# Fenómenos ondulatorios

# Introducción

Los procesos en los cuales intervienen ondas dan lugar a una serie de fenómenos especiales, dada la naturaleza particular de las ondas, que son de interesante estudio, y que explican muchas de las asombrosas propiedades que tiene tanto la luz como el sonido. En el caso de la luz podemos explicar en qué consisten los fenómenos de reflexión y refracción y qué leyes gobiernan estos fenómenos. También habrá que dedicar un apartado al fenómeno físico que se produce cuando se superponen dos o más ondas: la interferencia, y por último, tratar algunos temas someramente para un conocimiento cualitativo por parte del lector, como son los temas sobre la difracción y la polarización de las ondas.

# Principio de Huygens

El principio de Huygens es una herramienta útil y bastante sencilla para entender muchos de los extraños procesos que suceden relacionados con las ondas. Si bien no es estrictamente correcto y además se acepta sin una demostración rigurosa, sirve para explicar satisfactoriamente algunos fenómenos ondulatorios como la interferencia, reflexión (figura 15.6) o refracción (figura 15.8).

Básicamente este principio explica cómo tiene lugar la propagación de una onda: cuando cada uno de los puntos de un medio material es alcanzado por una onda, este punto se vuelve a comportar como un foco emisor de ondas, creando una serie de ondas secundarias. El resultado global de todos estos puntos emitiendo ondas a la vez será la de un nuevo frente de ondas similar al anterior, con lo que la onda se irá propagando sucesivamente.

# Interferencia entre ondas

¿Qué sucederá cuando dos ondas se cruzan?. Esta es la pregunta que queremos explicar en este apartado. Para resolverla hemos de volver a recurrir a nuestro ``conocido'' el principio de superposición, es decir, que podemos considerar el resultado final como una mera suma de los efectos causados por la primera onda más la segunda. Recordemos que este principio parece ser una propiedad de la naturaleza, ya que el efecto de aplicar dos ondas consecutivas sobre un mismo medio no tendría por que dar como resultado la simple suma de ambas ondas.

> ▹ Al propagarse dos o más ondas por un medio la perturbación total resultante es, simplemente, la suma de las perturbaciones de ambas ondas.

Vamos a utilizar el principio de superposición para estudiar algunos casos sencillos de interferencia entre ondas.

