

Unità didattica 7

•Onde

| | | | |
|---|----|---|-----------|
| •Il suono..... | 2 | Combinazione di oscillazioni..... | 15 |
| •Grandezze fisiche | 3 | <i>Uguale frequenza e uguale direzione di oscillazione</i> | <i>16</i> |
| •Velocità del suono..... | 4 | <i>Frequenza quasi uguale e uguale direzione di oscillazione ..</i> | <i>17</i> |
| •Intensità del suono..... | 5 | •Onde sferiche..... | 18 |
| •La percezione del suono, | 6 | •Principio di Huygens..... | 19 |
| •Soglia di udibilità..... | 7 | •Riflessione, rifrazione e diffrazione | 20 |
| •L'organo vocale umano..... | 8 | <i>Riflessione delle onde.....</i> | <i>21</i> |
| •Un'esempio di fonte sonora: l'altoparlante..... | 9 | <i>Rifrazione delle onde.....</i> | <i>22</i> |
| •Onde..... | 10 | <i>Diffrazione delle onde,</i> | <i>23</i> |
| •Tipi di moto di onde..... | 11 | •Diffrazione da una singola fenditura | 24 |
| •Propagazione di un'onda lungo una corda..... | 12 | •Effetto Doppler..... | 25 |
| •Lunghezza d'onda, frequenza e velocità | 13 | <i>Effetto Doppler: osservatore in movimento</i> | <i>26</i> |
| •Metodo vettoriale per la composizione delle onde | 14 | <i>Effetto Doppler: sorgente in movimento.....</i> | <i>27</i> |

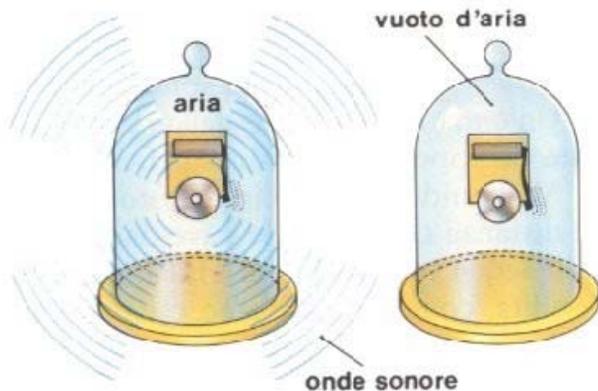
Il suono

Il suono può essere definito come la sensazione suscitata dai fenomeni che stimolano il “senso dell’udito“. Dal punto di vista fisico il suono è un’onda elastica longitudinale che si propaga in un mezzo quale un gas, un liquido, un solido.

La caratteristica fisica che produce il suono è la vibrazione del mezzo, ossia l’oscillazione di ogni particella in vibrazione attorno ad una sua posizione media fissa.

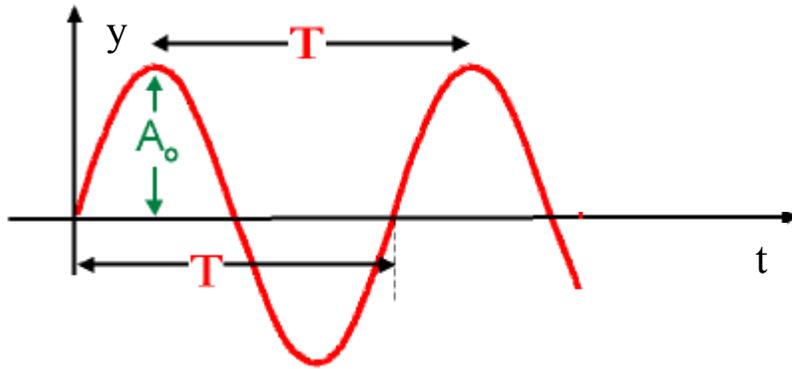
Nel caso dell’aria, attorno alla sorgente, ad esempio un martello che picchia su un incudine, si formano una serie di stati di alta e bassa pressione.

Vibrando, l’oggetto (sorgente) crea un flusso continuo di alta e bassa pressione, formando un andamento periodico e di tipo ondoso.



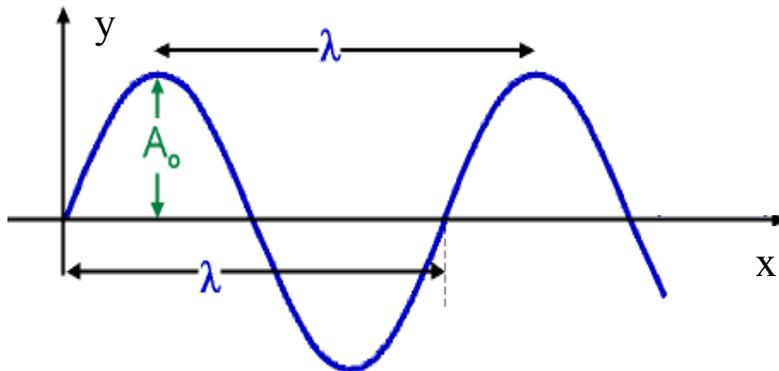
Rappresentazione schematica di come il suono si propaga solo in presenza di un mezzo.

Grandezze fisiche



t = Tempo

y = Spostamento della particella



x = distanza

y = spostamento della particella

Periodo T : E' l'intervallo di tempo necessario per compiere una vibrazione completa. Si misura in secondi

Frequenza f : E' il numero di vibrazioni complete che avvengono in un secondo. Si misura in hertz (Hz). Il "range" di udibilità dell'orecchio umano è compreso tra i 20 e i 20000 Hz.

Lunghezza d'onda λ : E' la distanza percorsa dall'onda in un periodo.

Perciò, se " v " è la velocità di propagazione , $\lambda = v \cdot T$ oppure $\lambda = v / f$. Si misura in metri (m).

Ampiezza A_0 : lo spostamento massimo delle molecole d'aria che oscillano intorno alla posizione di equilibrio al passaggio della perturbazione acustica.

Velocità del suono

Velocità del suono: è la velocità con cui il suono si propaga nel mezzo attraversato e dipende sia dalla densità del mezzo che dalle proprietà elastiche e si può esprimere come

$$c = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

In aerodinamica si dice che un aereo supera **il muro o la barriera del suono** quando, raggiunta la velocità di 1000 chilometri orari, produce il caratteristico bang.

| SOSTANZA | v (m/s) |
|--------------------|---------|
| Aria | 344 |
| Anidride Carbonica | 259 |
| Alcool Etilico | 1207 |
| Acqua | 1498 |
| Rame | 3750 |
| Ferro | 5120 |
| Vetro | 5170 |



Intensità del suono

Intensità del suono: L' intensita' (I) e' definita come il flusso medio di energia che, nell' unita' di tempo, attraversa un superficie di area unitaria disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione.

E' la grandezza che permette di distinguere i suoni deboli da quelli forti.

