

Acustica

L'acustica studia le caratteristiche del suono e della sua propagazione. Il suono è generato da un corpo vibrante, come una corda, una membrana elastica, le corde vocali. La sorgente del suono genera un'oscillazione che viene trasmessa all'aria circostante. Infatti le onde acustiche sono onde sferiche longitudinali dovute a fasi di compressione e rarefazione dell'aria (o di altro mezzo in cui si propaga il suono), con variazione sinusoidale della pressione.

Esse producono una vibrazione della membrana del timpano la quale trasmette tale impulso a una serie di ossicini nell'orecchio e infine, tramite la coclea al cervello.

Le onde sonore si propagano alla velocità di circa $340 \frac{m}{s}$ nell'aria secca a temperatura ambiente. Tale velocità è molto diversa per altri materiali, aumenta nettamente nei solidi, a causa della minore elasticità, fino a raggiungere valori intorno ai 6000 m/s.

Il nostro orecchio è in grado di percepire suoni all'incirca tra i 20 e i 20000 Hz, con un picco di sensibilità nella zona cosiddetta della musica, tra i 1000 e i 5000 Hz; al di sotto dei 20 Hz abbiamo gli infrasuoni, al di sopra dei 20 KHz gli ultrasuoni. Alcuni animali, come delfini e pipistrelli, sentono anche frequenze nella zona degli ultrasuoni.

Un suono non è quasi mai puro, ma è dato dalla sovrapposizione di molte onde semplici. Se l'onda è molto irregolare si parla di rumore. Nella maggior parte dei casi un suono è prodotto dalla sovrapposizione di più suoni semplici, di cui quello a frequenza più bassa è detto "primo armonico" o "fondamentale", mentre le altre frequenze sono multiple intere della fondamentale (armonici superiori).

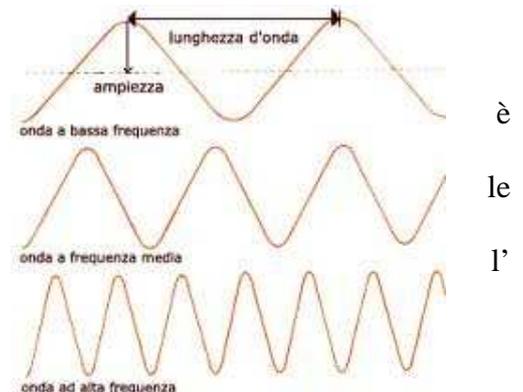
Caratteristiche distintive del suono

Le proprietà caratteristiche del suono sono:

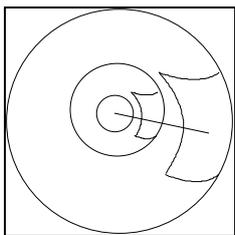
- **altezza**
- **intensità**
- **timbro**

Altezza

Un suono risulta tanto più acuto quanto più è elevata la sua **frequenza** cioè il numero di oscillazioni al secondo. Poiché si visto che la frequenza dipende dall'inverso della lunghezza di una corda, corde più corte daranno suoni più acuti. Per esempio corde vocali femminili sono più corte di quelle maschili. A frequenza doppia corrisponde un suono più acuto, esattamente ottava musicale superiore (ad ex. Do1- Do 2).



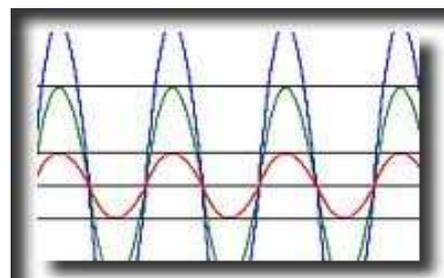
Intensità



L'intensità oggettiva di un suono è la quantità di **energia** trasmessa nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie, perpendicolarmente alla direzione di propagazione. L'intensità è proporzionale all'**ampiezza** dell'onda.

