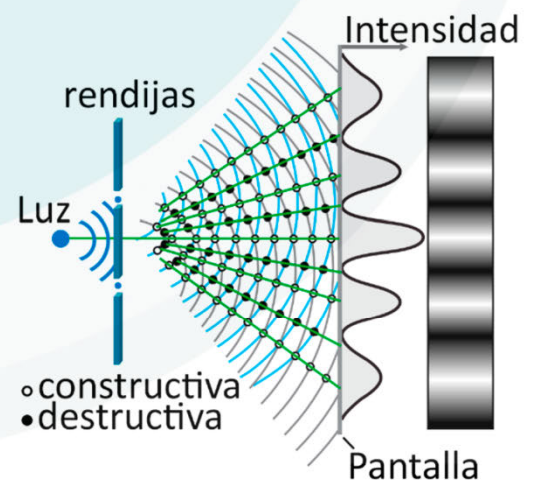


Con dos ondas idénticas sucede lo mismo: en cada punto la función de onda resultante es la suma algebraica de ambas: en el punto que dista x_1 del foco de la onda 1, y x_2 del foco de la onda 2, la función de onda vendrá dada por $y_1(x_1, t) + y_2(x_2, t)$.

Cuando a ese punto lleguen las dos ondas en fase la interferencia será constructiva, y cuando lleguen en oposición de fase será destructiva.

En el experimento de la doble rendija, realizado por primera vez por Thomas Young, en 1801, se consiguen dos ondas idénticas haciendo que se difracten. Después se proyecta la imagen en una pantalla y se obtiene un patrón de interferencia: considerando todos los puntos de la pantalla en todos los instantes la intensidad presenta un máximo en el punto central, rodeado de dos mínimos, que a su vez tienen al lado máximos secundarios y a su lado mínimos secundarios.

Young usó este experimento para corroborar el comportamiento ondulatorio de la luz.



5. REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE ONDAS

Cuando una onda llega a la superficie de separación entre dos medios diferentes, siendo v_1 su velocidad en el medio del que procede, y v_2 su velocidad en el segundo medio, parte de la energía se refleja (rebota en la superficie de separación), continuando por el medio inicial, y el resto se refracta (se introduce en el segundo medio), avanzando por el segundo medio.

Los fenómenos se conocen como **Reflexión y Refracción**, y se pueden explicar mediante el principio de Huygens.

La cantidad de energía que se refleja y la que se refracta dependen del tipo de onda, del tipo de superficie y de la inclinación inicial de la onda respecto a la superficie.

Consideramos un único rayo de la onda incidente: **Rayo incidente**.

La línea perpendicular a la superficie de separación entre los dos medios, en el punto de incidencia, es la **Normal**.

El ángulo que forma el rayo incidente con la normal es el **Ángulo de incidencia**, $\hat{i}$.

El rayo que rebota en la superficie de separación es el **Rayo reflejado**, y el ángulo que forma con la normal es el **Ángulo de reflexión**, $\hat{i}$.

El rayo que penetra en el segundo medio es el **Rayo refractado**, y el ángulo que forma con la normal es el **Ángulo de refracción**, $\hat{r}$.

La reflexión y la refracción se rigen por tres **leyes**:

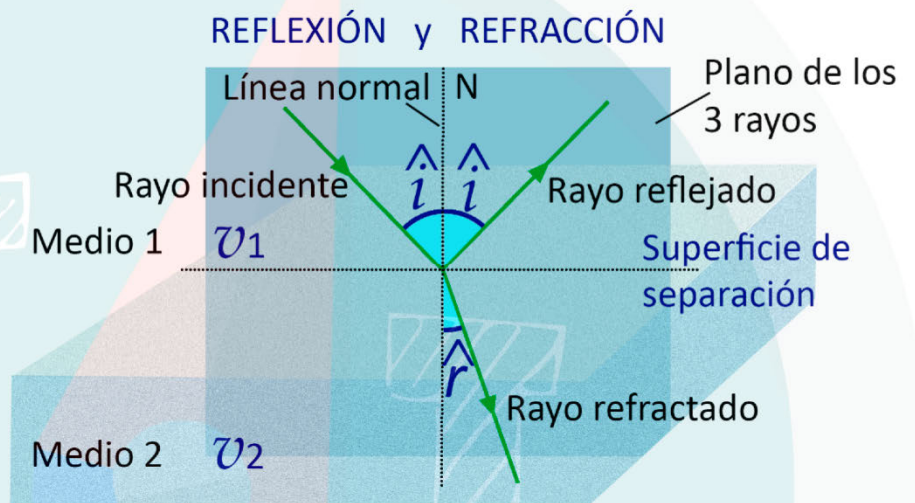
- La Normal y los rayos Incidente, Reflejado y Refractado están en el mismo plano.