L'intensità si misura in dB (decibel)

Energia cinetica di una particella oscillante

$$I = \frac{E}{\text{volume}} \quad c = m \frac{v_0^2}{2V} = \frac{\rho c v_0^2}{2}$$

Densità del mezzo = m/V

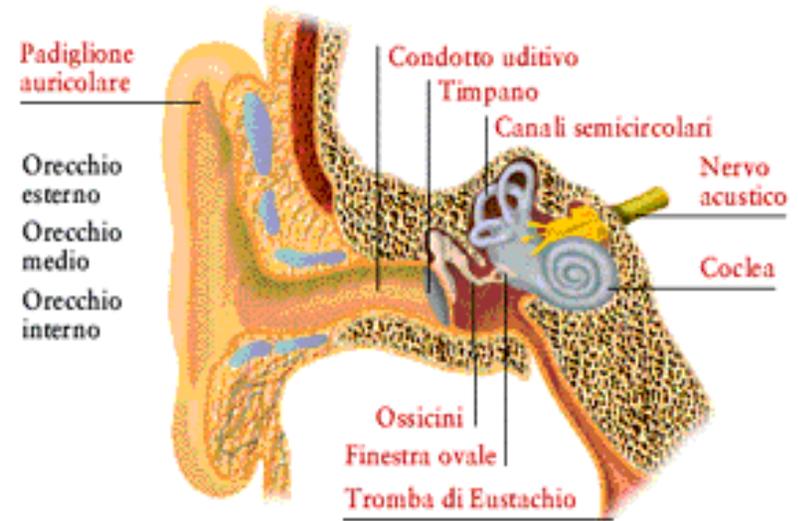


La percezione del suono

L'organo del senso dell'udito é l' orecchio ed agisce come una interfaccia tra il mondo esterno ed il cervello, passando i messaggi ricevuti al sistema neuronale, che li interpreta come sensazioni.

L'orecchio esterno, costituito dal padiglione auricolare e dal condotto uditivo, riceve e incanala i suoni dell'ambiente in direzione della membrana timpanica. I suoni, che definiremo onde sonore, giungono al timpano, membrana simile alla pelle di un tamburo, e lo fanno vibrare.

Tali vibrazioni vengono trasmesse dapprima alla catena degli ossicini (denominati martello, incudine, staffa) situati nella cavità dell'*orecchio medio*, poi all'*orecchio interno*. Nell'orecchio interno c'è un organo importantissimo a forma di chiocciola: la *coclea*. E' qui che le vibrazioni sonore sono trasformate in impulsi elettrici che vengono inviati al cervello tramite il nervo acustico. Solo quando il segnale elettrico arriva al cervello noi sentiamo e siamo in grado di apprezzare i caratteri dei suoni: la frequenza grave o acuta, l'intensità debole o forte, il timbro piacevole o sgradevole.



Soglia di udibilità

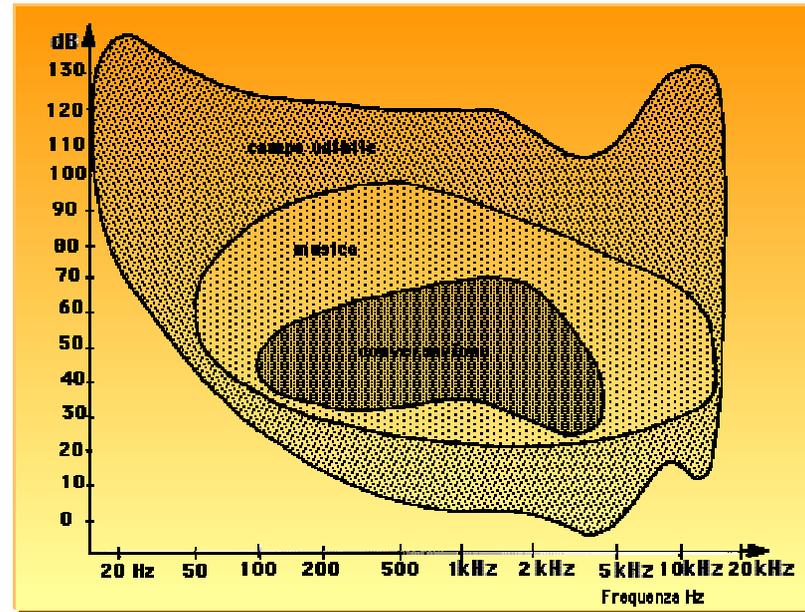
La soglia di udibilità e' l'intensità del campo sonoro minima percepibile dall'orecchio umano.

Come si può notare la sensibilità dell'orecchio umano varia profondamente al variare della frequenza e si estende da circa 16-20 Hz a 16-20 kHz.

La linea che delimita inferiormente la superficie relativa all'intero campo sonoro rappresenta la soglia di udibilità media umana, (i suoni che giacciono al di sotto di questa linea non sono mediamente percepibili). La linea che delimita la stessa superficie superiormente rappresenta la soglia del dolore, cioè i suoni che appartengono ad essa provocano una sensazione di dolore mentre quelli al di sopra provocano danni permanenti all'organo auditivo.

Agli estremi sinistro (16-20 Hz) e destro (16-20 kHz) le due linee si fondono in una sola, vale a dire che i suoni che si trovano in quella posizione provocano dolore quando raggiungono un'intensità sufficiente per essere uditi. Il campo dei suoni considerati musicali è quindi costituito da suoni relativamente lontani dagli estremi del campo auditivo.

Il campo centrale si riferisce ai suoni che riguardano l'uso della parola, che si colloca nella zona dove le capacità di analisi dell'orecchio sono maggiori.



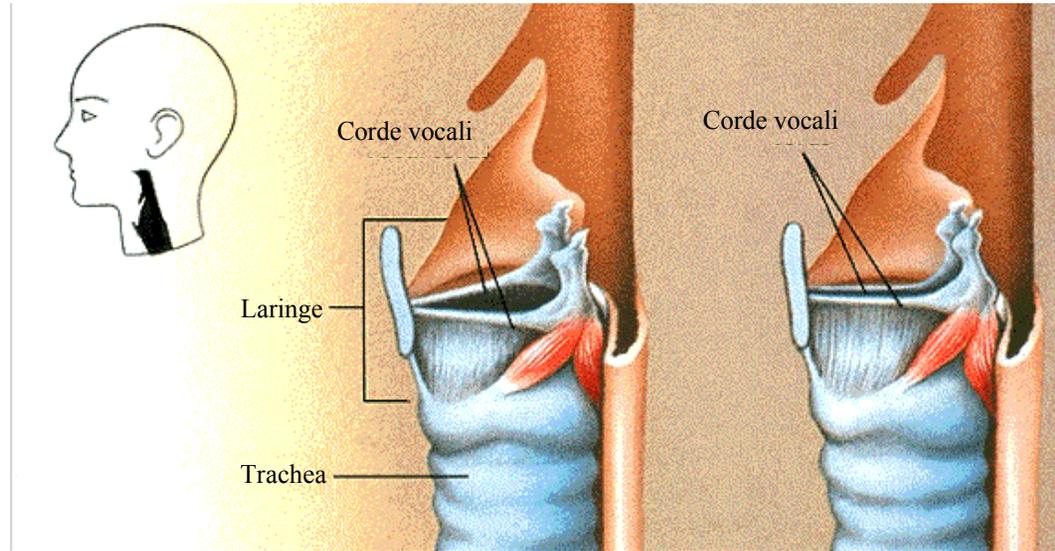
L'organo vocale umano

L'organo vocale umano è formato essenzialmente dalla **laringe** per la produzione delle vibrazioni e dalla bocca, dalla **gola** e dalla **faringe** che selezionano parte delle vibrazioni prodotte e ne attenuano altre.

