

ONDE ELASTICHE e ACUSTICA

La propagazione per ONDE

I concetti di onda e di propagazione per onde sono fra le più importanti di tutta la fisica. Per introdurre l'argomento cominciamo con un esempio noto a tutti, ossia quando viene gettato un sassolino in una pozza di acqua. Si osserva in questa circostanza che dal punto di impatto, del sassolino con l'acqua, dipartono delle increspature a forma di cerchio, che al passare del tempo si allargano sempre più, fino a raggiungere le sponde della pozza o dello stagno.

Questa increspatura viene chiamata **ONDA**. Questa definizione non è impiegata solo nel linguaggio corrente, ma anche dal punto di vista fisico. Il fatto che queste increspature si allargano tutte attorno, al punto di impatto, percorrendo così in tutte le direzioni la superficie dell'acqua, si esprime dicendo che **l'onda si propaga sulla superficie dell'acqua**. La direzione ed il verso di propagazione è, evidentemente la direzione ed il verso secondo cui si propaga l'onda, ossia dal punto di impatto del sassolino verso il bordo della pozza. Questo esempio permette anche di introdurre un'importante caratteristica del moto dell'onda, ossia la propagazione dell'onda **non dà luogo ad alcun trasporto di materia**. Infatti, se in un punto P diverso dal punto di contatto del sassolino con l'acqua, (detto punto O), vi è un galleggiante, si vede che esso non viene trascinato dall'onda nella direzione in cui questa si propaga, ma acquista semplicemente un moto oscillatorio in direzione verticale. In pratica è come ammettere che la distanza del punto P dal punto O rimane costante.

Questo tipo di onda qui descritto è un caso molto particolare. In generale si ha un'ONDA quando in un mezzo continuo, (nel nostro esempio la superficie dell'acqua), si provoca una perturbazione in punto, (O), che non rimane confinata nella zona perturbata, ma si propaga attraverso il mezzo continuo con una certa velocità. La velocità in questione dipende dalla natura dell'onda e dal mezzo in cui essa si propaga. Si vuole far notare che la propagazione per onde è un fenomeno fondamentale in diverse branche della fisica, ad esempio in Meccanica, come in questo caso o nel caso delle onde elastiche, (che poi esamineremo), nell'Elettromagnetismo nei segnali radio, nella luce, nei fenomeni radianti, come i raggi X, ecc. Le onde elastiche che si studiano nella Meccanica sono dovute alle proprietà elastiche della materia, o meglio del mezzo materiale in cui esse si propagano, nel caso della luce, (o nel caso dei fenomeni radio, o nel caso dei fenomeni radianti, come i raggi X, ecc.), la perturbazione non ha necessità di un mezzo materiale per propagarsi, ma si propaga semplicemente nel **vuoto**.

Ci occuperemo inizialmente proprio delle onde elastiche e poi della sensazione sonora che producono, quelle onde elastiche, che risultano avere una frequenza compresa fra due opportuni limiti.

Vogliamo concludere questa introduzione mettendo in luce che la propagazione per onde mette in gioco sempre una propagazione energetica. Infine, la propagazione di onde diverse si esprimono matematicamente da equazioni analoghe, che differiscono soltanto per il significato fisico delle grandezze che vi intervengono.

Onde elastiche

Possiamo dire che questo tipo di propagazione avviene sia nei solidi, che nei liquidi che nei gas.

L'esempio più semplice di onda elastica si ha nel caso di una corda tesa, ad un estremo della quale venga impressa una rapida oscillazione. Questa perturbazione si propaga lungo la corda, proprio come nel caso del sassolino gettato nello stagno. Questo stesso tipo di perturbazione si può riprodurre anche con una molla di acciaio. Anche la molla può essere compressa, ma rilasciata comincia ad oscillare, permettendo alla perturbazione di propagarsi lungo l'asse della molla stessa. In questi due esempi si è parlato di onde elastiche, perché il meccanismo della propagazione ha origine dalle proprietà elastiche della corda e della molla: in entrambi i casi la perturbazione consiste in una deformazione elastica provocata ad un estremo del corpo considerato. In definitiva si parla di onde elastiche in quanto traggono origine dalle proprietà elastiche della corda e della molla.

