6. ACUSTICA

6.1 Caratteristiche Generali:

Il suono é un'onda elastica (ha bisogno di un mezzo per propagarsi), longitudinale (la perturbazione avviene parallelamente alla direzione di propagazione); per la sua esistenza sono, dunque, necessari una sorgente (corpo vibrante) e un mezzo elastico di propagazione (aria, acqua, ecc..).

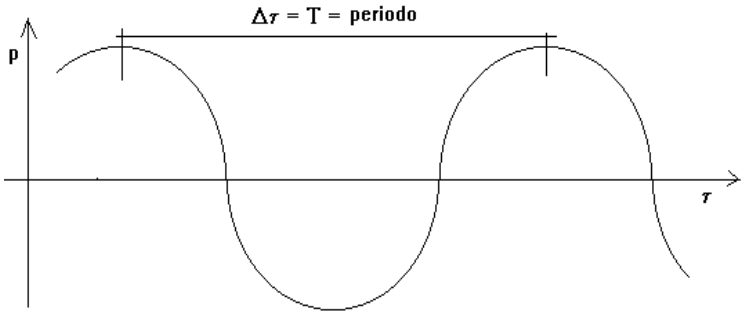
Il suono è, quindi, un modo di trasmissione di energia meccanica che, irradiandosi dalla sorgente attraverso il mezzo di propagazione, arriva ai corpi riceventi.

La perturbazione che viaggia sul mezzo consiste, fisicamente, in un susseguirsi di pressioni e depressioni e, quindi, in un'oscillazione di ogni particella in vibrazione attorno ad una sua posizione media fissa.

6.2 Grandezze Fisiche:

- **Periodo (T)**

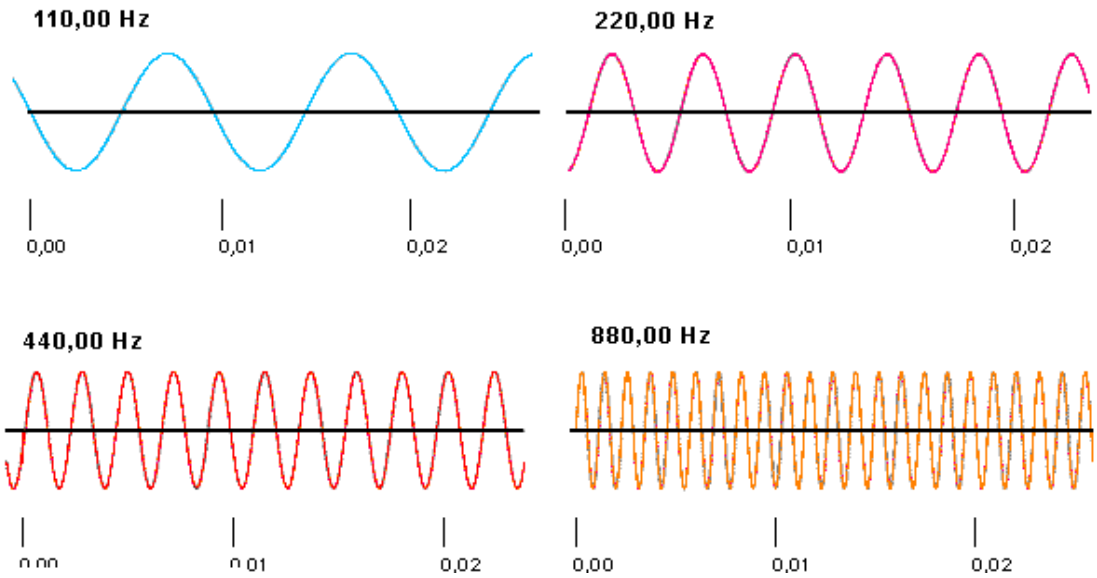
E' l'intervallo di tempo necessario per compiere una vibrazione completa. Si misura in secondi (s).