- El Ángulo de Incidencia y el Ángulo de Reflexión son iguales.

$$\hat{i} = \hat{i}$$

- El Ángulo de Incidencia y el Ángulo de Refracción se relacionan según la **Ley de Snell**:

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$$



NOTAS:

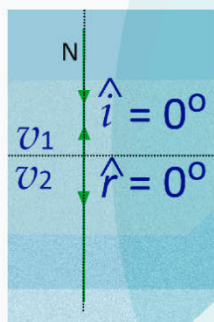
- Usaremos grados, en vez de radianes, pues no necesitamos la definición de radián.
- Además, todos los ángulos involucrados en las leyes se deben medir desde la Normal, y deben estar comprendidos entre 0° y 90° (primer cuadrante).
- Para los ángulos del primer cuadrante cuanto mayor es el ángulo

mayor es su seno, y viceversa. Como $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} \rightarrow$

- si $v_2 < v_1$ la onda se frena $\rightarrow \sin \hat{r} < \sin \hat{i} \rightarrow \hat{r} < \hat{i} \rightarrow$ el rayo se acerca a la normal, y se aleja de la superficie de separación (como en la figura de la página anterior).
- si $v_2 > v_1$ **la onda se acelera** $\rightarrow \sin \hat{r} > \sin \hat{i} \rightarrow \hat{r} > \hat{i} \rightarrow$ **el rayo se acerca a la superficie de separación.**
- si $v_1 = v_2$ (la onda no cambia de medio) $\rightarrow \sin \hat{r} = \sin \hat{i} \rightarrow \hat{r} = \hat{i} \rightarrow$ el rayo se no se desvía.

Hay dos **casos especiales**:

a) **Incidencia Normal**: el rayo incidente llega viajando por la normal.



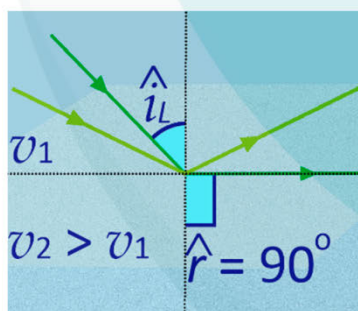
Reflexión:

$\hat{i} = \hat{i} \rightarrow$ El rayo regresa por el mismo camino por el que llegó.

Refracción:

$v_2 \sin \hat{i} = v_1 \sin \hat{r}$, pero como $\sin \hat{i} = 0 \rightarrow \sin \hat{r} = 0 \rightarrow \hat{r} = 0 \rightarrow$ El rayo no se desvía.

b) **Reflexión total**



Si $v_2 > v_1 \rightarrow$ el rayo se acerca a la superficie de separación $\rightarrow$ con $\hat{i}$ suficientemente grande podemos conseguir que $\hat{r} = 90^\circ \rightarrow$ no habrá refracción. El ángulo de incidencia para el que esto sucede se llama **Ángulo Límite**, o **Ángulo crítico**, $\hat{i}_L$.

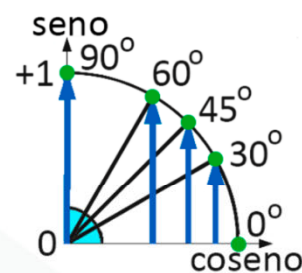
$$\frac{\sin \hat{i}_L}{\sin 90^\circ} = \frac{v_1}{v_2} \rightarrow$$

$$\hat{i}_L = \arcsen\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

Solamente tiene solución si

$v_2 > v_1$.

Para ángulos de incidencia mayores que $\hat{i}_L$ toda la onda se refleja, por lo que al fenómeno se le llama **Reflexión Total**.