Anche per i corpi solidi avviene una tale propagazione, perché se ad esempio colpiamo con un martello una sbarra di acciaio, nel punto colpito si provoca una deformazione elastica, che si propaga nella sbarra in tutte le direzioni.

Lo stesso discorso si può effettuare per i fluidi, ed in particolare per i gas; infatti essi sono elastici, nel senso che, se vengono compressi, oppongono una forza che è molto simile a quella esercitata da una molla, quando essa viene compressa.

In conclusione, anche per i **fluidi** si può ammettere una propagazione di onde elastiche.

Onde elastiche periodiche

Quanto detto poco sopra vale per qualsiasi tipo di propagazione con caratteristiche elastiche. Ma risultano particolarmente importanti le onde elastiche aventi oscillazioni con carattere periodico.

Ricordiamo che un punto materiale è animato di un moto periodico, quando esso dopo intervalli di tempo uguali, assume sempre la stessa posizione e la stessa velocità. L'intervallo di tempo per il quale esso riassume lo stesso stato di moto, prende il nome di **periodo T**. L'inverso del periodo prende il nome di **frequenza** e d è indicato come: $f = \nu = 1 / T$.

Infine, si chiama pulsazione ω il prodotto di 2π per la frequenza:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \nu = 2\pi / T.$$

Un esempio di moto periodico può essere fornito considerando il moto dei pianeti intorno al sole, il moto circolare uniforme, il moto di un pendolo, il moto armonico, ecc.

Onde longitudinali ed onde trasversali

Nella molla di acciaio le onde elastiche si propagano lungo la molla stessa ed ogni spira oscilla avanti ed indietro, nella stessa direzione. In questo caso si parla di onda con carattere **longitudinale**. **Si è in presenza di un'onda longitudinale quando il movimento delle particelle del corpo, trasmesso da un'onda elastica, avviene nella direzione di propagazione dell'onda.** (Le onde acustiche come vedremo hanno carattere longitudinale, ossia sono onde longitudinali).

Non è questo il caso delle onde che si propagano in una corda tesa, scuotendo un estremo; infatti, la perturbazione si sposta lungo la corda, ma le particelle della corda vibrano secondo una direzione perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda stessa. Pertanto, in questo caso siamo in presenza di un'onda **trasversale**. Più in generale, potremo dire che: **si ha un'onda trasversale quando il movimento trasmesso dall'onda alle particelle del corpo è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda stessa.**

Le onde elastiche che si propagano in un solido possono essere longitudinali, trasversali ed addirittura una sovrapposizione di entrambe, (in questo caso si parla di onda obliqua).

ACUSTICA

Il suono

Queste considerazioni iniziali ci consentono di introdurre lo studio dell'ACUSTICA, cioè di quella parte della fisica che studia la produzione e la propagazione del suono. Il termine acustica deriva dal greco e significa **udire**.

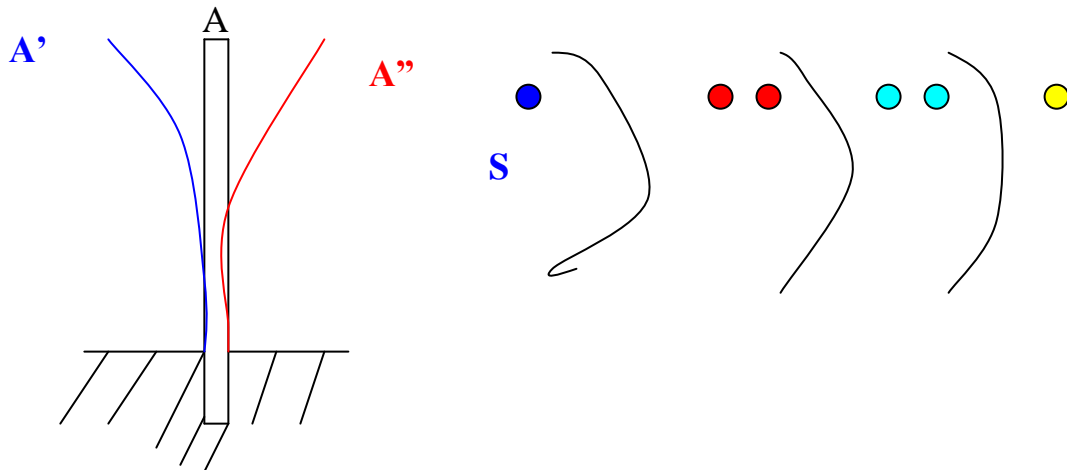
In particolare possiamo chiamare **sorgente sonora** un qualsiasi corpo che emetta un suono. Se si esamina **l'origine di un qualsiasi suono si trova che esso è sempre dovuto a vibrazioni della sorgente sonora**. Ciò può essere dovuto o a vibrazione di corde, (corde vocali dell'uomo, o di un pianoforte o di un violino, ecc.) o di colonne d'aria, (come negli organi, nel clarino, ecc.) o di piastre o di membrane, (come nel caso dei tamburi e nel caso degli altoparlanti, ecc.).