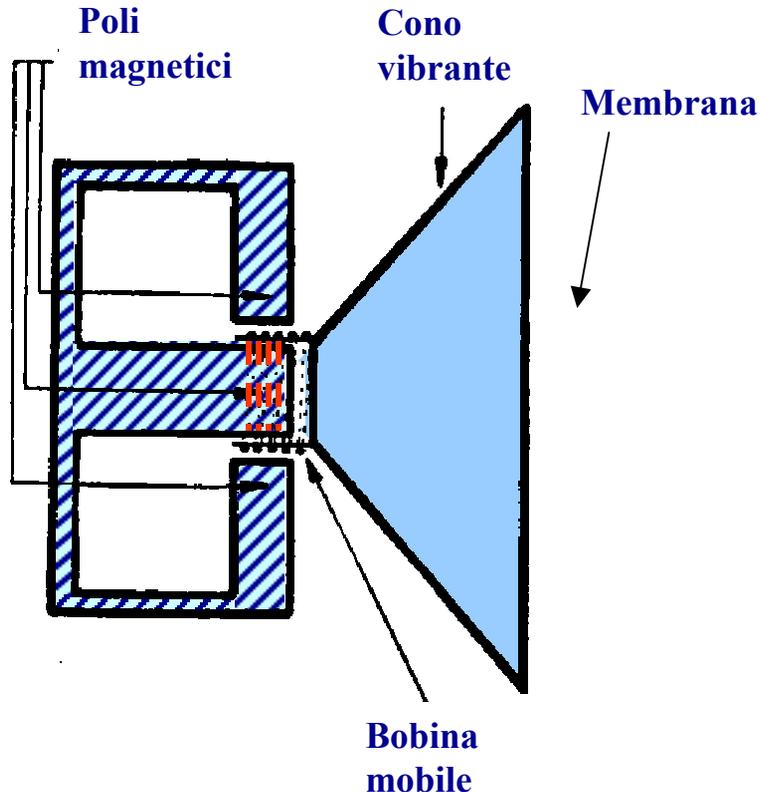
Quando parliamo, l'aria viene pressata dalla glottide della laringe formata da due parti elastiche che vengono ravvicinate l'una contro l'altra.

A causa di queste forze elastiche, la via dell'aria viene in un primo momento bloccata. In questo modo si crea una pressione che allontana le corde vocali fra loro producendo un flusso d'aria. Per effetto del flusso d'aria, attraverso il restringimento si crea una depressione, che richiude le corde vocali e tutto ricomincia da capo.

La bocca la gola e la faringe costituiscono un sistema di risonanza. La vibrazione prodotta dalle corde vocali produce nelle cavità una risonanza. In questo modo si formano, per le frequenze a cui è possibile una risonanza, ampiezze di oscillazione molto alte. Il sistema di risonanza amplifica determinate frequenze delle oscillazioni ricche di toni alti delle corde vocali.



Un'esempio di fonte sonora: l'altoparlante



Gli altoparlanti sono costituiti essenzialmente da una membrana molto sottile e flessibile alla quale è fissata, una bobina che si trova nel campo magnetico di un magnete permanente.

Quando la bobina viene attraversata da una corrente elettrica alternata, su di essa all'interno del campo magnetico agisce una forza che attrae la bobina a seconda della direzione della corrente o verso destra o verso sinistra facendo quindi vibrare la membrana.

Questi movimenti della membrana creano variazioni di pressione nell'aria circostante che si diffondono sotto forma di suono dall'altoparlante

Onde

Molti dei fenomeni che noi vediamo attorno a noi sono in realtà onde.

Spesso cose che crediamo essere completamente diverse sono in realtà così simili da poter essere descritte quasi nello stesso modo.

Le onde si possono dividere essenzialmente in 2 gruppi:

Onde meccaniche quali ad esempio: onde d'acqua, onde sonore, onde su corde, su membrane, che vengono provocate dal moto oscillatorio delle particelle



Onde elettromagnetiche quali ad esempio: onde radio, radiazione termica, raggi X, luce che sono caratterizzate da oscillazioni del campo magnetico.

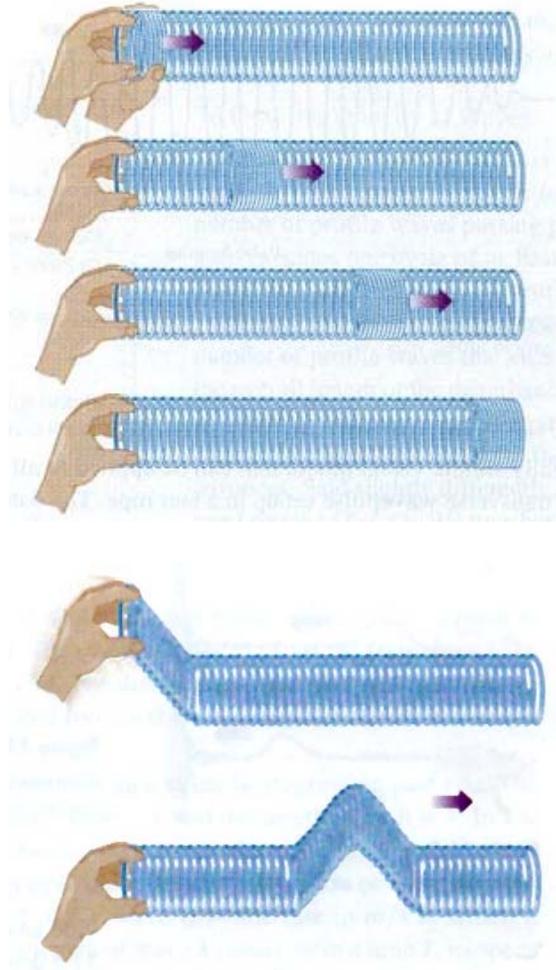


Tipi di moti di onde

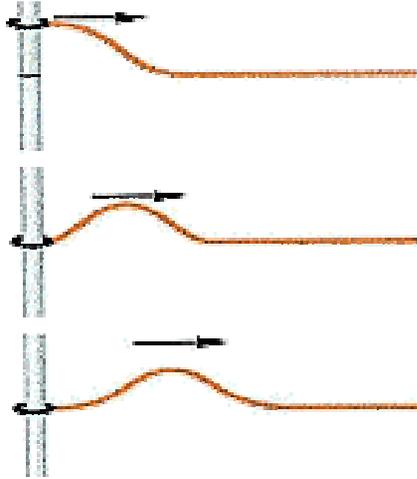
Le onde piane si dicono **trasversali** o **longitudinali** a seconda che la direzione di oscillazione sia parallela o perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione.

Un'onda longitudinale può essere solo meccanica: essa risulta infatti da successive compressioni (stati di densità e pressione massimi) e rarefazioni (stati di densità e pressione minimi) del mezzo. Le onde sonore ne sono un esempio tipico.

Esempi di onde trasversali sono invece quelle che si propagano ad esempio lungo una corda tesa



Propagazione di un'onda lungo una corda



Se facciamo oscillare un'estremità della corda, produciamo una semionda che si propaga per tutta la sua lunghezza .