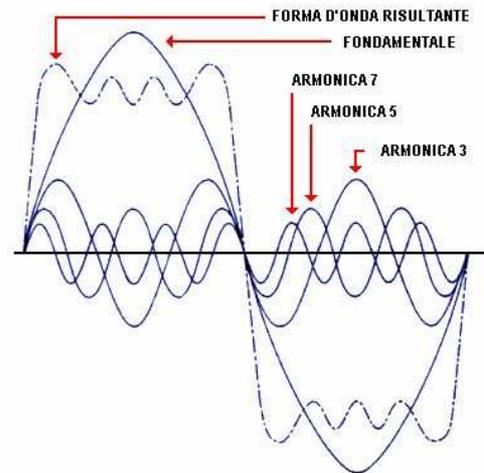
Essa è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente sonora, poiché l'energia si distribuisce su superfici sferiche:

$$I = \frac{P}{S} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (S = 4\pi r^2)$$



Timbro

Ogni sorgente sonora presenta una caratteristica propria nell'emissione sonora, legata alla forma dell'onda prodotta, è ciò che permette di distinguere suoni di uguale frequenza prodotti da strumenti o voci diverse. Tale proprietà dei suoni è detta timbro e dipende dal fatto che il suono prodotto non è puro, non è cioè un'onda semplice ma è la somma dell'onda fondamentale con le sue **armoniche**. Ogni corpo che emetta suono, in virtù della sua forma particolare, del materiale di cui è costituito, delle sue dimensioni, produce onde di ampiezze diverse nelle varie frequenze armoniche: il risultato è un'onda di forma complessa, dovuta alla sovrapposizione di tutte le armoniche; essa fornisce una timbrica assai differente da strumento a strumento, da voce a voce.



Sensazione fisiologica

La sensibilità dell'orecchio al suono dipende dalla frequenza e dall'intensità. Al crescere dell'intensità del suono aumenta lo stimolo e quindi la pressione acustica. Il campo di udibilità parte da 0 dB (decibel), soglia di udibilità, fino a valori estremi, come 120 dB $\left[\frac{W}{m^2} \right]$, soglia del dolore, o 140 dB, dolore intenso. Se indichiamo con β la sensazione fisiologica del soggetto (intensità soggettiva), si trova che essa è correlata all'intensità dalla relazione: $\beta = \log_{10} \frac{I}{I_0}$, se β è espressa in bel, oppure

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}, \text{ se } \beta \text{ è espressa in decibel; } I_0 \text{ è un valore minimo di soglia pari a } 10^{-12} \frac{W}{m^2}.$$

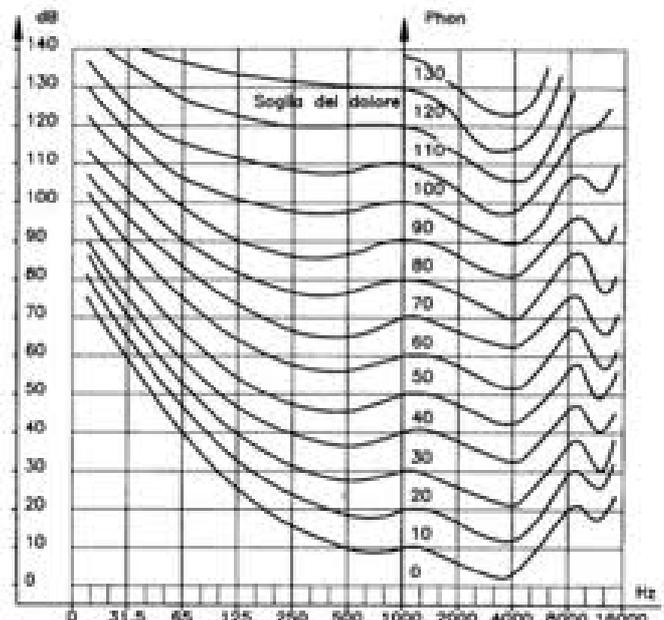
Se $\beta = 1 \text{ Bel} = 10 \text{ decibel} \rightarrow I = 10 I_0$.