Tutti questi corpi vibrando, alternativamente comprimono e rarefanno l'aria che si trova nelle immediate vicinanze. Le onde sonore trasmesse elasticamente dalle colonne di aria giungono al nostro orecchio producendo la sensazione sonora. C'è da osservare che un sassolino, che oscilla appeso ad uno spago, non emette alcun suono, perché il nostro orecchio percepisce un suono se e solo se la sorgente vibri abbastanza velocemente, ma non troppo. In definitiva è necessario che la frequenza dell'onda sia compresa fra 16 e circa 12.000 Hertz. E' merito di Galileo Galilei l'aver scoperto che la sensazione sonora è prodotta in Noi da onde elastiche di opportuna frequenza, che giungono al nostro orecchio attraverso l'aria. Un semplice esempio, mette in rilievo che l'onda sonora si propaga nell'aria, (esempio di una campanella all'interno di una campana di vetro in cui si può fare il vuoto).

E' importante ricordare che non solo l'aria consente la trasmissione dell'onda sonora, ma essa può anche propagarsi nei solidi, o nei liquidi o nei gas. Per esempio è possibile sentire l'arrivo di un treno appoggiando le orecchie su di un binario, oppure è possibile sentire il rumore di un'elica di una nave anche immersi nell'acqua. In definitiva l'onda sonora si trasmette in tutti i mezzi materiali, o le onde elastiche si propagano soltanto nella materia. E' certo che **un'onda sonora non si trasmette nel vuoto.**

Onde Acustiche

Supponiamo che la sorgente sonora sia una lamina di acciaio con un estremo vincolato o fisso e l'altro estremo libero, che vibri dalla posizione di riposo A, alle due posizioni A' ed A''.



Quando questo estremo si muove da A verso A' esso spinge lo strato d'aria più vicino verso l'interno, ossia fa esercitare allo straterello d'aria una compressione nei confronti degli altri strati ad esso vicino. In pratica, si ha un **fenomeno di compressione** che si propaga nell'aria, allontanandosi in tutte le direzioni.

Quando la lamina da A' ritorna verso A, e poi da A verso A'' lo strato d'aria immediatamente a contatto, (che precedentemente veniva compresso), viene ora decompresso e quindi si rarefà. Questa rarefazione si propaga allo strato contiguo di aria e così via. In questa fase si ha allora una **decompressione** o una **rarefazione**, che si propaga nell'aria a seguito di una compressione. Quando A'' torna verso A e conseguentemente verso A', si ha un'altra fase di compressione, alla quale segue un'altra fase di decompressione e così via. In conclusione, la laminetta, vibrando, genera **un'onda elastica periodica**, costituita da una serie di strati in cui l'aria è alternativamente compressa o rarefatta. Ovviamente se la frequenza della vibrazione risulta compresa fra i due valori detti precedentemente, questa vibrazione fornisce una sensazione sonora al nostro orecchio: in questo caso **l'onda elastica prende più propriamente nome di onda acustica.**

Inoltre, la distanza che intercorre tra due successivi strati compressi, o due strati rarefatti si indica col nome di lunghezza d'onda. Essa è evidentemente la distanza percorsa dall'onda o da una perturbazione in un periodo, cioè nel tempo necessario affinché uno strato d'aria compia un'oscillazione completa.

Si osserva inoltre che un suono si propaga nell'aria, o più in generale in un fluido, è costituito da onde elastiche longitudinali.