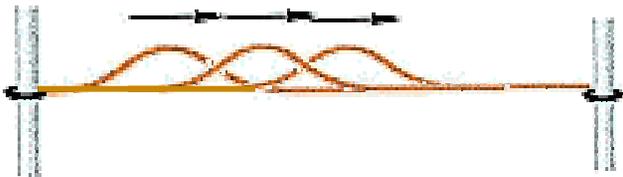
La velocità di propagazione è data da:

$$c = \sqrt{\frac{F}{\rho A}}$$

dove F è la forza con cui è tesa la corda

ρ è la densità

A è la sezione



Se fissiamo la corda ad una seconda estremità otteniamo un'onda progressiva, in cui parti vicine di corde effettuano le stesse oscillazioni in tempi diversi.

Possiamo caratterizzare il regime oscillatorio di un tale moto con

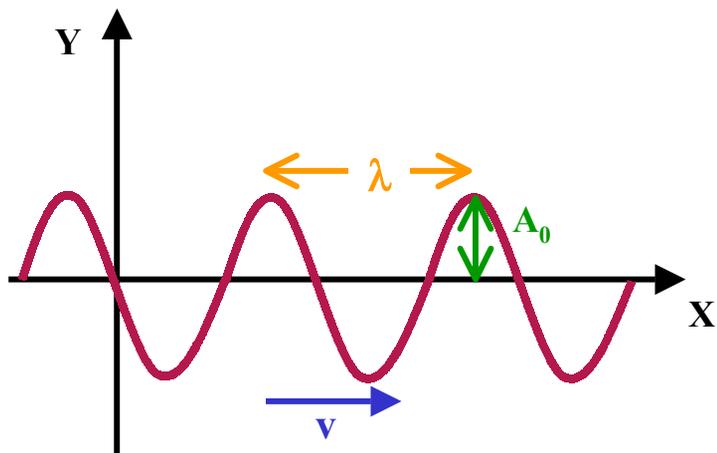
$$y = A_0 \sin k(x - vt) = A_0 \sin(kx - \omega t)$$

k = numero d'onda

A_0 = ampiezza

$\omega = kv =$ pulsazione

Lunghezza d'onda, frequenza e velocità



$$y(x,t) = A_0 \sin k(x-vt) = A_0 \sin(kx - \omega t)$$

$y(x,t)$ rappresenta lo spostamento della corda nella posizione x e nell'istante t

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Il numero d'onda k è 2π volte il numero d'onde nell'unità di lunghezza

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

La frequenza è l'inverso del periodo

$$\lambda = \frac{vt}{N} = \frac{vt}{ft} = \frac{v}{f}$$

Se supponiamo di far vibrare la corda con la frequenza f per un tempo t , in questo intervallo di tempo il numero di onde generato è $N = f t$. La prima onda generata percorre una distanza vt . Il rapporto fra questa distanza e il numero di onde contenute in questa distanza è la lunghezza d'onda λ

Metodo vettoriale per la composizione delle onde

Il metodo vettoriale permette di trovare geometricamente la somma di due o più onde armoniche senza dover ricorrere alla trigonometria.

Siano

$$y_1 = A_1 \text{sen} \theta$$

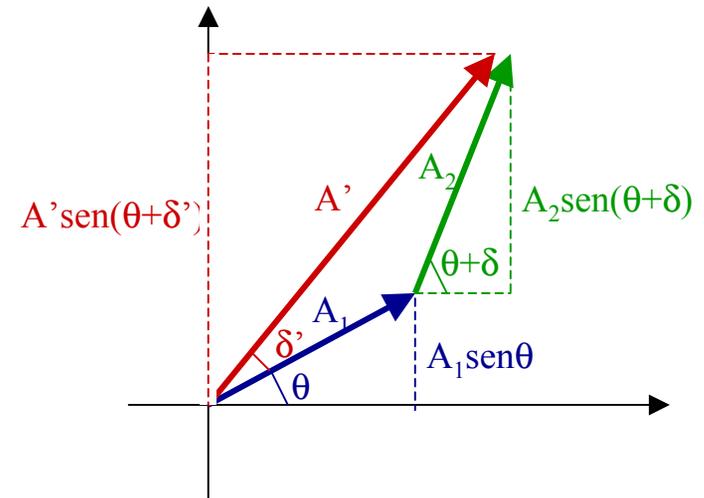
con $\theta = kx - \omega t$

$$y_2 = A_2 \text{sen} (\theta + \delta)$$

Il problema consiste nel trovare la somma: $y_1 + y_2 = A_1 \text{sen} \theta + A_2 \text{sen} (\theta + \delta)$

Si consideri un vettore di modulo A_1 che forma un angolo θ con l'asse x . La componente lungo y di questo vettore è $A_1 \text{sen} \theta$ che è la funzione d'onda y_1 . Analogamente y_2 è la componente y di un vettore di modulo A_2 che forma un angolo $(\theta + \delta)$ con l'asse x . Per le regole di composizione dei vettori, la somma di questa componenti è uguale alla componente y del vettore risultante.

$$A_1 \text{sen} \theta + A_2 \text{sen} (\theta + \delta) = A' \text{sen} (\theta + \delta')$$



Combinazione di oscillazioni

Consideriamo la combinazione di oscillazioni il cui moto segue la stessa direzione.

Esistono 3 situazioni diverse a seconda della reciproca relazione delle loro frequenze

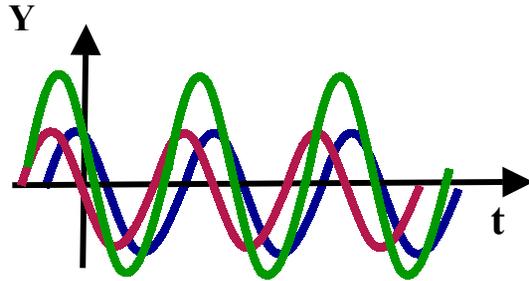
1. Uguale frequenza e uguale direzione di oscillazione

2. Frequenze quasi uguali e uguale direzione di oscillazione

3. Frequenze diverse e uguale direzione di oscillazione

Analizziamo in dettaglio i primi 2 casi, in quanto il terzo è un approfondimento di questi

1. Uguale frequenza e uguale direzione di oscillazione



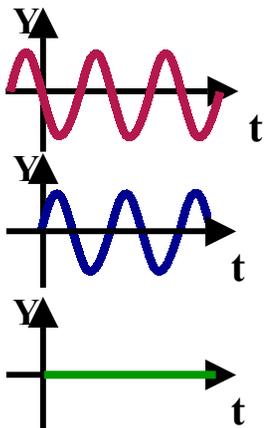
- $y_1 = A_0 \text{sen}(kx - \omega t)$
- $y_2 = A_0 \text{sen}(kx - \omega t + \delta)$
- $y_3 = A_0 \text{sen}(kx - \omega t) + A_0 \text{sen}(kx - \omega t + \delta)$



$$y_3 = 2A_0 \cos \frac{1}{2} \delta \text{sen} \left(kx - \omega t + \frac{1}{2} \delta \right)$$

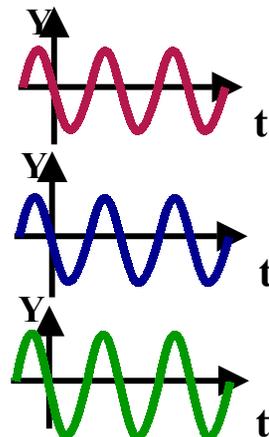
Per il principio di sovrapposizione, l'onda risultante di due onde sfasate di una quantità δ è la somma algebrica delle 2

