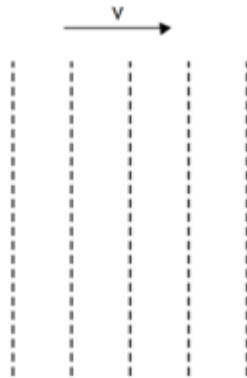


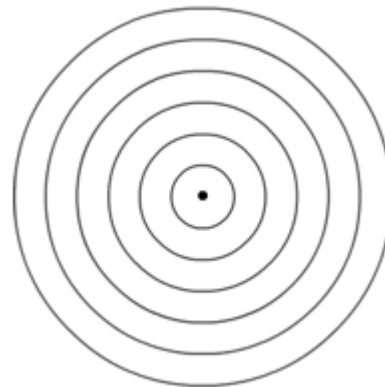
**Propagación de las ondas**  
**Fenómenos ondulatorios**

**IES La Magdalena.**  
**Avilés. Asturias**

Cuando se trata de visualizar la propagación de las ondas en un papel se recurre a pintar los llamados **frentes de onda**. Esto es, **líneas continuas que unen todos los puntos de la onda que están en fase**, por ejemplo las crestas. Se dibujan a continuación los frentes de una onda plana y otra circular:

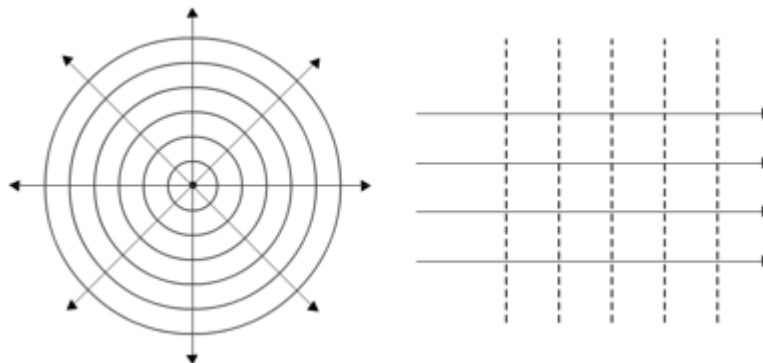


Frentes de ondas planas. Las líneas de puntos unen puntos de máxima amplitud (crestas)



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

También resulta muy cómodo (y muy visual) pintar **los rayos, unas líneas perpendiculares a los frentes de onda**.



Frentes de onda y rayos. El sentido de la propagación se indica con una flecha

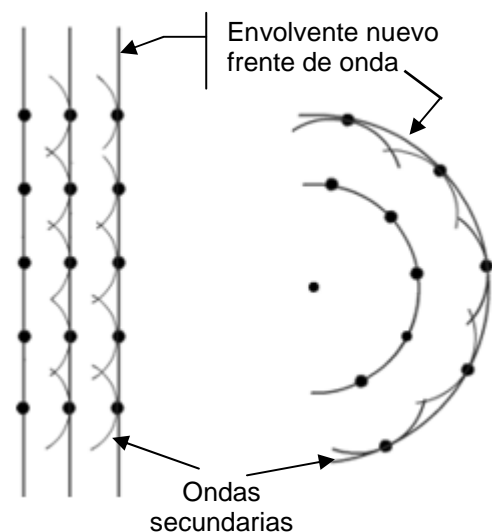
**Christian Huygens** (1629-1695) propuso hacia 1680 un método gráfico que permite obtener los frentes de onda sucesivos de una onda que se propaga.

Huygens consideraba que **cuando la perturbación que constituye la onda alcanza los puntos del medio, éstos se convierten en fuentes secundarias de ondas y se puede obtener el nuevo frente de ondas trazando la envolvente de las ondas secundarias emitidas (Principio de Huygens)**.

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

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

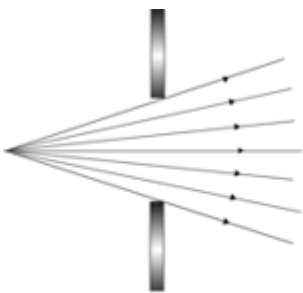
El modelo de Huygens fue perfeccionado posteriormente por Kirchhoff quien introdujo una descripción matemática más rigurosa.