Se, ad esempio, il periodo è di 1/30 di secondo la sorgente sonora compie in 1 secondo 30 vibrazioni (frequenza).

- **Frequenza (f)**

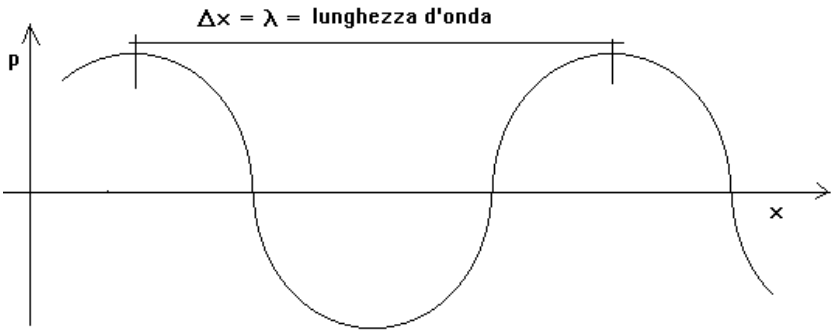
E' il numero di vibrazioni complete che avvengono in un secondo. Si misura in hertz (Hz = 1/s).



Il "range" di udibilità dell'orecchio umano è compreso tra i 20 e i 20000 Hz. Ciò significa che, pur esistendo onde sonore che si propagano a frequenze più basse (infrasuoni) o più alte (ultrasuoni) ,noi non possiamo percepirle.

- **Lunghezza d'onda (λ)**

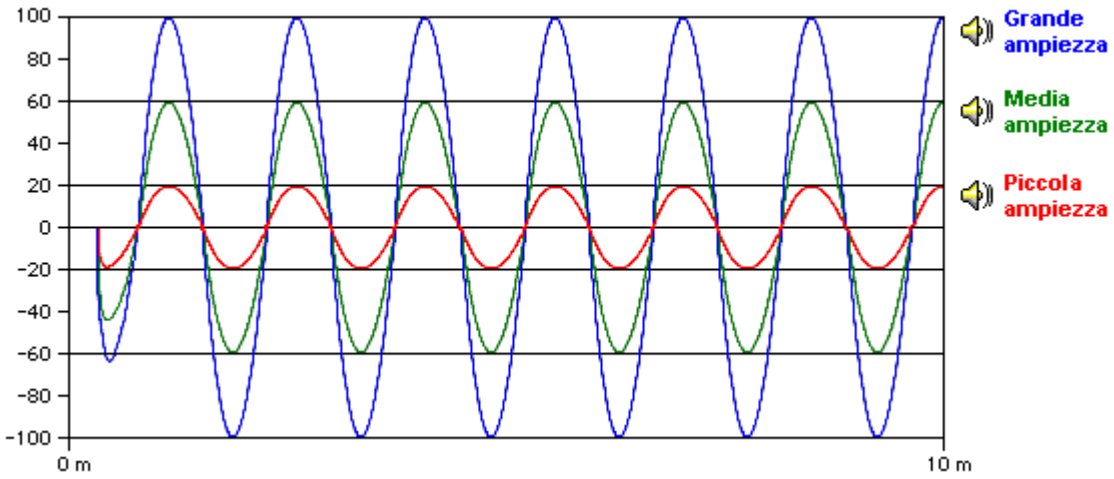
E' la distanza percorsa dall'onda in un periodo. Perciò, se c è la velocità di propagazione , $\lambda = c \cdot T$ oppure $\lambda = c / f$. Si misura in metri (m).



- **Ampiezza**

L'ampiezza dell'onda rappresenta lo spostamento massimo delle molecole d'aria che oscillano intorno alla posizione di equilibrio al passaggio della perturbazione acustica.

All'aumentare di questo spostamento aumenta la forza con cui le molecole colpiscono la membrana timpanica e, quindi, l'intensità del suono che percepiamo.