INTERFERENZA COSTRUTTIVA



Oscillazioni sfasate di 180° : nel punto in cui la prima oscillazione raggiunge il massimo, la seconda raggiunge il minimo. La somma delle 2 è sempre zero

INTERFERENZA DISTRUTTIVA



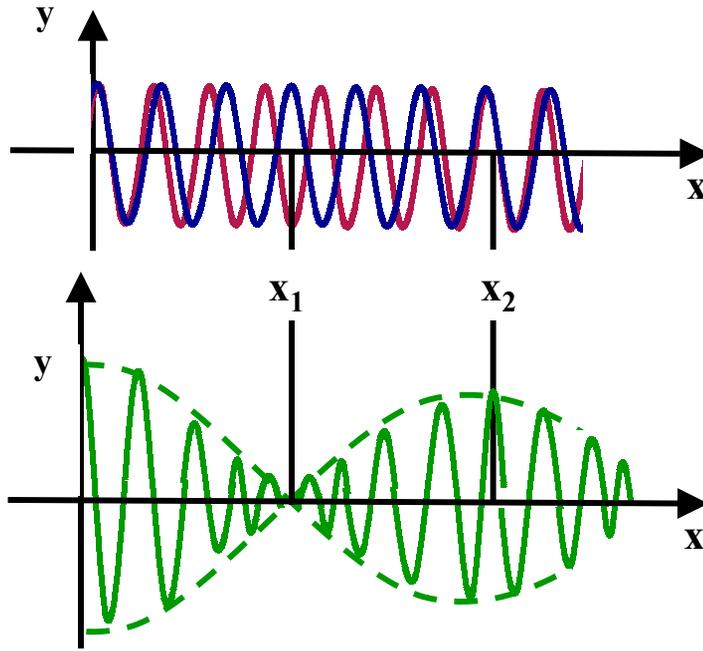
$$y = A_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

$$y = A_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

$$y = 2A_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

Oscillazioni in fase: entrambe raggiungono contemporaneamente il massimo, il minimo

1. Frequenza quasi uguale e uguale direzione di oscillazione



— $y_1 = A_0 \cos(k_1 x - \omega_1 t)$

— $y_2 = A_0 \cos(k_2 x - \omega_2 t)$

— $y_3 = y_1 + y_2 = A_0 \cos(k_1 x - \omega_1 t) + A_0 \cos(k_2 x - \omega_2 t)$

Con

$$\Delta k = k_2 - k_1$$

$$\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1$$

$$k_m = (k_2 + k_1)/2$$

$$\omega_m = (\omega_2 + \omega_1)/2$$

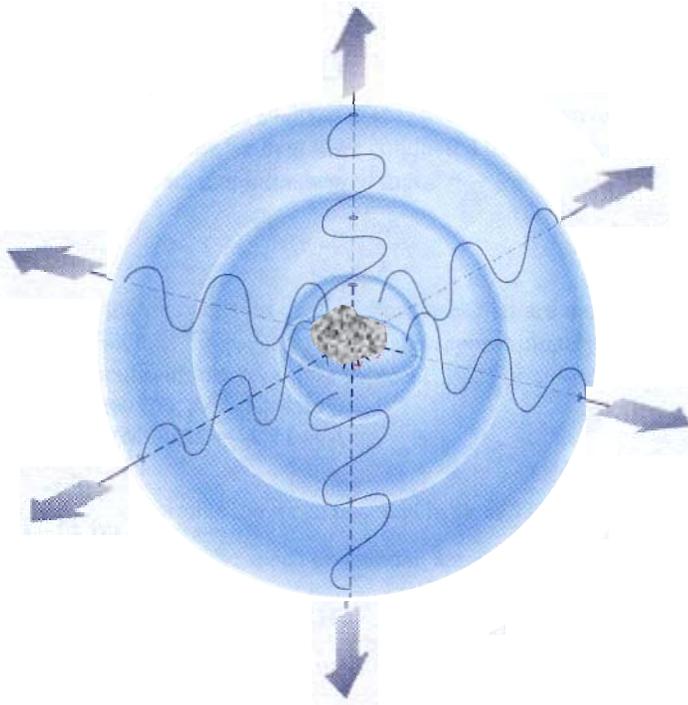
E sviluppando $\cos A + \cos B = 2 \cos(A - B)/2 \cos(A + B)/2$

L'onda risultante ha circa la stessa frequenza e lunghezza d'onda delle onde iniziali, ma un'ampiezza che è modulata secondo il fattore

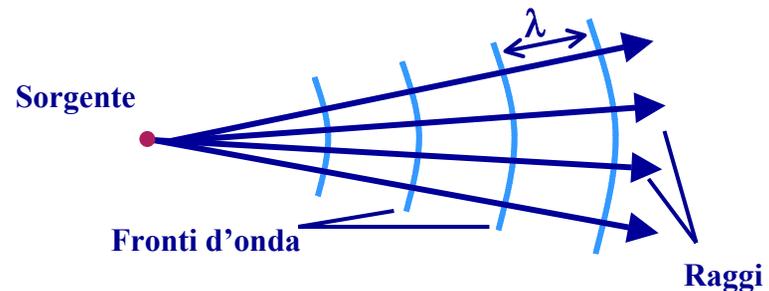
$$y_3 = 2A_0 \cos\left(\frac{1}{2} \Delta k x - \frac{1}{2} \Delta \omega t\right) \cos(k_m x - \omega_m t)$$

Onde sferiche

Fino ad ora abbiamo analizzato sempre e solo un'onda che si propaga lungo una retta in una direzione. Ci sono casi (ad esempio un sasso lanciato nell'acqua) in cui le onde si propagano in modo regolare in tutte le direzioni. In questo caso si parla di onde sferiche.



Nella propagazione dell'onda sferica nello spazio, i massimi e i minimi si trovano su superfici chiamate fronti d'onda. La direzione di propagazione (raggio) è radiale verso l'esterno perpendicolarmente a detti fronti d'onda.

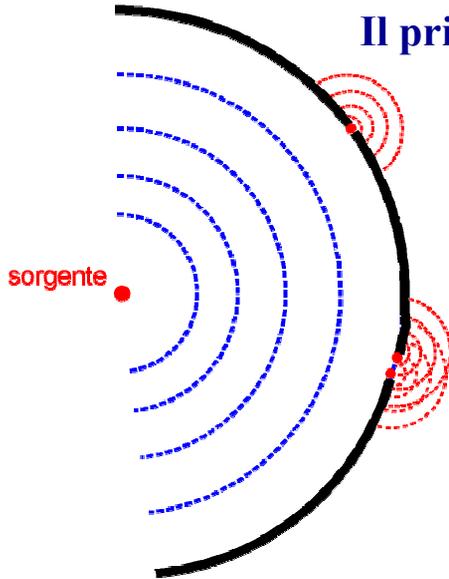


Principio di Huygens

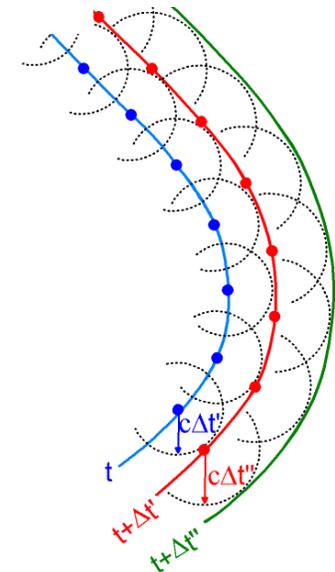
Il principio di Huygens ha validità generale e vale per tutti i tipi di onde

Ogni punto di un fronte d'onda, ad un certo istante t , può essere considerato come sorgente (puntiforme) di onde sferiche secondarie.