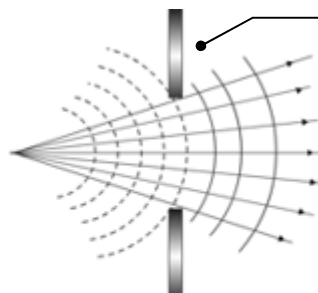
## Difracción de las ondas

**La difracción de las ondas constituye un fenómeno característico de éstas**, hasta el punto que fue usado como prueba de la naturaleza ondulatoria de los electrones.

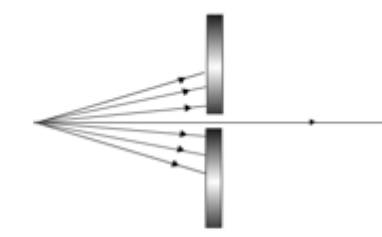
La difracción tiene lugar cuando las ondas que se propagan encuentran un obstáculo, por ejemplo un orificio, cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda de las ondas incidentes. Las ondas se propagan entonces como si el orificio se convirtiera en un nuevo centro emisor y penetran tras el orificio en lo que debería de ser una "zona de sombra" si su comportamiento fuera como el de un chorro de partículas. Según Huygens este comportamiento puede explicarse si suponemos que el propio orificio se convierte en una fuente secundaria de ondas.



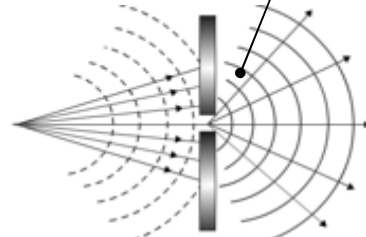
Chorro de partículas que inciden sobre una abertura



Ondas cuya longitud de onda es inferior al tamaño de la abertura



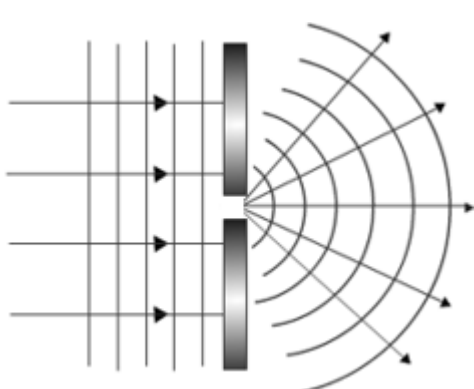
Chorro de partículas que inciden sobre una abertura



Ondas cuya longitud de onda es de tamaño comparable (o superior) al de la abertura

Si el orificio es mayor que la longitud de onda no hay difracción. Tras el obstáculo aparece una zona en la que no se propagan las ondas.

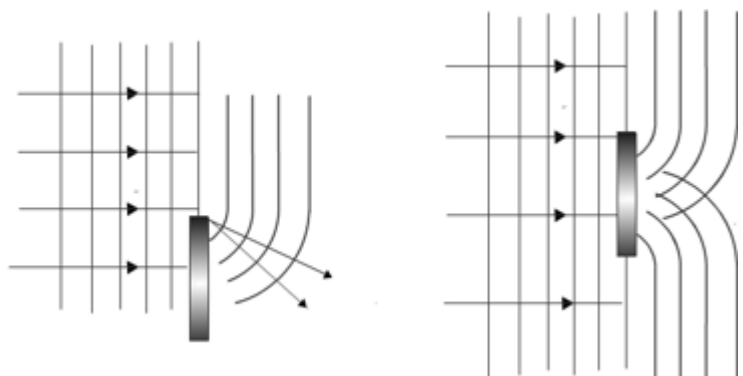
Si el orificio es de un tamaño similar a la longitud de onda (o menor) las ondas se difractan y se propagan detrás de él. Este fenómeno puede explicarse suponiendo que el orificio se convierte en una fuente secundaria de ondas (Principio de Huygens).



Si la onda incidente es plana la que emerge del orificio es una onda circular.