C'è da osservare che **il massimo spostamento di una particella dalla sua posizione di equilibrio** prende il nome di **Ampiezza**, ma come si osserva nella figura superiore, **l'ampiezza della vibrazione diminuisce man mano che ci si allontana dalla sorgente sonora.**

Velocità del suono

La propagazione del suono non è istantanea, anche perché occorre un certo tempo, affinché le onde acustiche, partite da una sorgente sonora, giungano ad una certa distanza dalla sorgente stessa. Infatti, ci è noto che il tuono non si percepisce contemporaneamente al lampo, nel caso dei fenomeni temporaleschi.

Si ricorda che la velocità si esprime come rapporto tra la distanza percorsa ed il tempo impiegato a percorrerla. Comunque, nel caso dell'aria il suono si propaga con una velocità che, alla pressione di 1 atmosfera, alla temperatura di 0° C e ritenendo l'aria sufficientemente secca, (priva di umidità), è di circa 331,4 m / s.

Mediamente, si ritiene la velocità di propagazione dell'onda sonora nell'aria, sia di circa 341 m / s.

Mezzo	Temperatura in °C	Velocità in m / s
ARIA	0	331,4
ACQUA	15	1.450
PIOMBO	20	1.230
FERRO	20	5.130
GRANITO		6.000
GOMMA vulcanizzata	0	54

Limiti di udibilità

Come abbiamo già detto, non sempre un corpo in vibrazione emette un suono percepito dal nostro orecchio; infatti l'orecchio umano percepisce solo le vibrazioni comprese entro due limiti, (leggermente diversi da persona a persona), che prendono il nome di **limiti di udibilità**. Più precisamente danno luogo a sensazione sonora soltanto le onde elastiche la cui frequenza è compresa circa tra i 16 ed 12.000 Hz,

(ossia numero di oscillazioni complete al secondo). Le onde elastiche con una frequenza minore di 16 Hz, oppure superiore ai 12.000 Hz, giungono al nostro orecchio, ma esse non producono nessuna sensazione uditiva. C'è da osservare che alcuni giovani possono udire anche onde elastiche con frequenza più elevata, cioè fino a circa 20.000 Hz. Comunque le onde elastiche con frequenza così elevata, tali da non produrre alcuna sensazione uditiva, prendono il nome di **ultrasuoni**.

Lunghezza d'onda delle onde elastiche

Se **T** è il periodo di una certa onda elastica e λ è la sua lunghezza d'onda, la velocità **v** del suono è data da:

$$v = \lambda / T = \lambda f = \lambda v.$$

Ricordando che la lunghezza d'onda λ è la distanza percorsa dalla perturbazione in un periodo, allora potremo scrivere: $\lambda = v / f = v / v$.

Ora tenendo presente che la velocità dell'onda sonora, nell'aria, è di circa 331,4 m / s e che se si assume per **v** i valori rispettivamente di 16 Hz e 12.000 Hz, si ottiene la lunghezza delle onde udite dall'orecchio umano:

$$\lambda_{\text{Min}} = 331,4 / 16 = 20 \text{ metri}; \quad \lambda_{\text{Max}} = 331,4 / 12.000 = 0,03 \text{ m.}$$

CONCLUSIONE

I suoni, udibili dall'orecchio umano, sono vibrazioni elastiche longitudinali la cui lunghezza d'onda, nell'aria, varia circa tra i 3 cm e i 20 m.

Suoni e rumori

Vogliamo, ora mettere in evidenza, la differenza fra ciò che indichiamo col nome di **rumore** con ciò che si indica con **suono**.

In generale, si chiamano **suoni le onde acustiche generate da una qualsiasi vibrazione meccanica periodica**.

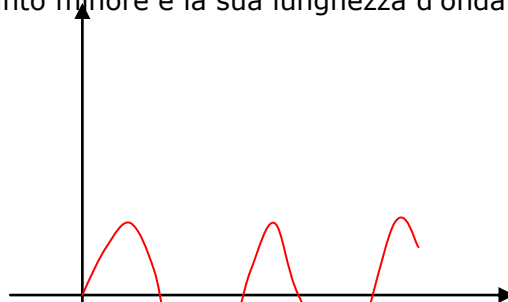
Invece, **i rumori sono perturbazioni acustiche alle quali manca un preciso carattere di periodicità**.