Tale legge è empirica e approssimata, ma mette in evidenza come l'intensità effettivamente percepita non sia proporzionale all'intensità oggettiva emessa dalla sorgente, ma al suo logaritmo; l'intensità soggettiva inoltre dipende dalla frequenza, infatti, come si è detto, l'orecchio umano non è sensibile allo stesso modo a tutte le frequenze.

Il grafico a lato rappresenta le "curve isofoniche", curve che uniscono punti, caratterizzati da una certa frequenza e pressione sonora, per cui il livello di udibilità è identico.

Sono curve sperimentali ricavate da misure fatte su campioni di persone con udito buono.

Si può notare che le basse frequenze richiedono volumi molto più alti per essere udite con la stessa qualità della frequenza della zona di massima risposta dell'orecchio.



Rimbombo ed Eco

Sono fenomeni dovuti alla riflessione delle onde acustiche.

L'orecchio umano ha un potere separatore limitato, nel senso che due suoni brevi sono percepiti distinti solo se separati dall'intervallo temporale di almeno $\frac{1}{10} \text{ sec}$. Pertanto quando un suono viene riflesso da

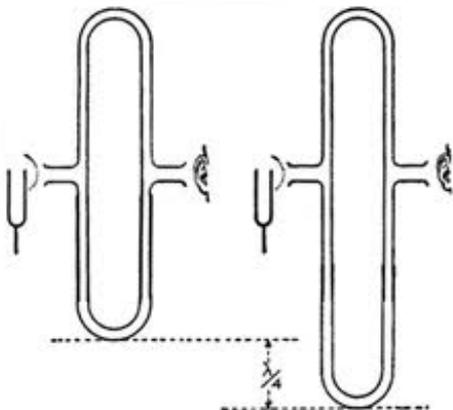
un ostacolo che si trova ad una distanza inferiore ad un certo valore limite, il suono riflesso si sovrappone al suono primario amplificandolo (rimbombo). La nostra voce è facilmente udibile in stanze o ambienti chiusi in quanto amplificata dalla sovrapposizione dell'onda diretta con le onde riflesse; la stanza funge da cassa di risonanza. Se la stanza è piuttosto grande, ad esempio una palestra, la voce ritorna con un piccolo ritardo, si dice che c'è rimbombo o riverbero. Chi progetta sale da concerto e auditorium deve riuscire a creare un giusto equilibrio tra la risonanza necessaria perché tutti sentano bene e un eccesso di riverbero che produrrebbe strascichi sonori fastidiosi (coda sonora).

Quando la distanza tra la sorgente e l'ostacolo è invece di almeno 17 m, il suono riflesso viene percepito distintamente, si ha il fenomeno dell'eco.

$$\text{Infatti: } \frac{1}{10} s = \frac{2D}{340 m/s}; D = 17 m.$$

INTERFERENZA - tubo di Quincke

Anche le onde sonore sono soggette al fenomeno dell'interferenza, fatto che può esser sperimentato mediante un apparecchio, detto Tubo di Quincke o interferometro acustico.



L'onda in entrata nel tubo si separa nei due rami dello stesso e interferisce uscendo dall'altoparlante. Variando lentamente la lunghezza di uno dei due rami del tubo, che è simile alla *coulisse* di un trombone, si ascoltano momenti di massimo di suono alternati a momenti di silenzio o suono molto debole. Si può verificare facilmente che valgono le leggi già note per l'interferenza costruttiva e distruttiva.