La onda difractada tiene la misma amplitud, frecuencia y longitud que la onda incidente.

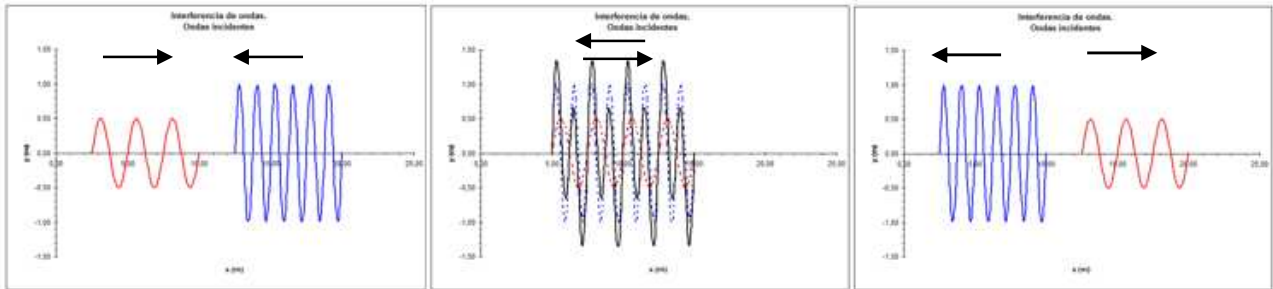
A la derecha se muestra la difracción de un onda por un obstáculo interpuesto en su trayectoria. Los frentes de onda se curvan en sus bordes según lo predicho por el Principio de Huygens.



# Interferencia

La interferencia entre dos ondas tiene lugar cuando ambas coinciden en una región del espacio al mismo tiempo. Cuando esto sucede ambas se suman (principio de superposición) produciendo una onda resultante **El fenómeno de la interferencia es algo característico del movimiento ondulatorio.**

La interferencia se produce únicamente en los puntos en que ambas ondas coinciden. Si, por ejemplo, ambas se desplazan en sentidos contrarios interferirán cuando se encuentren y después ambas ondas siguen su camino sin sufrir alteración.



A la izquierda: ondas propagándose en sentidos contrarios  
 En el centro: las ondas (líneas de puntos) coinciden produciéndose interferencia (resultante con línea llena)  
 Derecha: las ondas siguen su camino inalteradas

Matemáticamente la onda resultante se obtiene como suma de las ecuaciones de las ondas incidentes:

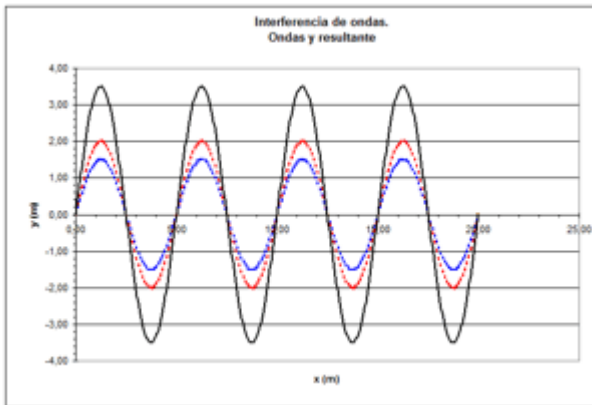
$$y_1 = A_1 \text{ sen } (k_1x \pm \omega_1t + \varphi_1)$$

$$y_2 = A_2 \text{ sen } (k_2x \pm \omega_2t + \varphi_2)$$

$$y = y_1 + y_2 = A_1 \text{ sen } (k_1x \pm \omega_1t + \varphi_1) + A_2 \text{ sen } (k_2x \pm \omega_2t + \varphi_2)$$

La onda resultante puede ser complicada (ver hoja de cálculo), aunque existen algunos casos sencillos que conviene tener en cuenta:

- Ondas con la misma frecuencia y longitud de onda (ondas coherentes)