- **Velocità di propagazione**

E' la velocità con cui il suono si propaga nel mezzo attraversato e dipende dalla densità dello stesso e dal modulo di compressione (K = Costante); il modulo di compressione, può descrivere a livello macroscopico, la forza di legame tra le molecole di un materiale.

L'unità di misura di K si ricava dalla formula :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta p}{K}$$

Dove il primo membro non ha dimensioni, essendo il rapporto di volumi, e così deve succedere per il secondo.

Allora K ha la stessa unità della pressione, che nel S.I. è N / m^2.

La velocità di propagazione del suono dipende dalla radice quadrata del rapporto fra K e la densità del mezzo.

$$c^2 = K \cdot \frac{P_o}{\rho_o}$$

Nella tabella sono riportati i valori di c per alcune sostanze.

Sostanza	**c [m/s]**
Aria	344
Anidride Carbonica	259
Alcool Etilico	1207
Acqua	1498
Rame	3750
Ferro	5120
Vetro	5170

6.3 Caratteristiche del suono:

- **Altezza**

L'altezza (o Acutezza) e' la caratteristica che determina l'elevazione di un suono dovuta alla rapidità delle vibrazioni che lo producono e ci consente di distinguere i suoni acuti da quelli gravi.

Essa cambia a seconda della frequenza a cui l'onda vibra.

Al crescere della frequenza corrisponde l'aumento dell'altezza.

Onde sonore aventi uguali ampiezza ma frequenza diversa generano suoni di diversa altezza.

- **Intensità**

L'intensità (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; un suono e' tanto più forte quanto maggiore e' l'ampiezza delle oscillazioni della sorgente che lo genera.

Tenendo presente il carattere tridimensionale delle onde sonore, l'intensità (I), viene definita:

$I = E / S \cdot t = \Pi / 4 \cdot \pi \cdot r^2$

Dove Π indica la potenza ($\Pi = E / t$) ed E indica la quantità di energia emessa dalla sorgente e trasportata dall'onda.

L'intensità si misura in Decibel (dB):

$dB = 10 \cdot \log_{10} (I / I_O)$

dove I_0 è il valore d'intensità per cui la sensazione fisiologica è nulla:

$$I_0 = 10^{-12} W/m^2$$

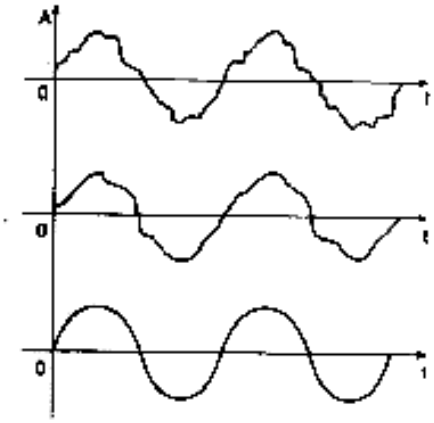
La scala delle intensità è logaritmica, perciò ogni incremento di 10 dB corrisponde ad un aumento in intensità di un fattore 10. Il fruscio delle foglie, infatti, e 10 volte più intenso dei mormorii.

- **Timbro**

Il timbro rappresenta la qualità del suono e dipende essenzialmente dalla forma d'onda dello stesso.