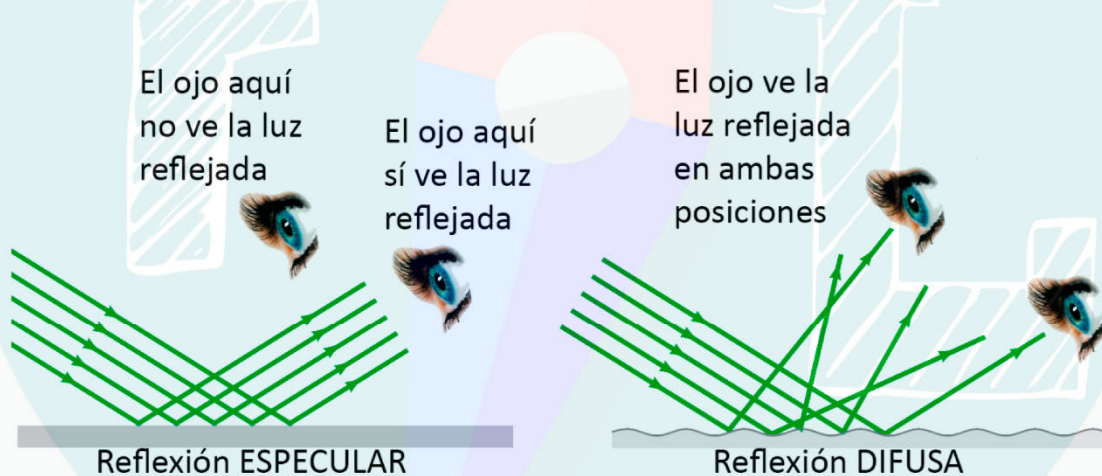
5.1. REFLEXIÓN DE LA LUZ

Cuando vemos algo puede ser por dos razones:

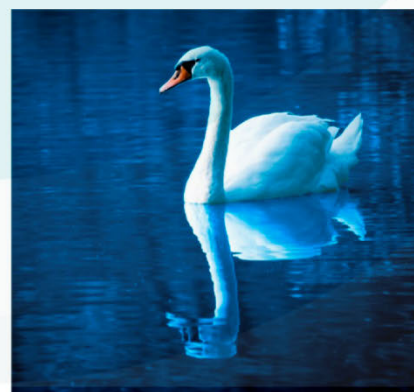
- porque emite luz propia, que llega a nuestros ojos en la dirección desde la fuente hasta nosotros (una estrella, una bombilla, una luciérnaga, ...).
- Porque refleja parte de la luz que le llega, y este reflejo es el que incide sobre nuestros ojos. Estaremos en este caso si en la oscuridad no vemos la fuente.

Dependiendo de lo rugosa que sea la superficie donde se reflejan los rayos distinguimos entre dos tipos de reflexión:

- **Reflexión especular:** si la superficie es completamente lisa todos los rayos paralelos que lleguen a ella emergerán paralelos también, y solamente podremos ver la fuente si miramos en su dirección.
- **Reflexión difusa:** si la superficie irregular las normales en cada punto no serán paralelas y los rayos reflejados emergerán de ella en distintas direcciones, lo que nos permitirá ver la fuente desde distintas posiciones.



Reflexión ESPECULAR



Reflexión DIFUSA

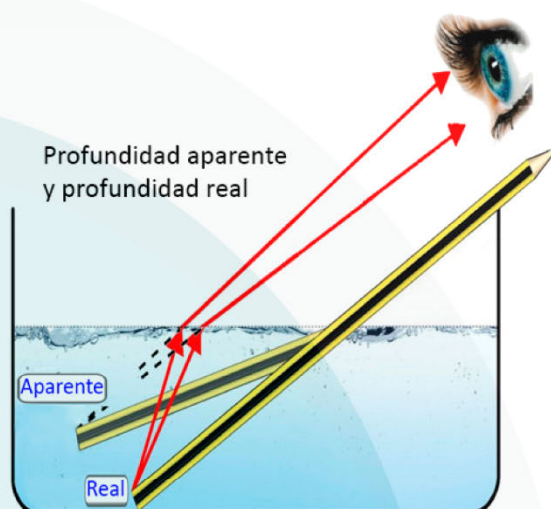
5.2. REFRACCIÓN DE LA LUZ

Teniendo en cuenta la definición de índice de refracción de un medio, $n = \frac{c}{v}$, la ley de Snell se

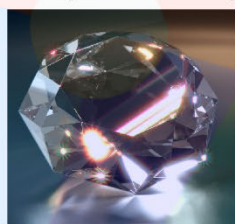
puede reescribir para la luz: $\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_1}{c} \cdot \frac{c}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \boxed{n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{r}}$

Cuando vemos objetos que se encuentran en dos medios diferentes (en la imagen aire y agua), la refracción provoca que los veamos como si estuvieran rotos.