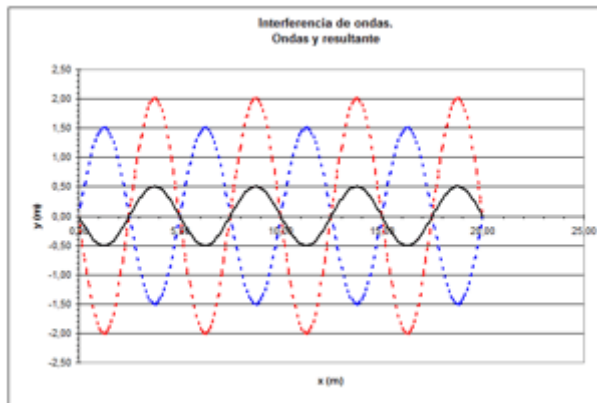
**Si la fase es idéntica se produce lo que se llama interferencia constructiva. Las amplitudes de ambas ondas se suman :  $A = A_1 + A_2$ . Esto sucede cuando la diferencia entre las fases sea:**

$$\Delta\varphi = 2n \pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

En la figura de la izquierda pueden verse dos ondas (líneas de puntos) con idéntica fase y distinta amplitud en interferencia constructiva. La resultante se indica con línea llena. Su amplitud es la suma de las amplitudes de las ondas.

Para la figura:  $y_1 = 1,50 \text{ sen } (1,26x - \pi t)$

$$y_2 = 2,00 \text{ sen } (1,26x - \pi t)$$



**Si las ondas están en oposición se produce lo que se llama interferencia destructiva. Las amplitudes de ambas ondas se restan :  $A = A_1 - A_2$ . Si  $A_1 = A_2$  la onda resultante tiene una amplitud nula (se produce la extinción). Esto sucede cuando la diferencia en fase sea:**

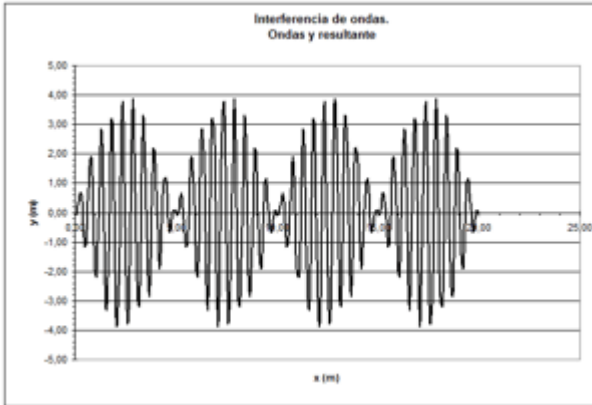
$$\Delta\varphi = (2n + 1) \pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

En la figura de la izquierda pueden verse las dos ondas anteriores (líneas de puntos), pero ahora con una diferencia de fase de  $\pi$  rad (interferencia destructiva).

• Ondas con distinta frecuencia y longitud de onda.

La onda resultante de la interferencia (tal y como se ha dicho más arriba) puede ser complicada.

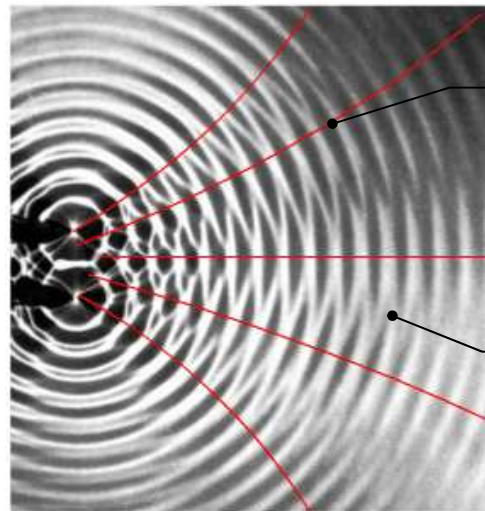
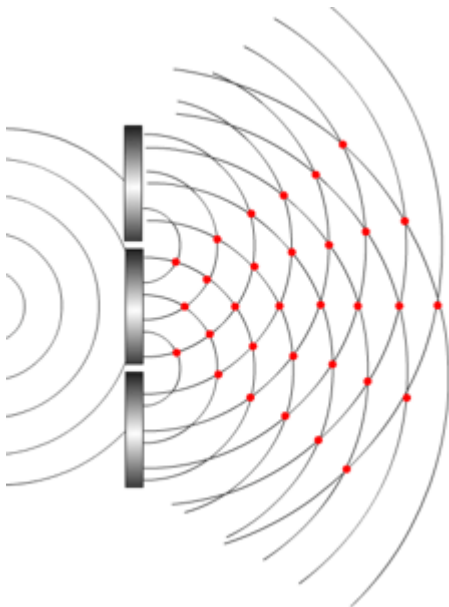
**Se produce un fenómeno curioso cuando interfieren ondas de frecuencia muy próximas.** Entonces la amplitud de la onda resultante varía periódicamente con el tiempo produciendo máximos y mínimos de amplitud que reciben el nombre de **pulsaciones**. Se dice que la amplitud está **modulada** (ondas AM)