I caratteri distintivi del suono

I suoni che il nostro orecchio percepisce sono estremamente diversi. Infatti, un suono può essere basso o acuto, ossia può avere una diversa **altezza**: per esempio, sono di diversa altezza i suoni emessi spingendo tasti diversi del pianoforte. Inoltre, un suono di una data altezza può avere una minore o una maggiore **intensità**: il suono di uno stesso tasto di un pianoforte può avere una maggiore o una minore intensità a seconda che si batta, lo stesso tasto, più o meno forte. Infine, un suono può avere diverso **timbro**; infatti la stessa nota emessa da un violino o da un pianoforte provoca in Noi sensazioni molto diverse. Le caratteristiche introdotte rappresentano proprio i caratteri distintivi di un suono, ossia **l'altezza, l'intensità ed il timbro** sono le caratteristiche principali di un suono.

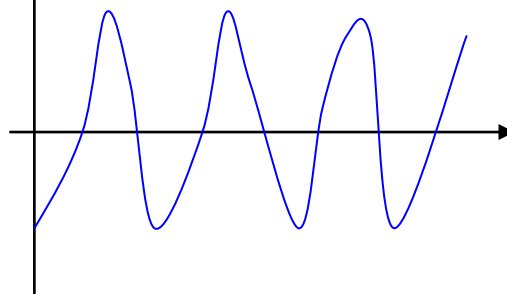
L'**altezza** è il carattere distintivo che consente di distinguere fra **i suoni gravi e suoni acuti**. L'esperienza mostra che a due suoni di diversa altezza corrispondono a onde di diversa frequenza. Più precisamente i suoni molto profondi hanno frequenza di alcune decine di Hz, mentre i suoni più acuti hanno frequenza di alcune migliaia di Hz. Dato che la lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza si può anche dire che percepiamo un suono tanto più alto quanto minore è la sua lunghezza d'onda.

Suono GRAVE



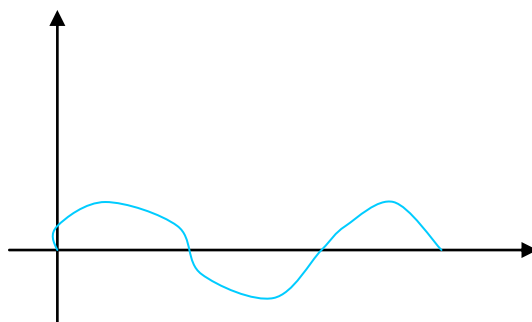
L'ALTEZZA di un suono dipende dalla frequenza delle vibrazioni

Suono ACUTO

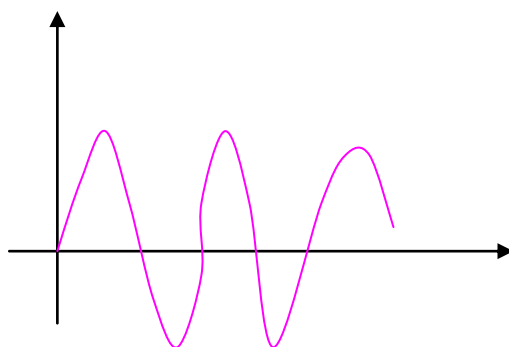


L'**intensità** è il carattere che distingue i suoni forti dai deboli. L'**intensità** di un suono è anche legata all'ampiezza delle vibrazioni che le particelle dell'aria, in cui il suono si propaga, effettuano attorno alla loro posizione di equilibrio.