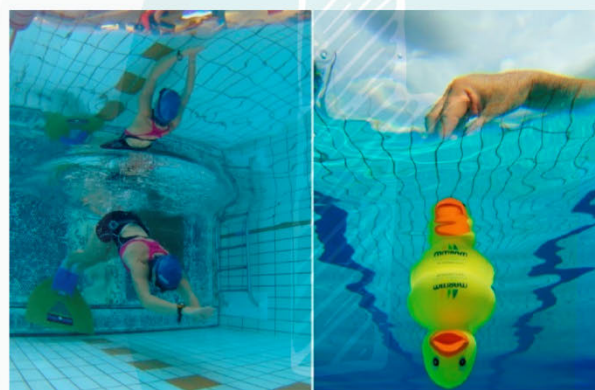
La refracción entre los líquidos transparentes y el aire provoca además que nuestros ojos sean engañados, apreciando una profundidad aparente menor que la profundidad real (excepto si miramos perpendicularmente a la superficie).



La reflexión total de la luz, cuando los rayos procedentes del agua se dirigen hacia el aire provoca imágenes reflejadas en la superficie.



El brillo de los diamantes se debe a su alto $n = 2,42$, y a sus múltiples caras pulidas adecuadamente, que hacen que la luz permanezca mucho tiempo dentro, de ellos.



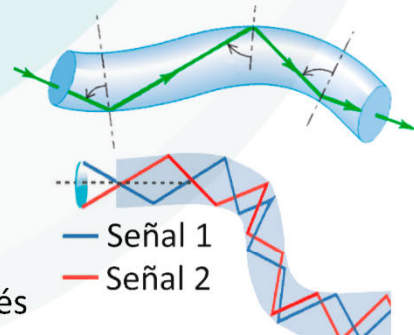
La reflexión total de la luz es la base del funcionamiento de las **Fibras ópticas**, que se usan en comunicaciones, iluminación y medicina. Una fibra óptica está formada por un núcleo de cuarzo, con $n = 1,54$, del grosor de un cabello humano, que se envuelve en un tubo de plástico de menor índice de refracción, resultando así un ángulo crítico pequeño.

Esto provoca que se produzca reflexión total, de manera que los rayos se reflejan contra las paredes con ángulos de incidencia muy grandes, y así la luz se propaga por la fibra.

Como, prácticamente, no se producen pérdidas, las señales pueden recorrer grandes distancias, a una velocidad $v = \frac{c}{n} = 1,95 \cdot 10^8$ m/s.

Además, debido a que las ondas, aunque interfieran, después continúan tal y como venían, se pueden enviar varias señales simultáneamente por la misma fibra.

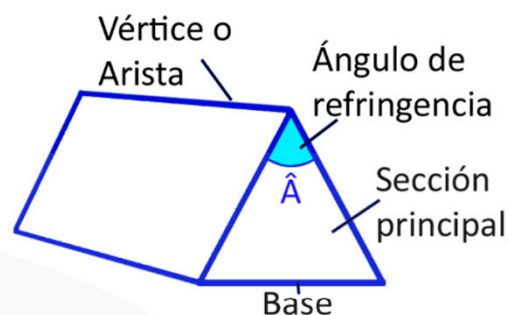
La refracción y la reflexión total son el origen de los **Espejismos**.



6. PRISMAS ÓPTICOS

Un prisma óptico es un medio transparente limitado por dos superficies planas, no paralelas. Sus elementos son:

- Ángulo de refringencia ($\hat{A}$): el menor ángulo formado por las dos superficies.
- Vértice o arista: la intersección de las dos superficies.
- Base: la cara opuesta al vértice.
- Sección principal: la producida por un plano perpendicular a la arista.