## Ondas coherentes: Interferencias constructivas y destructivas

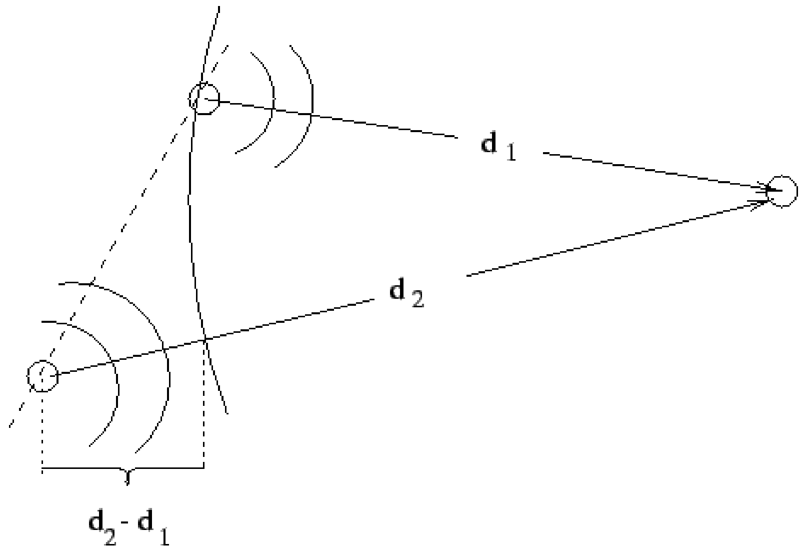


**Figure 15.1:** Esquema de un fenómeno de interferencias.

Supongamos que tenemos dos ondas tales que su longitud de onda, frecuencia y amplitud son iguales, y que sus fases o bien son iguales, o bien presenta una cierta discrepancia que permanece constante. Son precisamente este tipo de ondas las que reciben el nombre de ondas coherentes. Matemáticamente llamemos $\psi$ a una onda y $\phi$ a la otra y supongamos que queremos calcular el efecto que hacen sobre un cierto punto. Ahora bien, los puntos de aplicación del foco de dichas ondas no tienen por que coincidir, por lo que las distancias a dicho punto serán distintas, y las llamaremos $d_1$ y $d_2$. Tomaremos su frecuencia como $\omega$ y su longitud de onda $\lambda$ aunque, no obstante, vamos a realizar el tratamiento matemático expresando las ondas en función del número de ondas $k$ para simplificar un poco la notación. Así pues tendremos que una onda será

$$\psi = A\sin(\omega t - kd_1)$$

y la otra

$$\phi = A\sin(\omega t - kd_2).$$

La onda resultante será la suma de ambas, es decir

$$\Psi = \psi + \phi. \tag{15.1}$$

Hagamos ahora un poco de álgebra, la expresión (15.1) una vez sustituida se transforma en

$$\Psi = A\sin(\omega t - kd_1) + A\sin(\omega t - kd_2)$$

que al extraer factor común a la amplitud da como resultado

$$\Psi = A(\sin(\omega t - kd_1) + \sin(\omega t - kd_2)).$$

Apliquemos ahora la igualdad trigonométrica siguiente

$$\sin(A) + \sin(B) = 2\sin\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right) \tag{15.2}$$

a nuestra expresión de $\Psi$ y el resultado final será que

$$\Psi = 2A\sin\left(\omega t - k\frac{d_1+d_2}{2}\right)\cos\left(\frac{kd_2 - kd_1}{2}\right). \tag{15.3}$$

Interpretar este resultado es sencillo, pero no por ello poco sorprendente. Si hacemos la sustitución $d = \frac{d_1+d_2}{2}$

tendremos que la onda resultante es una onda que parece provenir de una distancia $d$, que es la semisuma de las distancias a ambos focos, pero cuya amplitud no es constante, sino que depende del término $2A\cos\left(\frac{kd_2-kd_1}{2}\right)$ y que por tanto va a variar según el punto del plano y las relaciones entre las distancias a los focos, como se representa en la figura 15.1.

## Interferencia constructiva

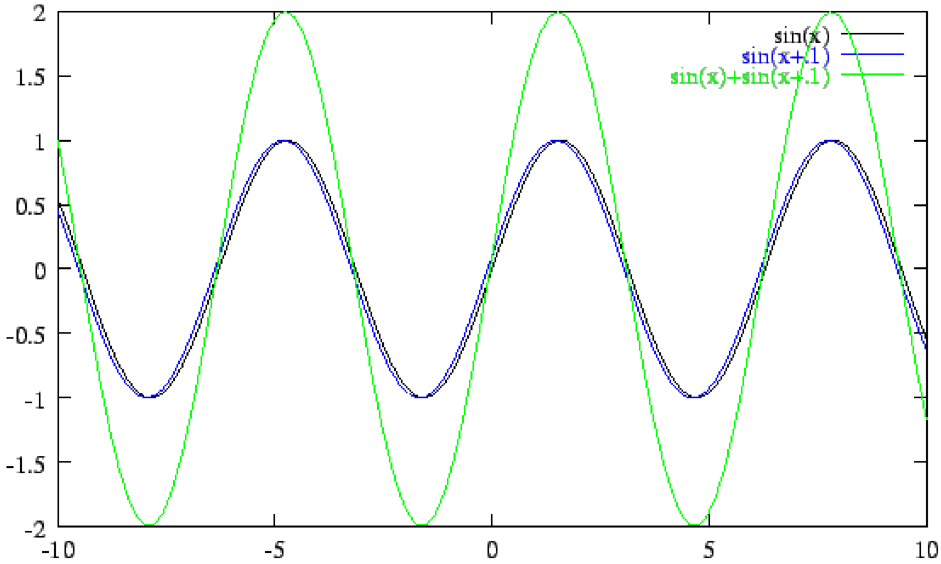


**Figure 15.2:** Representación de una interferencia (casi) constructiva.

Concretamente esta amplitud será máxima en los lugares en los cuales $\cos\left(\frac{kd_2-kd_1}{2}\right)=1$ y mínima para aquello sitios donde $\cos\left(\frac{kd_2-kd_1}{2}\right)=0$. Analizando esto un poco más profundamente tendremos que aquellos puntos que verifiquen