Nota la frequenza del suono, misurando la lunghezza d'onda, si può ricavare il valore della velocità del suono. Viceversa, supposta nota la velocità del suono, è possibile calcolare la frequenza del suono

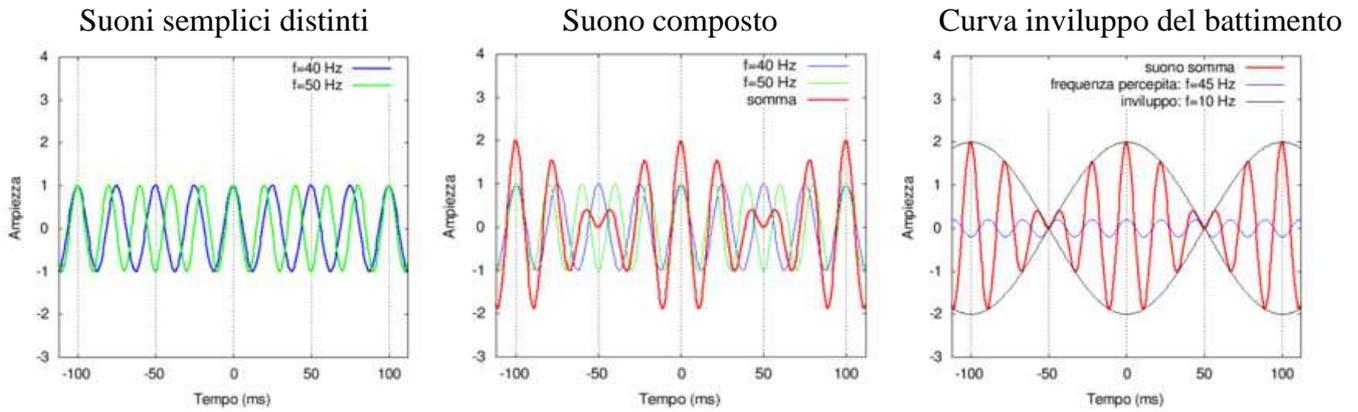
BATTIMENTI

Un caso particolare di interferenza è costituito dal fenomeno dei battimenti che ha luogo quando interferiscono tra loro due onde di frequenza diversa ma molto simile. Si produce un suono caratteristico di intensità oscillante tra un minimo e un massimo.

In questo caso infatti l'onda risultante è un'onda di ampiezza variabile sinusoidalmente; la frequenza con cui varia l'ampiezza del suono risultante, detta appunto frequenza di battimento, è data da:

$$f = f_1 - f_2.$$

Pertanto i battimenti saranno tanto più rapidi tanto più le frequenze sono vicine.

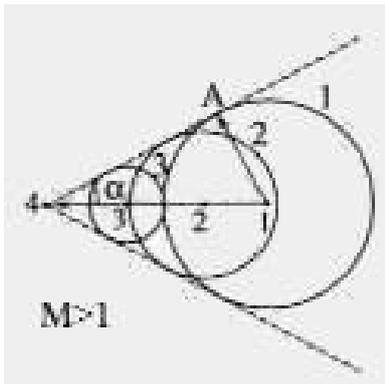


Si può ascoltare un battimento quando, accordando una chitarra, si producono su due corde suoni di frequenza simile ma non identica.

In un coro la presenza di battimenti troppo udibili sta ad indicare scarsa intonazione di qualche corista... Il fenomeno dei battimenti è sfruttato in acustica musicale a vari scopi, per accordare gli strumenti, per creare effetti particolari con le canne d'organo.

ONDA D'URTO

Quando la sorgente di un'onda sonora si muove con velocità superiore a quella dell'onda stessa si genera un fenomeno detto *onda d'urto*, dovuto alla particolare sovrapposizione dei fronti d'onda (cono di Mach).



Se poniamo:

u = velocità della sorgente
 v = velocità dell'onda , con $u > v$,

avremo che gli spazi percorsi in un tempo t saranno rispettivamente:

$$S_s = u \cdot t \qquad S_o = v \cdot t$$

Dalla figura si può vedere che:

$$S_o = S_s \cdot \text{sen} \alpha \qquad v \cdot t = u \cdot t \cdot \text{sen} \alpha$$

Da cui:
$$\frac{1}{\text{sen} \alpha} = \frac{u}{v} > 1$$

Il termine $\frac{1}{\text{sen} \alpha}$ è detto "numero di Mach" e rappresenta il rapporto tra la velocità della sorgente e la velocità del suono. Dire che un aereo viaggia a velocità Mach 2 significa che ha velocità doppia della velocità del suono, cioè circa 680 m/s, circa 2450 km/h.