Los prismas que se usan en óptica suelen ser de sección principal triangular.

Nosotros limitaremos el estudio de la propagación de la luz al caso sencillo en que el plano de incidencia sea normal a la arista del prisma. En estas condiciones los rayos no saldrán de dicho plano, que es el de la sección principal del prisma.

Si el prisma está en el un medio en el que la luz viaja a velocidad v_m , y por propio prisma viaja a v_p :

1: Primera refracción. Ley de Snell

$$\frac{\text{sen } \hat{i}_1}{\text{sen } \hat{r}_1} = \frac{v_m}{v_p} \rightarrow \text{calculamos } \hat{r}_1$$

Para obtener $\hat{i}_2$ consideramos el triángulo formado por el vértice del prisma y los puntos de incidencia 1 y 2: la suma de sus tres ángulos internos debe ser $180^\circ \rightarrow$

$$\hat{A} + (90^\circ - \hat{r}_1) + (90^\circ - \hat{i}_2) = 180^\circ \rightarrow \hat{A} = \hat{r}_1 + \hat{i}_2 \rightarrow \text{calculamos } \hat{i}_2$$

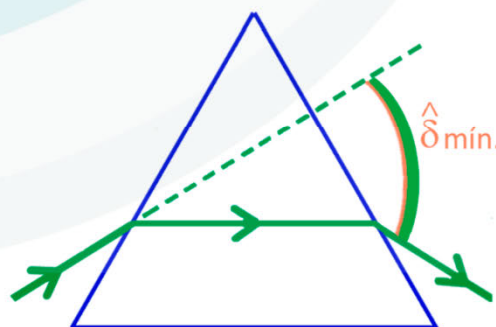
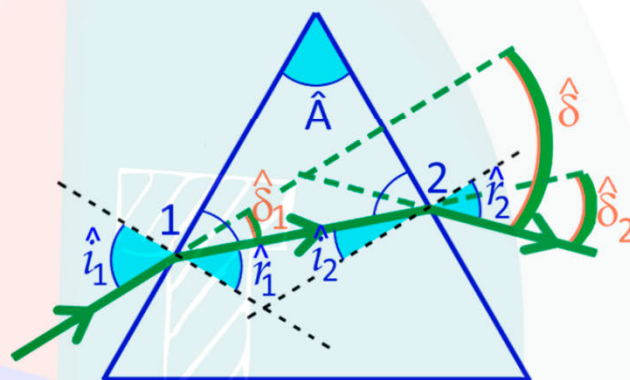
2: Segunda refracción. Ley de Snell

$$\frac{\text{sen } \hat{i}_2}{\text{sen } \hat{r}_2} = \frac{v_p}{v_m} \rightarrow \text{calculamos } \hat{r}_2$$

Como el rayo se desvía las dos veces en el mismo sentido su desviación angular total es:

$$\hat{\delta} = \hat{\delta}_1 + \hat{\delta}_2 = (\hat{i}_1 - \hat{r}_1) + (\hat{r}_2 - \hat{i}_2)$$

Se demuestra que la desviación es mínima cuando las caras laterales del prisma y el rayo por el interior forman un triángulo isósceles, siendo la trayectoria del rayo simétrica respecto a la bisectriz del ángulo $\hat{A}$.



7. CAMBIO DE LA LONGITUD DE ONDA DE LA LUZ

Cuando luz pasa del vacío (o del aire) a un material transparente, con índice de refracción n , su frecuencia no cambia, pero sí lo hace su longitud de onda:

$$\left. \begin{array}{l} \text{en el vacío} \quad \lambda_0 \cdot f = c \\ \text{en otro medio} \quad \lambda \cdot f = v \end{array} \right\} \rightarrow \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c}{v} = n \quad \rightarrow \quad \boxed{\lambda = \frac{\lambda_0}{n}}$$

8. DISPERSIÓN DE LA LUZ

Un haz de luz de una única frecuencia, y por tanto de una única longitud de onda, se llama **luz monocromática**.