En la figura de la izquierda se pueden observar las pulsaciones surgidas como consecuencia de la interferencia de dos ondas de idéntica amplitud que se propagan con velocidad de 10 m/s y cuyas frecuencias, muy próximas, son  $80 \text{ s}^{-1}$  y  $82 \text{ s}^{-1}$ .

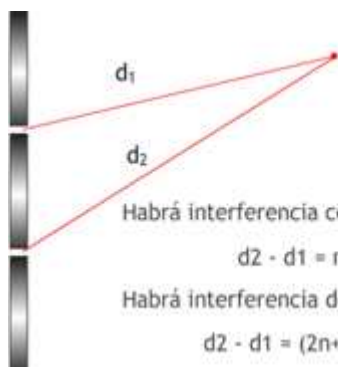
Las pulsaciones se pueden escuchar produciendo sonidos de frecuencias próximas. Se perciben entonces las subidas periódicas de volumen (relacionadas con la amplitud). Esto es un efecto que los músicos usan para afinar sus instrumentos. Si la frecuencia del instrumento no es la misma que la que se da como referencia para el afinado se escucharán batidos (pulsaciones) que desaparecen cuando las frecuencias se igualan. El instrumento estará entonces afinado.

Debajo se muestra el fenómeno de interferencia producido por una doble rendija. Cada rendija se convierte en un foco secundario de una ondas idénticas y ambas interfieren formando un patrón típico. Con puntos se señalan en el dibujo las zonas en las que existe interferencia constructiva (líneas ventrales). Entre ambas se sitúan las zonas de interferencia destructiva (líneas nodales). A la derecha se muestra una foto de una cubeta de ondas en la que se observa realmente el fenómeno. Se identifican fácilmente las líneas ventrales y nodales



Línea de interferencia constructiva (línea ventral)

Línea de interferencia destructiva (línea nodal)



Habrà interferencia constructiva si:

$$d_2 - d_1 = n \lambda$$

Habrà interferencia destructiva si:

$$d_2 - d_1 = (2n+1) \lambda/2$$

En este caso la interferencia se produce debido a la diferente distancia recorrida por las ondas procedentes de ambas rendijas.

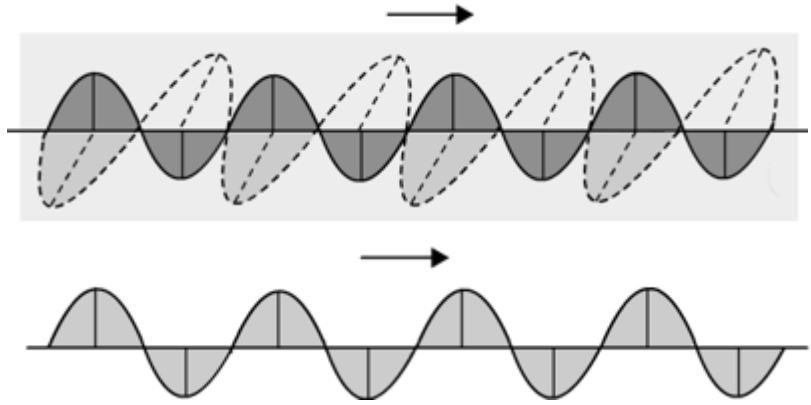
En las zonas en las que la diferencia de distancia recorrida es un múltiplo entero de longitudes de onda se produce interferencia constructiva. Las ondas llegan en fase.