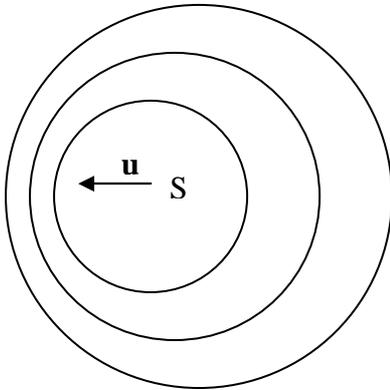
Quando l'aereo supera il cosiddetto *muro del suono* ($Ma = 1$), si forma l'onda d'urto.

- regime subsonico $Ma < 1$
- regime transonico $0,8 < Ma < 1,3$
- regime supersonico $Ma > 1$
- regime ipersonico $Ma > 5$

EFFETTO DOPPLER

E' il fenomeno per cui la frequenza di un suono si modifica quando c'è un movimento relativo fra la sorgente e l'ascoltatore; si presentano quindi due casi distinti.

Sorgente in movimento - ascoltatore fermo



Equivale in pratica ad un accorciarsi della lunghezza d'onda nella direzione del moto della sorgente.

V velocità del suono; u velocità della sorgente

λ_1 lunghezza d'onda percepita;

λ lunghezza d'onda emessa;

$\lambda_1 = \lambda - uT$ dove: uT = spazio percorso dalla sorgente in un periodo;

$\lambda = \frac{V}{\nu}$; $\lambda_1 = \frac{V}{\nu_1}$ $\rightarrow \frac{V}{\nu_1} = \frac{V}{\nu} - \frac{u}{\nu}$; quindi:

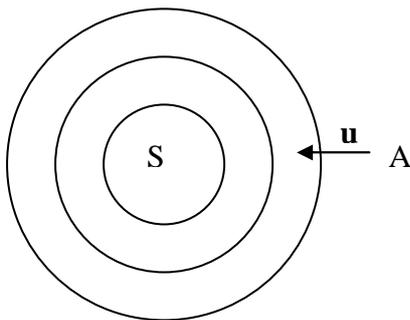
$$\boxed{\nu_1 = \nu \frac{V}{V - u}} \quad (\text{avvicinamento})$$

Analogamente:

$$\boxed{\nu_1 = \nu \frac{V}{V + u}} \quad (\text{allontanamento})$$

Se la sorgente si avvicina all'ascoltatore, si ha un aumento di frequenza, cioè il suono viene percepito più acuto; se la sorgente si allontana, si ha una diminuzione di frequenza e il suono viene percepito più grave. Caso tipico è la sirena dell'ambulanza.

Sorgente ferma - ascoltatore in movimento



Cambia il numero dei fronti d'onda che raggiungono l'ascoltatore nell'unità di tempo. Cambia cioè la frequenza.

u velocità dell'ascoltatore

$\nu_1 = \nu + \frac{u}{\lambda}$; $\nu_1 = \nu + \frac{u\nu}{V}$; si ottiene:

$$\boxed{\nu_1 = \nu \left(\frac{V + u}{V} \right)} \quad (\text{avvicinamento})$$

$$\boxed{\nu_1 = \nu \left(\frac{V - u}{V} \right)} \quad (\text{allontanamento})$$

La frequenza aumenta se l'ascoltatore si avvicina, in quanto questo incontra un maggior numero di fronti d'onda al secondo; diminuisce se si allontana.

Nel caso di un moto reciproco di sorgente ed ascoltatore, l'effetto Doppler è compendiato nella formula:

$$\boxed{\nu_1 = \nu \left(\frac{V \pm u_A}{V \pm u_S} \right)}$$