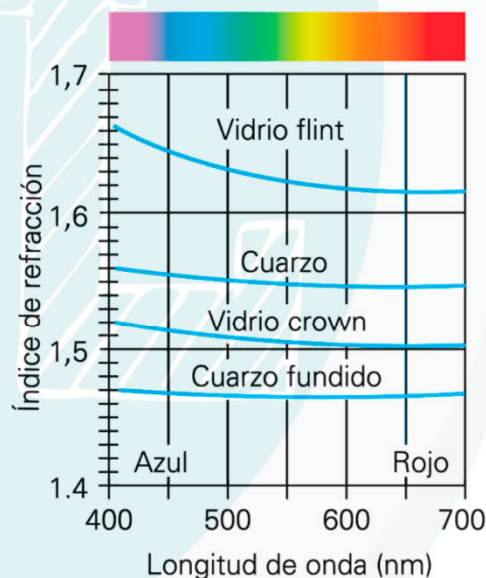
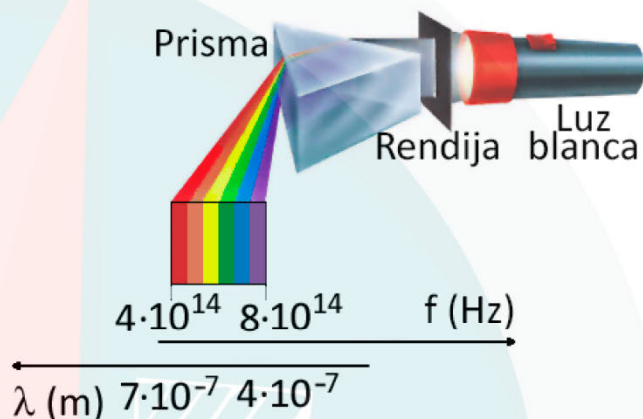
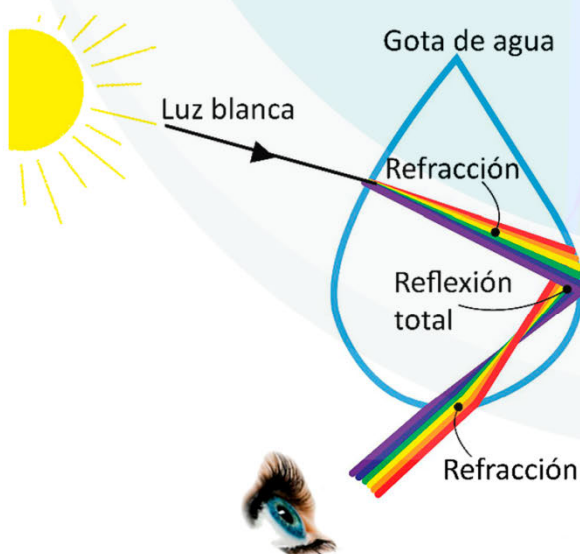
La luz visible que contiene ondas de todas las frecuencias que la componen, o colores (por ejemplo, la luz solar), se llama **luz blanca**.

Cuando la luz blanca atraviesa un prisma óptico se comprueba que las luces de distintos colores se separan. El fenómeno se conoce como **Dispersión de la luz**.

Se explica porque resulta que el índice de refracción de los materiales depende de la longitud de onda $n(\lambda)$.

Así, según la ley de Snell, luces de diferente longitud de onda que lleguen con el mismo ángulo de incidencia presentarán distinto ángulo de refracción.

Esto no sucede con una lámina de caras planas y paralelas, porque se vuelven a mezclar las luces de todos los colores.



La dispersión de la luz y la reflexión total son el origen del **Arco iris**, que se puede ver cuando llueve y hace sol si nos situamos con el sol a nuestra espalda y observamos con ángulos respecto al suelo horizontal entre 40° y 42° .



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

Ley de la reflexión (ángulo de incidencia = ángulo de reflexión)

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ley de Snell (excepto para incidencia normal, en cuyo caso el rayo no se desvía: $\hat{i} = 0^\circ$, $\hat{r} = 0^\circ$)

$$\hat{i}_L$$

Ángulo de incidencia límite, o crítico: para el que el ángulo de refracción es 90° . Solamente existe si la onda se acelera.

$$n_1 \cdot \sin \hat{i} = n_2 \cdot \sin \hat{r}$$

Ley de Snell para la luz, con $n = \frac{c}{v}$ (índice de refracción)

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

Cambio de longitud de onda al pasar la luz del vacío a otro medio, con λ_0 la longitud de onda en el vacío