**Suono meno
intenso**



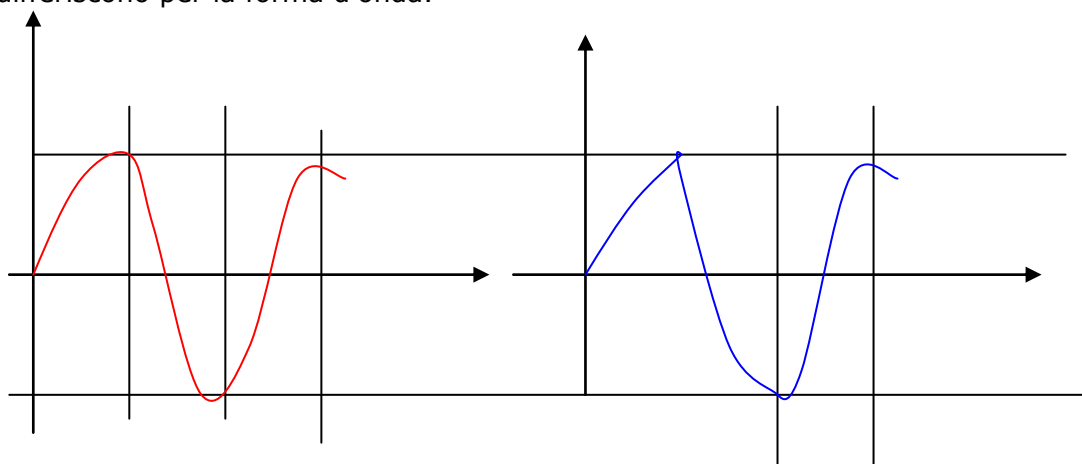
**Suono più
intenso**



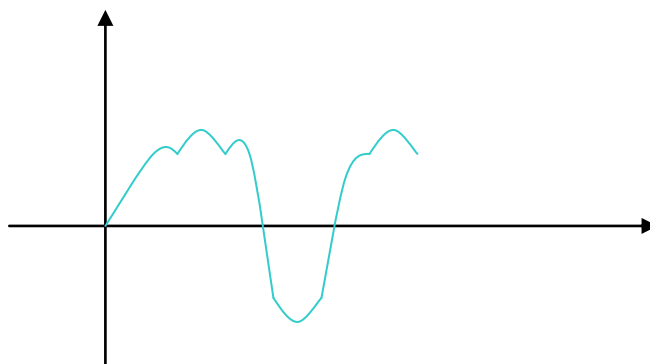
**L'altezza di un suono
dipende dalla
frequenza delle
vibrazioni**

Uno stesso suono è più debole o più intenso, a seconda che le oscillazioni hanno, rispettivamente ampiezza minore o maggiore.

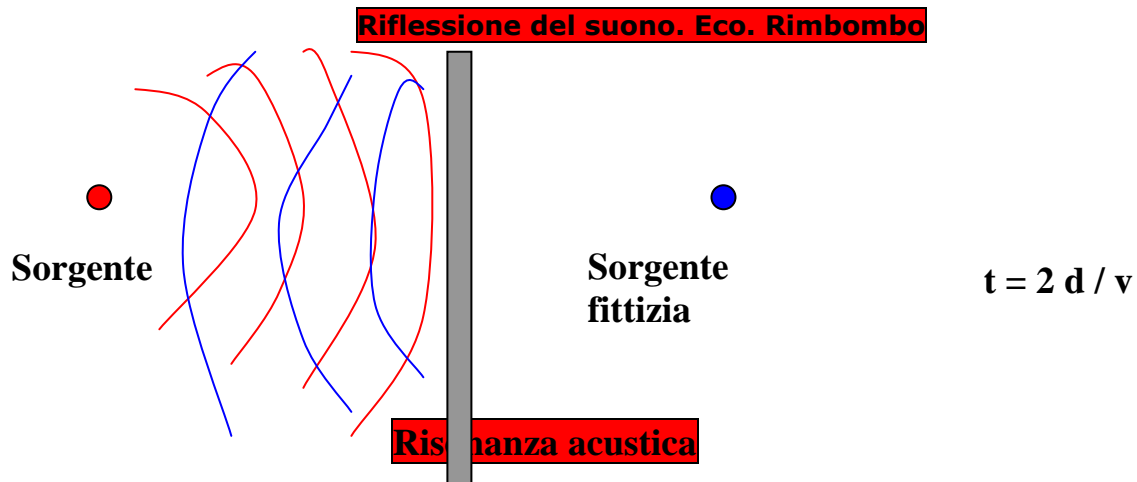
Il timbro di un suono ha origine più complessa dei due caratteri esaminati in precedenza. Infatti, due suoni che abbiano eguale intensità ed uguale altezza possono, tuttavia, differire molto fra loro; così come sono molto diverse le impressioni che riceviamo dai suoni di uguale altezza ed intensità, emessi da un pianoforte o da una tromba o se cantate da una voce umana. In definitiva, prende il nome di timbro il carattere che permette di distinguere più suoni, identici per altezza e per intensità, che provengono da sorgenti diverse. Suoni di timbro diverso differiscono per la forma d'onda.