En las zonas en las que la diferencia de distancia recorrida es un múltiplo de media longitud de onda se produce interferencia destructiva. Las ondas llegan en oposición.

**Polarización**

Muy frecuentemente el plano en el que se produce la perturbación en una onda transversal no es único y, entonces, las oscilaciones se localizan en varios planos.

Es posible, mediante algunos procedimientos (ver más abajo), "filtrar" la onda de forma que se seleccione **un único plano de oscilación**. La onda resultante se dice que **está polarizada ya que en ella la oscilación tiene lugar en un único plano**.

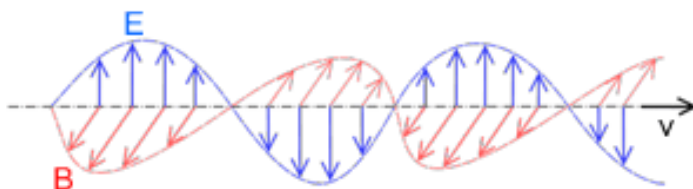


Arriba onda transversal en la que la perturbación transmitida se localiza en dos planos perpendiculares. No está polarizada.

Abajo onda transversal polarizada. La oscilación se produce sólo en el plano vertical.

**La polarización es una propiedad especialmente importante en el caso de ondas electromagnéticas.**

En las ondas electromagnéticas la perturbación que se propaga son campos eléctricos (E) y magnéticos (B) que forman entre sí 90°. El valor de estos campos en un punto oscila entre los valores máximo y mínimo.

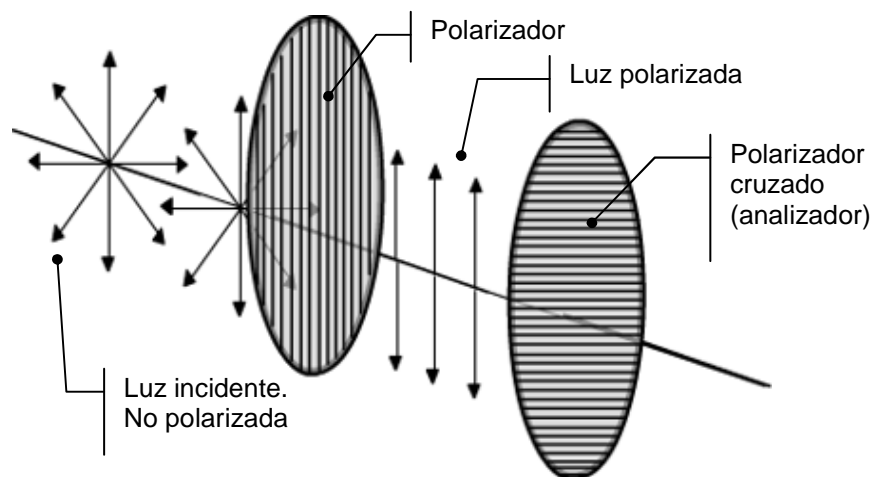


**Para fijar el plano de oscilación de la perturbación se toma como referencia el plano de oscilación del campo eléctrico.**

**En una onda electromagnética polarizada, por tanto, el plano de oscilación del campo eléctrico es siempre el mismo.**

Existen algunas sustancias, llamadas **polarizadores**, que cuando una onda electromagnética (por ejemplo la luz) las atraviesa sólo dejan pasar aquellas ondas en las que el plano de oscilación del campo eléctrico tiene una dirección determinada. La luz que emerge de la sustancia estará polarizada.

Si a continuación se sitúa otro polarizador cruzado (que forme 90° con el primero) la luz no pasará, demostrando la polarización de la luz incidente sobre él.



Otras sustancias, por ejemplo la glucosa, tienen la propiedad de que cuando se hace pasar luz polarizada a través de ellas son capaces de girar el plano de polarización de la luz. Estas sustancias se dice que son **ópticamente activas**, y la desviación del plano de polarización permite clasificarlas en **sustancias dextrógiras** si desvían el plano de polarización hacia la derecha o **levógiras** si lo desvían hacia la izquierda.