$$\frac{kd_2-kd_1}{2}=n\pi$$

tendrán una amplitud máxima. En ellos se producirá lo que se denomina interferencia constructiva, ya que en dichos puntos las ondas se ``funden'' constructivamente dando lugar a una amplitud que es la suma de ambas amplitudes. Un ejemplo se ve representado en la figura 15.2, donde la interferencia no es puramente constructiva, porque si no se vería únicamente el dibujo de una onda, pero sí existe un desfase tan pequeño como para ver qué significa este tipo de interferencia.

## Interferencia destructiva

A su vez, en los sitios donde este coseno modulador sea nulo, que serán aquellos para los cuales se cumpla

$$\frac{kd_2-kd_1}{2}=(2n+1)\frac{\pi}{2}$$

tendremos que la amplitud será siempre cero, independientemente del tiempo que pase, ya que al ser cero uno de los dos términos de la ecuación (15.3) el resultado total será nulo y no dependerá del tiempo. Entonces a estos puntos que nunca presentan amplitud se les denomina nodos y a las líneas que los unen se las denomina líneas nodales. Un ejemplo de interferencia destructiva está representado en la figura 15.3. Nótese que el resultado de la suma de las ondas es una línea plana, una onda de amplitud nula.

▷ Interferencia constructiva supone amplitud máxima, destructiva implica amplitud nula.

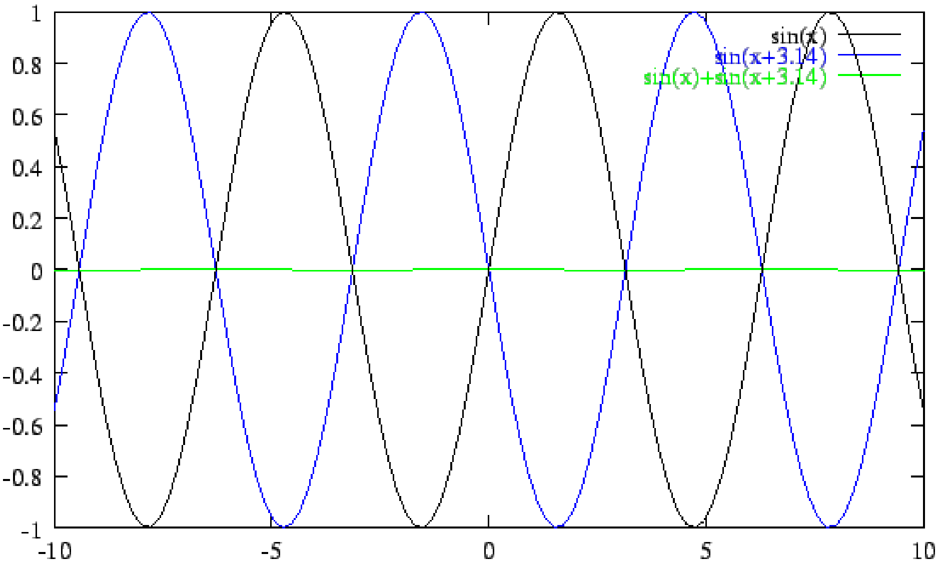


**Figure 15.3:** Representación de una interferencia destructiva.

◇ Se puede intentar entender estos resultados utilizando un poco de intuición física. Una interferencia constructiva se producirá cuando la diferencia de fase sea de $n\pi$ pero dicha diferencia está marcada por el término