**I suoni di TIMBRO
diverso differiscono per
la forma d'onda.**



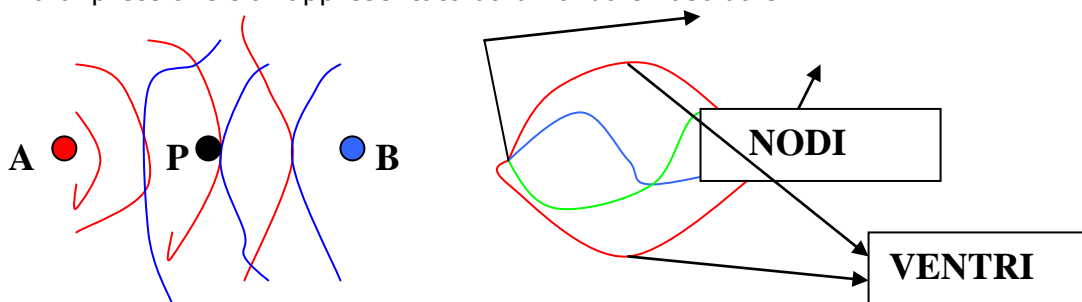
PROPAGAZIONE DEL SUONO



Il fenomeno della risonanza acustica si può porre in evidenza facendo uso del **diapason**. Un diapason investito da una vibrazione identica a quella con cui esso vibra, inizia a vibrare anche se non toccato da alcuna mano. Tutti i diapason vibranti con frequenze diverse non si pongono in vibrazione alcuna. Questo fenomeno si dice di **risonanza acustica: un corpo, capace di emettere un suono di una bene determinata frequenza, si mette a vibrare quando investito da un suono di quella stessa frequenza, ma non quando è investito da suoni aventi frequenza diversa dalla propria.**

INTERFERENZA ACUSTICA

Se due **suoni** di uguale frequenza si sovrappongono in condizioni particolari, in alcuni punti dello spazio, si osserva una diminuzione dell'intensità sonora, o addirittura una completa estinzione, mentre in altri casi si osserva un aumento, come se l'intensità dei due suoni si fossero semplicemente sommate. Questo fenomeno si dice di **interferenza acustica**. Ne vedremo una descrizione qualitativa. Si abbiano due sorgenti sonore A e B che vibrino con eguale frequenza ed in una relazione di fase che si mantiene costante. Si supponga inoltre che il loro diagramma di pressione sia rappresentato da un'onda sinusoidale.



Una particella d'aria, posta in **P**, ad una certa distanza dalle due sorgenti, è così investita dai due sistemi di onde, che hanno la stessa frequenza e che provengono uno dalla sorgente **A** e l'altro dalla sorgente **B**. Pertanto, la particella è soggetta a due moti vibratorii, componendo i quali si ottiene un'onda risultante. Si possono verificare le due seguenti situazioni limite.:

- Se nello stesso istante, giungono in P uno strato di compressione proveniente da A e uno strato di compressione proveniente da B, ossia se le due onde giungono in P in concordanza di fase, in questo caso l'intensità del suono risulta rinforzata, (pari alla somma delle due ampiezze pertinenti).
- Se, invece, nello stesso istante giungono in P, uno strato di compressione o di rarefazione proveniente da A e uno strato di rarefazione o di compressione proveniente da B,

allora in questo caso l'intensità sonora, che giunge in P, è pari alla differenza delle due ampiezze, dei segnali ivi giunti. Ciò implica che il suono percepito da P è fortemente indebolito, e se le due onde provenienti dalle due sorgenti in P giungono in opposizione di fase, completa, (e nell'ipotesi che le due onde abbiano la stessa ampiezza), P non percepisce alcun suono, (in altri termini per P vi è silenzio totale). Le due situazioni sono due casi limiti del cosiddetto fenomeno di **interferenza acustica**.