Il fronte d'onda a un istante successivo t' è costituito dall'involuppo dei fronti d'onda delle onde secondarie



Dopo l'intervallo di tempo $\Delta t'$ le onde sferiche che si propagano con velocità c hanno raggio $c \Delta t'$. L'involuppo di tutte le onde sferiche è ancora un fronte d'onda a distanza $c \Delta t'$ dal fronte d'onda originario.



Riflessione, rifrazione e diffrazione

Il principio di Huygens permette di spiegare i fenomeni legati alla propagazione delle onde quali riflessione, rifrazione e diffrazione e di ricavarne le leggi che ne regolano il comportamento

La riflessione



$$\vartheta_i = \vartheta_r$$

L'angolo di incidenza e di riflessione sono uguali

La rifrazione



$$\frac{\sin \vartheta_1}{v_1} = \frac{\sin \vartheta_2}{v_2}$$

Il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e di rifrazione è direttamente proporzionale alle velocità di propagazione

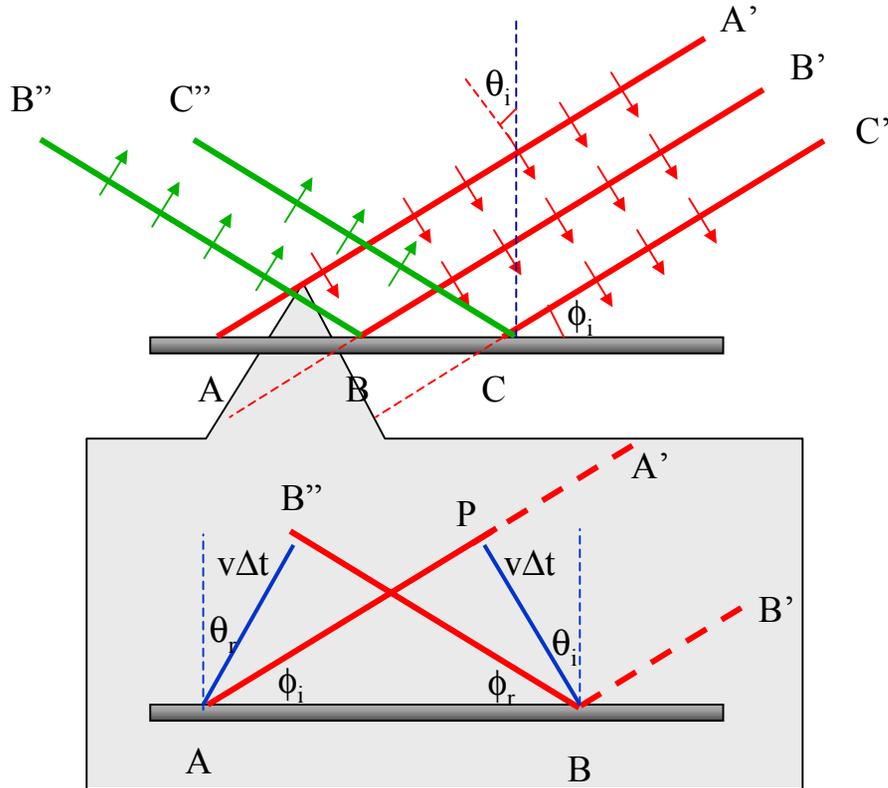
La diffrazione



$$a \sin \vartheta = m \lambda$$

Angoli che soddisfano questa relazione l'intensità dell'onda rifratta è nulla

Riflessione delle onde

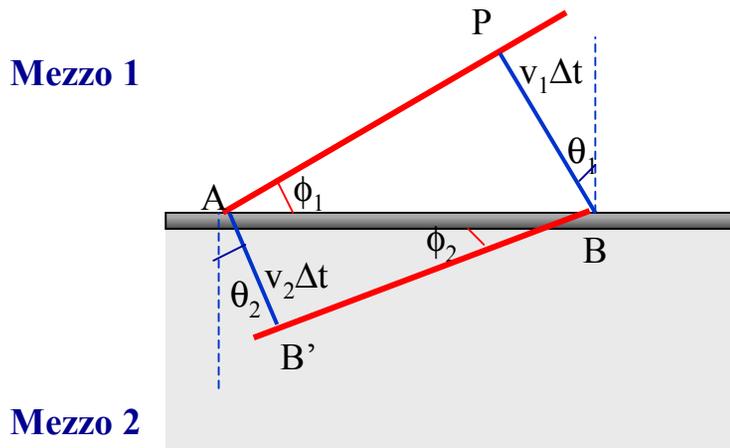


Consideriamo un fronte d'onda piano AA' che incide su un ostacolo nel punto A . L'angolo θ_i tra il raggio corrispondente a questo fronte d'onda e la normale all'ostacolo è chiamato angolo di incidenza. La posizione del fronte d'onda dopo un intervallo di tempo Δt si può trovare attraverso il principio di Huygens costruendo onde elementari di raggio $v \Delta t$ con centri sul fronte d'onda AA' . Le onde elementari che non colpiscono l'ostacolo formano la parete BB' del nuovo fronte d'onda. Le onde elementari che colpiscono l'ostacolo si riflettono e formano la parete BB'' del nuovo fronte d'onda. Con una costruzione simile si ottiene il fronte d'onda $C''CC'$ dalle onde che si originano sul fronte d'onda $B''BB'$. In particolare ingrandendo la figura:

Una parte del fronte d'onda AA' incide sull'ostacolo nell'intervallo di tempo Δt . In questo intervallo l'onda proveniente da P raggiunge l'ostacolo nel punto B , e l'onda proveniente da A raggiunge il punto B'' . Il fronte d'onda riflesso forma con l'ostacolo un angolo θ_r , uguale all'angolo di riflessione θ_r tra il raggio riflesso e la normale all'ostacolo. I triangoli ABP e BAB'' sono congruenti e gli angoli ϕ_i e ϕ_r sono uguali

$$\mathcal{I}_i = \mathcal{I}_r$$

Rifrazione delle onde



Consideriamo AP porzione di un fronte d'onda nel mezzo 1 sotto un angolo di incidenza θ_1 , che interseca nel punto A la superficie di separazione di due mezzi.