$$\frac{kd_2 - kd_1}{2}$$

que, puesto en función de $\lambda$ resulta ser

$$\pi\left(\frac{d_2}{\lambda} - \frac{d_1}{\lambda}\right).$$

Igualando esta diferencia de fase a $n\pi$ tendremos que

$$d_2 - d_1 = n\lambda$$

lo cual constituye una fórmula mucho mas inteligible que las anteriores. Resulta que para puntos separados una longitud entera de longitudes de onda la interferencia es constructiva. Un cálculo similar para interferencia destructiva nos llevaría a que

$$d_2 - d_1 = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda.$$

¿Qué significa esto?. Pues sencillamente que si la distancia entre los puntos es un número entero de longitudes de onda, como ambas ondas parten con la misma fase de sus focos respectivos, cuando llegan se encuentran una frente a la otra variadas en lo que han logrado recorrer de más o de menos en esta diferencia de distancias. Si esta diferencia es de un número entero de lambdas ambas ondas se encuentran exactamente igual, porque la función seno es periódica y se repita cuando ha avanzado espacialmente esta magnitud $\lambda$. En cambio si ha avanzado cierto número de lambdas más la mitad de una $\lambda$ resulta que las ondas se encuentran en contra-fase, o bien que una es justo la opuesta de la otra[15.1] y por tanto ambas se anulan simultáneamente.

## Experiencia de Young

◦ Consiste esta experiencia en hacer iluminar dos rendijas muy pequeñas y separadas una distancia $a$, también pequeña, con un foco de luz. A una distancia $d$ medida desde la mitad de las rendijas, y que debe ser mucho mayor que $a$, se puede observar que existirá un máximo, una interferencia constructiva, si

$$\frac{ay}{d} = n\lambda,$$

siendo $y$ la distancia vertical medida desde el centro de la pantalla de observación, como se ha representado en la figura 15.4.

Sería un ejercicio interesante para el lector intentar demostrar esto partiendo de la relación para un máximo $d_2 - d_1 = n\lambda$ y la figura 15.4.

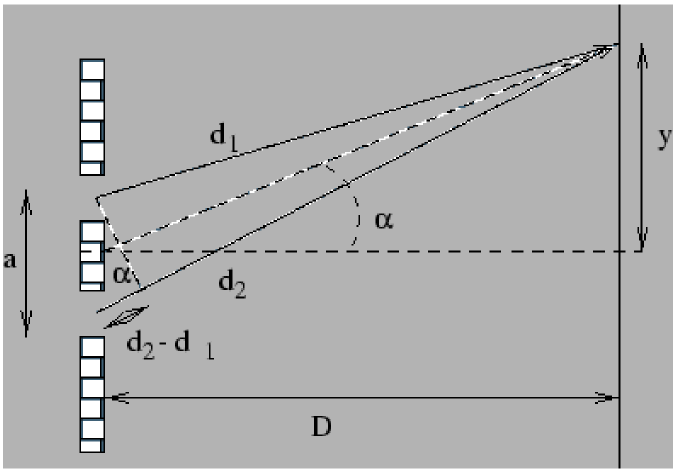


**Figure 15.4:** Experiencia de Young.

# Ondas estacionarias: Propagación en direcciones opuestas

Vamos ahora a proponer una forma un poco diferente de ``interferencia''. Tomemos como ejemplo una cuerda y fijémosla por uno de sus extremos. (En un gancho de una pared, por ejemplo). Si propagamos ahora una onda por la cuerda esta tarde o temprano llegará a la pared y rebotará en ella. Tendremos entonces una interferencia que se producirá en la cuerda, debida a dos ondas iguales, con la excepción de que se propagan en sentido contrario. Se va a adelantar ya que este tipo de situación se denomina ondas estacionarias.