## Efecto Doppler

El llamado **efecto Doppler** (en honor del matemático austriaco Andreas Doppler, que lo descubrió en 1842) **consiste en el cambio de frecuencia percibido por un observador cuando se mueve respecto de la fuente que emite las ondas**. La explicación cualitativa del efecto puede verse en la figura situada bajo este párrafo en el que se supone que la onda es el sonido emitido por el megáfono.

Cuando la fuente se acerca al observador en reposo (el efecto sería el mismo si es el observador el que se acerca a la fuente) los frentes de onda emitidos aparecen llegan al observador más juntos como consecuencia del movimiento y éste **percibe un sonido de mayor frecuencia que la realmente emitida**.

El efecto contrario se observa cuando el observador y la fuente se alejan el uno del otro. **El observador percibe un sonido de menor frecuencia que el emitido**

### Efecto Doppler

$$f_o = f \frac{V - V_o}{V - V_F}$$

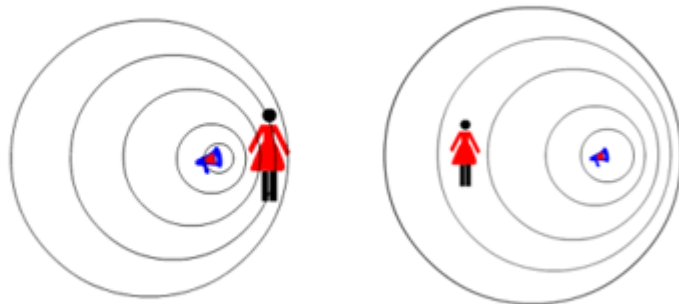
$f_o$  = Frecuencia percibida por el observador

$f$  = Frecuencia de la onda

$V$  = Velocidad de propagación de la onda

$V_o$  = Velocidad del observador

$V_F$  = Velocidad de la fuente emisora



La ecuación que aparece junto a la figura permite calcular la frecuencia percibida por el observador.

#### Ejemplo 1

Si el megáfono emite un sonido de 440 Hz (La) y se aproxima al observador a una velocidad de 40 m/s ¿Cuál será la frecuencia percibida por éste?

**Solución:**

Tomando como velocidad del sonido 340 m/s y considerando el origen situado en el observador y positivo hacia la derecha:

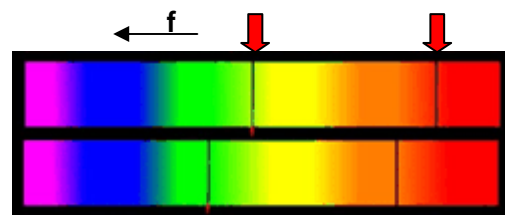
$$f = 440 \text{ Hz} ; v = 340 \text{ m/s} ; v_o = 0 ; v_F = 40 \text{ m/s}$$

$$f_o = 440 \text{ Hz} \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0}{(340 - 40) \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 498,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El observador percibe una frecuencia que es prácticamente un Si

El efecto Doppler permitió a **Edwin Hubble** en 1929 afirmar que las galaxias no estaban quietas y la mayoría se movían alejándose de nosotros con una velocidad directamente proporcional a la distancia que nos separa de ellas. **El universo no es estático.**

**Hubble llegó a esta conclusión estudiando el espectro de la luz proveniente de las galaxias.** Analizando dichos espectros observó que algunas líneas conocidas aparecían a una frecuencia menor de la esperada (mostraban un "**corrimiento hacia el rojo**"), lo que significaba, según el efecto Doppler, que la fuente emisora (la galaxia) se aleja de nosotros.



Conociendo el valor del incremento de la frecuencia correspondiente puede establecerse la velocidad con que se alejan. Hubble dedujo que esta velocidad (velocidad de recesión) era proporcional a la distancia. Esto es, cuanto más lejos está una galaxia, más rápidamente se aleja de nosotros.

Imagen en la que se observa el corrimiento hacia el rojo (imagen superior) de las líneas espectrales