Nell'intervallo di tempo Δt l'onda elementare proveniente da P percorre la distanza $v_1\Delta t$ e raggiunge il punto B sulla linea AB che separa i due mezzi, mentre l'onda elementare proveniente dal punto A percorre la distanza $v_2\Delta t$ nel secondo mezzo. Il nuovo fronte d'onda BB' non è parallelo al fronte d'onda iniziale AP perchè le velocità v_1 e v_2 sono diverse. Dal triangolo APB

si ha: $\text{sen } \phi_1 = v_1 \Delta t / AB$

$$AB = v_1 \Delta t / \text{sen } \phi_1 = v_1 \Delta t / \text{sen } \theta_1$$

Analogamente dal triangolo AB'B si ha:

$$\text{sen } \phi_2 = v_2 \Delta t / AB$$

$$AB = v_2 \Delta t / \text{sen } \phi_2 = v_2 \Delta t / \text{sen } \theta_2$$

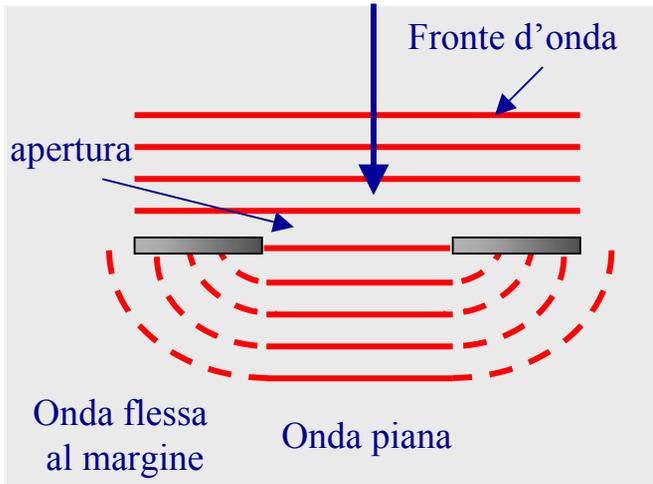
Dove $\phi_2 = \theta_2$ è l'angolo di rifrazione

Uguagliando le due espressioni si ottiene

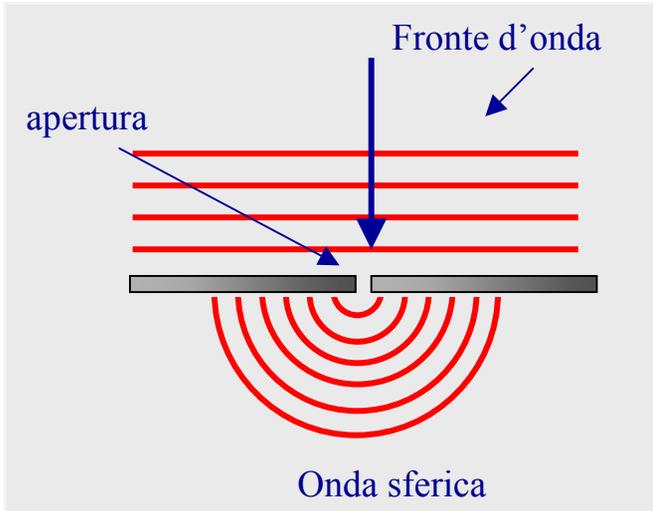
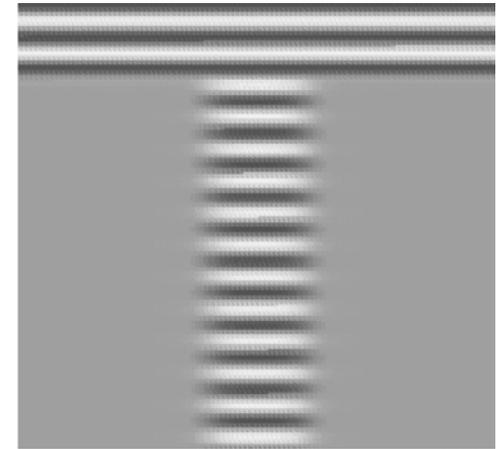
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{v_2}$$

Diffrazione delle onde

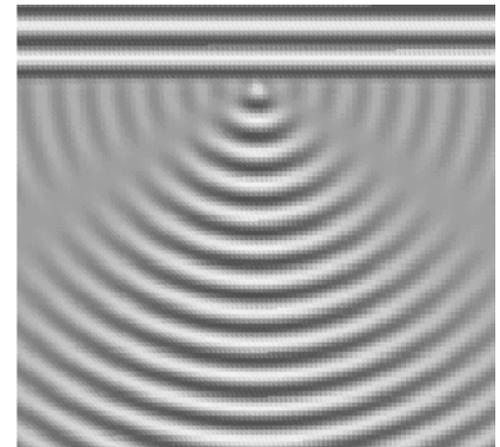
Il fenomeno della diffrazione si manifesta ogni qualvolta un fronte d'onda si propaga in presenza di ostacoli che ne limitano parzialmente il cammino.



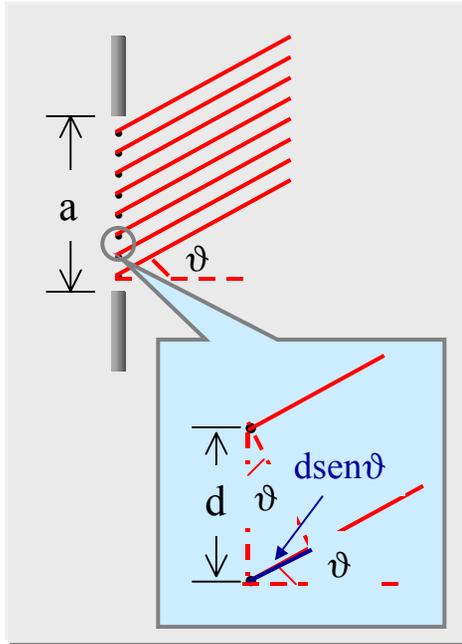
a) Se l'apertura è grande rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda incidente si ottiene un'onda piana con zone di flessione ai margini.



b) Se l'apertura è piccola rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda incidente si ottiene un'onda sferica



Diffrazione da una singola fenditura



Secondo il principio di Huygens ciascun punto lungo la linea dell'apertura è una sorgente di onde circolari.

Consideriamo quelle onde che formano un angolo ϑ con la direzione originale. Dividiamo la fenditura in N intervalli e supponiamo che ci sia una sorgente puntiforme di onde nel punto medio di ogni intervallo. Se d è la distanza tra due sorgenti adiacenti e a la larghezza dell'apertura si ha: $d=a/n$.