Matemáticamente lo que tenemos es que una onda presenta la forma

$$\phi = A \sin(\omega t - kx)$$

y la otra, por propagarse en sentido contrario, será

$$\psi = -A \sin(\omega t + kx)$$

, donde el signo negativo es debido a que al ``rebotar'' también se produce un cambio de fase de $\pi$ radianes, siendo la resultante la suma de ambas, por tanto

$$\Phi = \phi + \psi = A \sin(\omega t - kx) - A \sin(\omega t + kx).$$

Para ver que significa esta expresión se va a volver a utilizar la relación (15.2) de la suma de dos funciones seno, nos dará

$$\Phi = 2A\cos(\omega t)\sin(kx). \tag{15.4}$$

¿Qué significa (15.4)?. Tenemos que destacar algunos puntos:

- No se trata de una onda propiamente dicha, pues no aparece un término que contenga una dependencia espacial y temporal, sino que estas dependencias aparecen separadas.
- La energía no se puede propagar por la cuerda. Esto es debido a que aquellos puntos para los cuales $\sin(kx) = 0$ van a estar siempre quietos, ya que no presenta ninguna otra dependencia. Evidentemente la energía no podrá rebasar estos puntos para propagarse al otro lado. Por tanto esta construcción no es una onda normal, no es una onda ``viajera''; precisamente por esto se la denomina onda estacionaria.
- Un punto cualquiera de la cuerda se limitará a moverse de forma armónica en el tiempo, debido al término $\cos(\omega t)$ con una amplitud $2A\sin(kx)$.

A los puntos que cumplen $\sin(kx) = 0$ y que por tanto, van a estar siempre quietos, se les denomina nodos. En nuestro caso tendremos nodos en las posiciones en las cuales $kx = n\pi$.

## Onda estacionaria en una cuerda fija por ambos extremos

Este es un caso interesante y con ciertas aplicaciones prácticas. Como ejemplo, en cualquier instrumento de cuerda tendremos una disposición de este tipo.

Vamos a hacer un análisis semi-cuantitativo de este fenómeno. Si en este caso la cuerda debe estar sujeta por ambos extremos significa que dichos extremos no van a poder moverse. Deberán ser por tanto nodos. Esto nos lleva a afirmar que $\sin(k0) = 0$ y $\sin(kL) = 0$ donde se ha supuesto, como resulta lógico, que la cuerda empieza en $x = 0$ y acaba en $x = L$. La primera condición es trivial y es siempre cierta, pero la segunda nos ofrece que

$$kL = n\pi$$

expresión que hay que interpretar. Es ésta una relación entre el número de ondas $k$ y la longitud de la cuerda $L$. Ahora bien, puesto que la longitud $L$ de la cuerda es algo que podemos variar a nuestro antojo lo que tenemos realmente es que el número de ondas no puede ser uno cualquiera, sino que debe cumplir que $k = \frac{n\pi}{L}$, es decir ser discreto y con unos valores concretos[15.2]. Poniendo estos valores en función de $\lambda$ tenemos que

$$\lambda = 2\frac{L}{n},$$

y como también existe una relación entre $\lambda$ y $T$ y $T = \nu^{-1}$ podemos por fin expresar la frecuencia de la vibración como

$$\nu = n\frac{v}{2L}$$

donde $v$ es la velocidad de propagación de la onda (si se propagara).

Este resultado sí que es extraordinariamente interesante, porque nos dice que la frecuencia de la onda va a estar delimitada por el valor de su longitud $L$. Aún así para una longitud $L$ tendremos una serie de frecuencias diferentes según el valor de $n$ que tomemos, que se denominan armónicos. Esta es la razón fundamental de la existencia de los instrumentos de cuerda, como por ejemplo una guitarra. Como la frecuencia de la oscilación se propaga por el aire y se escucha como sonido, tendremos que podemos variar la nota bien cambiando la longitud de la cuerda $L$, por ejemplo, poniendo el dedo sobre un traste y acortando esta longitud en cierta cantidad determinada, o bien variando la velocidad de propagación de la onda en la cuerda, que dependía de la tensión y la densidad: es decir, bien afinando la guitarra, es decir, aumentando y disminuyendo la tensión de la cuerda, o bien variando la densidad de la cuerda poniendo una primera en vez de una segunda, o una tercera, etc...

# Otras propiedades de las ondas

## Difracción

La difracción es un fenómeno característico de las magnitudes ondulatorias, caracterizado por la propagación ``anómala'' de dicha magnitud en las cercanías de un obstáculo o una abertura comparable, en tamaño, a su longitud de onda.