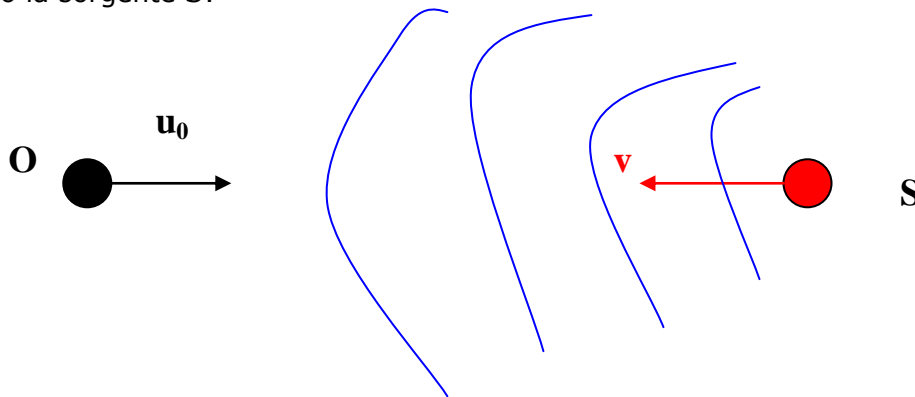
Mentre il fenomeno dei **BATTIMENTI** è generato dalla sovrapposizione di due moti vibratorii, le cui frequenze differiscono poco l'una dall'altra.

Effetto DOPPLER

Nel 1843 l'austriaco Doppler costruì la teoria di un fenomeno acustico, molto importante, che venne poi chiamato col suo nome, ossia l'effetto Doppler. Vedremo ora di che cosa si tratta.

Questo fenomeno si osserva quando una sorgente di onde, elastiche o elettromagnetiche, ed un osservatore sono in movimento reciproco l'uno rispetto all'altro. Consideriamo il caso in cui la sorgente sonora S sia ferma ed emetta un suono di frequenza ν_s , il quale si propaga nell'aria circostante con velocità v . Supponiamo che un osservatore O, sia fermo ad una certa distanza d da S e che riceva un suono alla stessa frequenza ν_s . Noi sappiamo che la frequenza ν_s e la velocità v sono legate fra loro dalla seguente relazione: $\nu_s = v / \lambda$.

Un ragionamento si può fare se l'osservatore O **non è fermo**, ma si muove con velocità u_0 verso la sorgente S:



Si può ammettere che gli strati di compressione della sorgente S e l'osservatore O, si vanno incontro e la loro velocità relativa è: $v + u_0$, perciò le onde di compressione che l'osservatore O incontra nell'unità di tempo è data come: $\nu_0 = (v + u_0) / \lambda$. Ma Noi sappiamo che: $\nu_s = v / \lambda$, ossia $\lambda = v / \nu_s$, da cui posso ricavare la seguente relazione, $\nu_0 = (v + u_0) / \lambda = (v + u_0) / (v / \nu_s) = (v + u_0) \nu_s / v$.

In definitiva la frequenza ν_0 ricevuta dall'osservatore è più grande della frequenza ν_s emessa dalla sorgente. In questo modo l'osservatore sente un suono più acuto di quello emesso dalla sorgente.

Ora se l'osservatore, invece di avvicinarsi alla sorgente, si allontana allora Egli riceve un suono più basso o grave di quello emesso dalla sorgente stessa. In poche parole con ragionamento analogo a quello precedente si ha:

$$\nu_0 = (v - u_0) / \lambda = (v - u_0) / (v / \nu_s) = (v - u_0) \nu_s / v.$$

L'intensità del suono si misura dando o fornendo l'energia, che cade in un secondo sull'unità, di superficie, pertanto nel Sistema Internazionale si misura in Watt / m²; (Noi sappiamo che rappresenta anche una **densità di energia**).

Una misura dell'intensità di un suono, mediante la sensazione che produce in Noi umani, risulta molto difficile in quanto la sensibilità dell'orecchio è diverso da soggetto a soggetto ed, è diversa per i diversi suoni. Comunque un'unità di intensità sonora, che spesso viene utilizzata, è il BEL. Se si assume come **livello 0** la sensazione percepita dall'orecchio dalla più bassa intensità, si dice allora che il livello del suono è aumentato di 1 BEL, se l'intensità della sorgente è diventata 10 volte maggiore. Spesso si impiega il dB, ossia il decibel che è pari a 1 / 10 del BEL, in quanto corrisponde alla minima variazione dell'intensità sonora percepita dall'orecchio umano. Un suono così intenso da risultare doloroso ha un livello di circa 135 dB, (si tenga presente che il fruscio delle foglie ha un livello corrispondente a 10 dB.