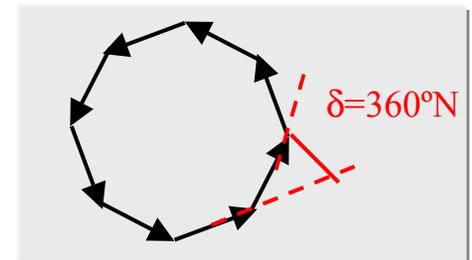
$$d \sin \vartheta$$

differenza di cammino tra 2 sorgenti adiacenti

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) d \sin \vartheta$$

differenza di fase tra 2 sorgenti adiacenti

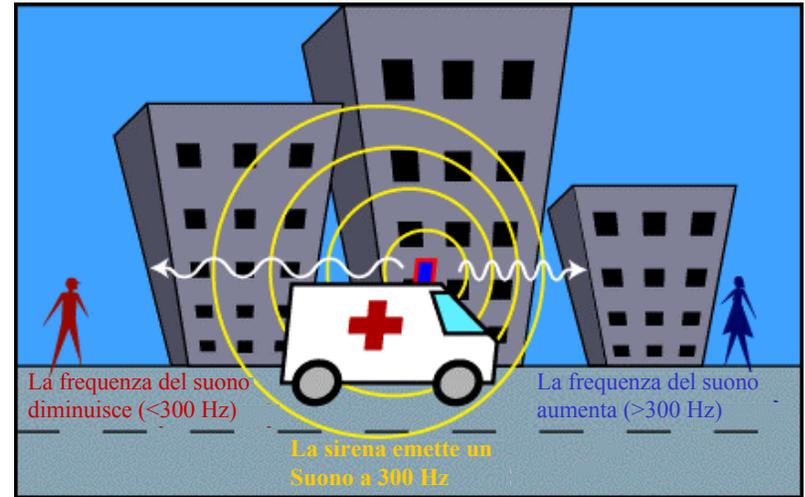
Per trovare l'ampiezza dell'onda diffratta in un punto P , posso utilizzare il metodo vettoriale di composizione delle onde, per cui l'intensità è nulla in un punto se i vettori che rappresentano le onde formano un poligono chiuso. Se N è molto grande, si ha la neutralizzazione completa delle onde quando le onde provenienti dalla prima e dall'ultima sorgente sono sfasate di 360° , corrispondenti a una differenza di cammino di 1 lunghezza d'onda. La condizione di minimo si avrà quindi per



$$a \sin \vartheta = m \lambda$$

Effetto Doppler

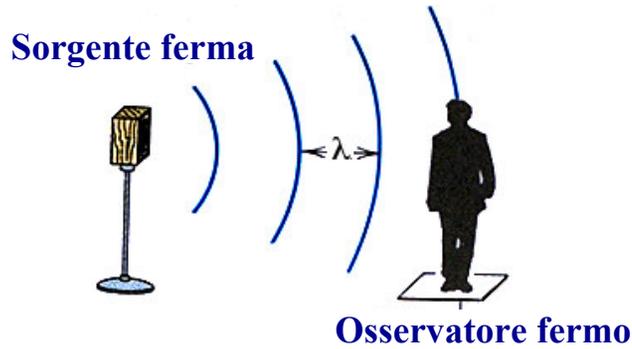
Com'è noto, quando passa un'ambulanza e suona la sirena, il suono più alto (durante l'avvicinamento) cambia in un suono più basso (durante l'allontanamento) quando arriva all'altezza dell'osservatore. Questo effetto è noto come effetto Doppler.



In qualsiasi moto di una fonte sonora o di un osservatore relativamente al mezzo di propagazione del suono si riscontra una variazione di frequenza del suono percepito.

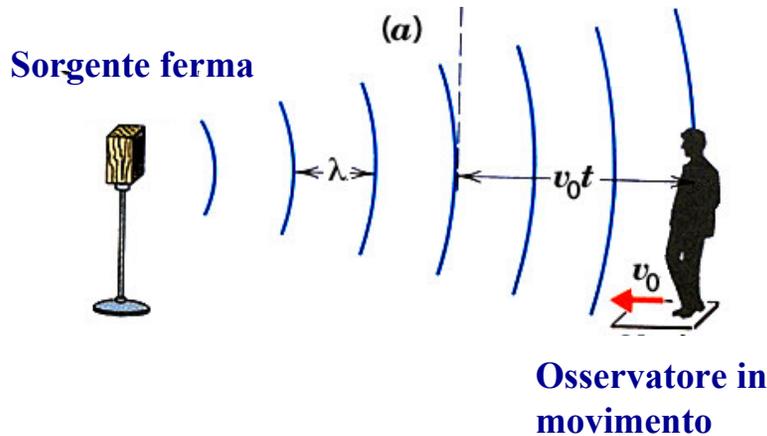
L'effetto Doppler, però, non si limita alle onde sonore ma si estende a tutti i tipi di onde. Esso viene utilizzato per esempio in astronomia per determinare dallo spostamento verso il rosso la velocità con cui si allontanano lontani sistemi stellari.

Effetto Doppler: osservatore in movimento



La sorgente è ferma ed emana un suono con frequenza f_0 e lunghezza d'onda $\lambda = v / f_0$. Se l'osservatore è fermo, in un tempo t egli riceve vt / λ onde. Se l'osservatore si muove verso la sorgente, egli riceve nello stesso tempo, $v_0 t / \lambda$ onde in più. Poiché la frequenza f' del suono da esso udito è il numero di onde ricevute per unità di tempo:

$$f' = \frac{vt / \lambda + v_0 t / \lambda}{t} = f_0 \left(1 + \frac{v_0}{v} \right)$$

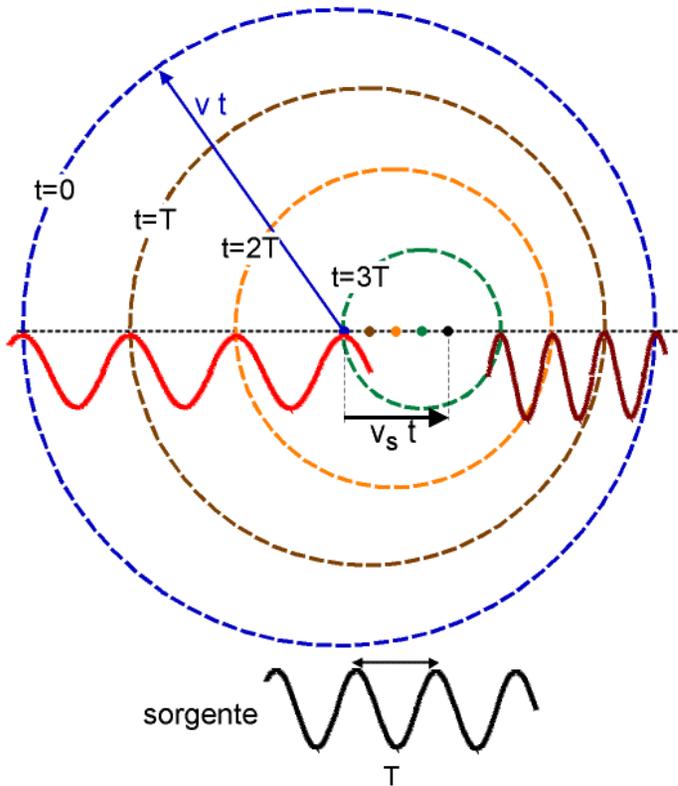


In maniera analoga si dimostra che se l'osservatore si allontana dalla sorgente:

$$f'' = f_0 \left(1 - \frac{v_0}{v} \right)$$

Effetto Doppler: sorgente in movimento

sorgente in moto con velocità v_s



λ più lunga in direzione opposta a v_s
 λ più corta in direzione concorde a v_s

Quando è la sorgente a muoversi verso un osservatore fisso, l'effetto è un accorciamento della lunghezza d'onda. Questo perché la sorgente segue le onde che emette, e i massimi e i minimi di queste quindi si avvicinano. Se la frequenza emessa è f_0 e v_s la velocità della sorgente, allora questa durante ogni vibrazione completa avanza di un tratto v_s/f_0 e ciascuna lunghezza d'onda è accorciata di questo valore. Quindi la lunghezza percepita dall'osservatore è:

$$\lambda' = \frac{v}{f_0} - \frac{v_s}{f_0}$$

e di conseguenza

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f_0 \left(\frac{v}{v - v_s} \right)$$

Nel caso la sorgente si allontani dall'osservatore:

$$f'' = f_0 \left(\frac{v}{v + v_s} \right)$$