En un lenguaje más intuitivo: la difracción supone una contradicción a nuestra idea preconcebida de que la luz se propaga en línea recta, observándose en las cercanías de esquinas de obstáculos, o en los bordes de la sombra de la luz tras atravesar una rendija estrecha, que dicha luz parece ``torcer la esquina'' o desviarse de su trayectoria recta.

La difracción es el resultado de una compleja serie de interferencias de las magnitudes ondulatorias consigo mismas. Si en la luz no se observa aparentemente este fenómeno, razón por la cual surge nuestra idea preconcebida de la ``propagación en línea recta de la luz'', es debido a que, como ya se ha dicho antes, este fenómeno aparece sólo cuando el tamaño de los objetos o rendijas es comparable al de la longitud de onda de la propagación. Como en el caso de la luz visible esta longitud es diminuta. en nuestra experiencia macroscópica y cotidiana de la existencia, no tenemos consciencia de estos fenómenos.

## Polarización

En una onda transversal el movimiento de las partículas que componen el medio (o de los campos que oscilan, como en el caso de la luz), debe ser perpendicular a la dirección de propagación, Ahora bien, como la dirección de propagación es una recta en el espacio tridimensional, la perpendicular a esta recta supondrá un plano en el cual el medio puede desplazarse. Imaginemos que una onda se propaga en el eje $z$. Esto supone que la oscilación deberá producirse ortogonal a dicho eje, es decir, estar contenida en el plano $xy$. Pero no se nos dice si estando contenido en dicho plano puede oscilar en sentido norte-sur, o este-oeste, o suroeste -nordeste, etc. Esta libertad de elección que queda de la dirección de vibración componente de la onda se puede caracterizar en una propiedad que se denomina polarización. Polarización de una onda será por tanto la dirección concreta que toma dicha onda en la vibración de sus partículas componentes.

La luz normal, por ejemplo, no está polarizada. Esto significa que varía aleatoriamente su dirección de vibración en el plano perpendicular a la propagación. Cuando esta variación no se produce, o bien se conoce con exactitud, se dice que la onda está polarizada, y además se puede definir su tipo de polarización.

Decir por último que existen dispositivos capaces de polarizar la luz, tales como los polarizadores o polaroides.

## Otras propiedades

Existen otras propiedades interesantes de los fenómenos ondulatorios en general y la luz en particular, que quiero reseñar aquí, así como una serie de fenómenos que son fáciles de explicar con las nociones que se recogen en párrafos anteriores y posteriores de este capítulo. Por ejemplo la dispersión de la luz, responsable de que el cielo sea azul y las puestas de sol rojizas, responsable también de la salida del arco iris cuando el sol logra iluminar el mundo en un día lluvioso. La reflexión y refracción de la luz, que trataremos posteriormente, y causa de que podamos vernos en un espejo, de los espejismos y de que las cucharillas se ``tuerzan'' cuando las metemos en agua, causa también de los halos que el sol y la luna ofrecen a veces.

Así pues fenómenos como estos, o como el atractivo colorido que el aceite ofrece sobre un charco, por qué no vemos bien debajo del agua si abrimos los ojos al líquido elemento, o incluso por qué los peces son plateados por su panza, pueden explicarse utilizando algunos principios básicos de interferencia de la luz en capas delgadas, índice de refracción del agua frente al del cristalino e incluso reflexión total e ideas evolutivas darwinistas. Queda a juicio del lector estimar si la física ofrece sólo algunas explicaciones parciales e inútiles o si bien es capaz de formar parte junto con la poesía, la religión y la mística de las doctrinas que son capaces de crear una visión global de la belleza de nuestro Universo, e incluso llegar a suplantarlas algún día...

# Reflexión y refracción de la luz

Los fenómenos de reflexión y refracción se producen en general cuando un movimiento ondulatorio se encuentra en sus propagación con una superficie que separa dos medios distintos. La parte de la onda que logra atravesar dicha superficie y pasar al otro lado frecuentemente cambia de dirección, conociéndose este fenómeno como refracción. También sucede que parte de la onda (o toda) rebota con la superficie, denominándose reflexión a este fenómeno.

## Reflexión

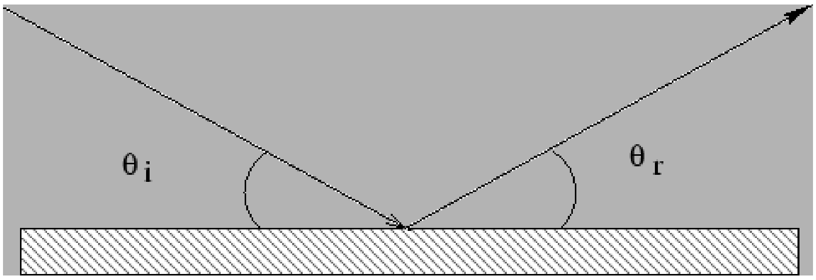


**Figure 15.5:** Reflexión de una onda.

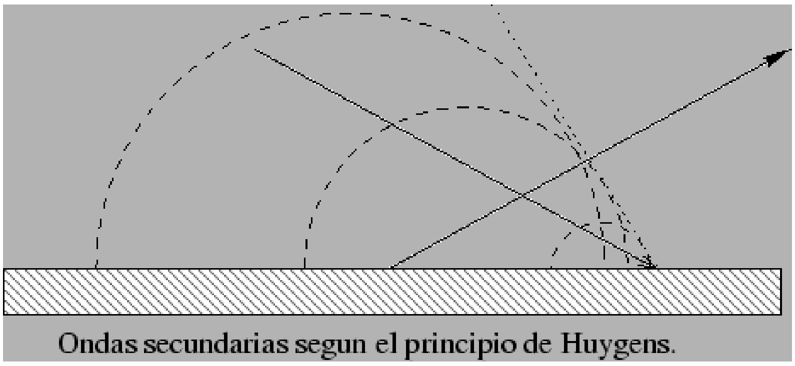


**Figure 15.6:** Explicación según el principio de Huygens de la reflexión.

La ley de la reflexión se enuncia afirmando que, cuando un rayo de luz, o bien la dirección de propagación de un frente de ondas, se encuentra con una superficie, la onda reflejada lo hará con un ángulo igual que el de la onda incidente, medido desde la perpendicular a la superficie donde se refleja la onda.

Tomando las magnitudes de la figura 15.5 esto se expresa simplemente como $\theta_i = \theta_r$.

## Refracción

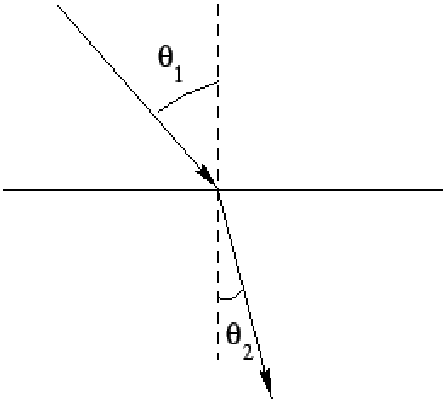


**Figure 15.7:** Refracción de una onda.

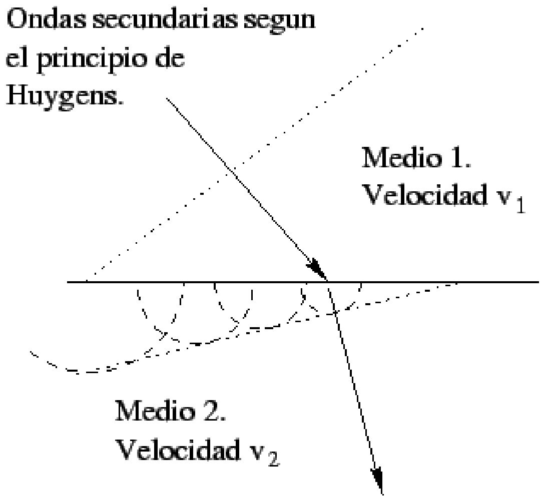


**Figure 15.8:** Explicación según el principio de Huygens de la refracción.

La ley de refracción nos ofrece el ángulo que adopta la propagación de la onda en el segundo medio, medido también respecto a la vertical a la superficie, como se indica en la figura 15.7. Además los rayos de incidencia, reflexión y refracción se encuentran siempre en el mismo plano. La ley que relaciona el ángulo de incidencia con el de refracción se conoce como ley de Snell, que es

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2,$$

donde $n_1$ y $n_2$ son dos constantes relacionadas con las características de cada medio y que se denominan índice de refracción. Este índice de refracción de un medio resulta ser

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

en donde $v$ es la velocidad de la luz en dicho medio. Se deduce por tanto que para luz en el vacío cuya velocidad es $c$ se tendrá que $n = 1$.

## Reflexión total

La ley de Snell es válida para pasar de un medio a otro cualquiera. Cuando tenemos que pasar de un medio 1 a otro 2 tal que $n_1 < n_2$ tendremos que $\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_1$ y como $\frac{n_1}{n_2} < 1$ no habrá ningún tipo de problema. Ahora bien, cuando tengamos que $n_1 > n_2$ entonces $\frac{n_1}{n_2} > 1$ y al tomar $\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_1$ existirá un ángulo $\theta_l = \arccos\frac{n_2}{n_1}$ tal que $\sin\theta_2 = 1$. ¿Qué pasará para ángulos $\theta_1 > \theta_l$?. Pues sucederá que para estos $\sin\theta_2 > 1$ y por tanto, nuestro problema *no tendrá solución real*.

El significado físico de este fenómeno nos dice lo siguiente: en estos casos existe una ángulo límite $\theta_l$ a partir del cual es imposible que se produzca el fenómeno de refracción y por tanto toda la luz que incida sobre esa superficie será reflejada. Por esta razón a este fenómeno se le conoce como reflexión total.

Un ejemplo práctico se puede observar cuando se bucea: a partir de cierto ángulo de inclinación en el cual miremos a la superficie del agua, veremos esta como un espejo, pero no podremos ver absolutamente nada de lo que hay por encima del agua.

# Principio de Fermat

Una forma muy elegante de entender estos fenómenos de reflexión y refracción, y que aún sigue siendo válida, es hacer uso del principio de Fermat. Dicho principio dice que la luz, para ir desde un punto $A$ hasta otro $B$ elige siempre un camino tal que el tiempo en recorrerle sea el mínimo (o, a veces el máximo). Es de notar que la ley afirma que es el *tiempo* el que es mínimo, no el espacio que recorre.

De esta forma en un mismo medio la luz viaja en línea recta, porque como la velocidad es constante entonces el tiempo mínimo lo logra con una distancia mínima, y ya se conoce que la recta es el camino más corto entre dos puntos.

En cuanto a la reflexión, resulta que si tenemos que ir de un punto $A$ a otro $B$ pero ``tocando un espejo'' por el camino, la forma más rápida en la cual lo haremos será logrando que el ángulo de incidencia sea igual al de refracción.

Por último para la refracción: si debemos ir de un punto $A$ en un medio donde uno se desplaza muy rápidamente (por ejemplo) a otro punto $B$ situado en un medio distinto y donde la velocidad de desplazamiento resulta muy lenta, nos resultará más favorable, para llegar antes, recorrer algo más de espacio donde la velocidad es más rápida para poder así ``atajar'' algo de espacio en el medio donde esta velocidad es lenta y recorrer allí menos. Como ejemplo basta pensar que a veces para ir de un sitio a otro preferimos tomar una autopista, aunque demos un ligero rodeo, que una carretera de tierra y piedras que vaya recta, sin poner en duda que aunque en la autopista recorremos más camino vamos a llegar antes.

Una explicación clara y amena de las leyes de refracción y reflexión gracias al principio de Fermat puede ser consultada por el lector en el [1] capítulo 26.

Ignacio Martin Bragado. ignacio.martin@tel.uva.es