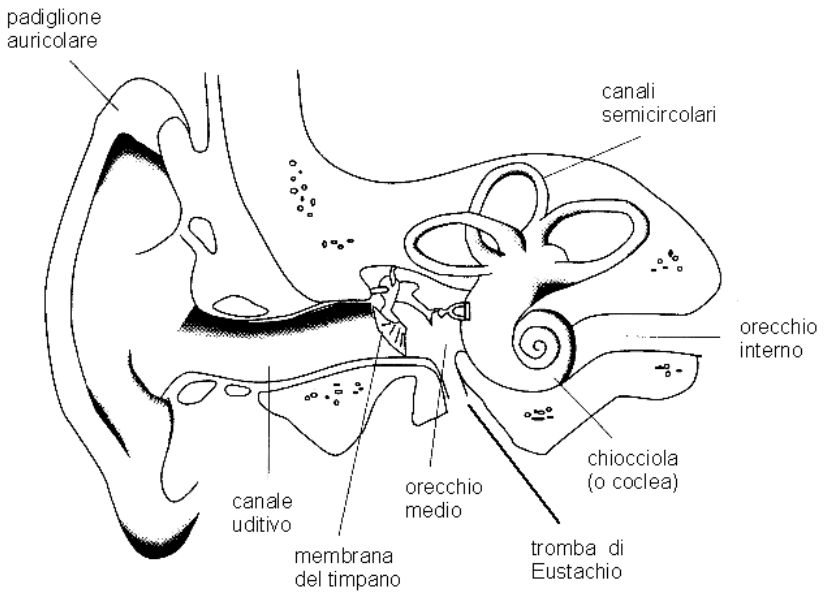
Permette di distinguere suoni emessi da sorgenti diverse, anche se essi hanno la stessa frequenza e la stessa intensità.

Ciascun strumento musicale ha un timbro diverso.



6.4 Struttura dell'orecchio

La fisiologia dell'orecchio umano è alla base della sensazione psicoacustica del suono; è infatti tramite l'orecchio che il suono come fenomeno fisico (oscillazioni delle molecole d'aria) viene filtrato e adattato alle capacità del cervello umano, trasformandolo in ciò che noi conosciamo come suono a livello percettivo.



Le parti principali dell'orecchio sono suddivise in orecchio esterno, orecchio medio e orecchio interno. L'orecchio esterno comprende il padiglione auricolare e il canale uditivo che termina con la membrana del timpano; l'orecchio medio è una cavità piena d'aria in cui si trovano tre ossicini detti martello, incudine e staffa. Questi tre ossicini collegano meccanicamente il timpano alla chiocciola (o coclea). Quest'ultima costituisce l'orecchio interno, che termina nel nervo a custico, diretto al cervello.

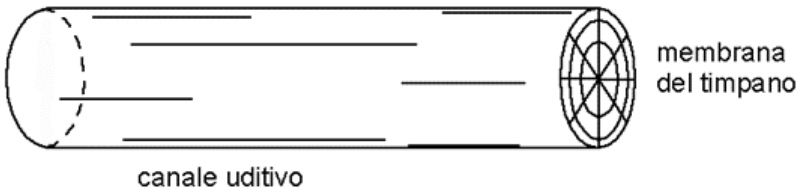
Il padiglione auricolare

Il padiglione auricolare raccoglie il suono e fornisce al cervello elementi per la valutazione della direzionalità del suono. Esso cioè sovrappone al suono stesso informazioni (frequenze) riguardo alla direzione dalla quale il suono è giunto al padiglione stesso. Ciò spiega la forma particolarissima del padiglione auricolare umano, che si distingue da quello degli altri animali.
Si può condurre un esperimento psicoacustico per dimostrare questa capacità: si ascolta con un auricolare (saltando cioè il filtro del padiglione, e perciò ingannando l'orecchio) la gamma di un'ottava di rumore casuale. Se regoliamo la frequenza centrale a 7,2 kHz, il rumore sembra provenire da una sorgente all'altezza dell'osservatore. Se la regoliamo a 8 kHz, il suono sembra provenire

da una sorgente posta in alto. Se invece regoliamo la frequenza centrale a 6,3 kHz, il suono sembra provenire dal basso.

Il canale uditivo

Il canale uditivo si può rappresentare in modo semplificato come un cilindro dal diametro di circa 0,7 cm e dalla lunghezza di circa 3 cm (la forma reale, ovviamente, non è perfettamente cilindrica). Al termine di questo tubicino c'è la membrana del timpano.

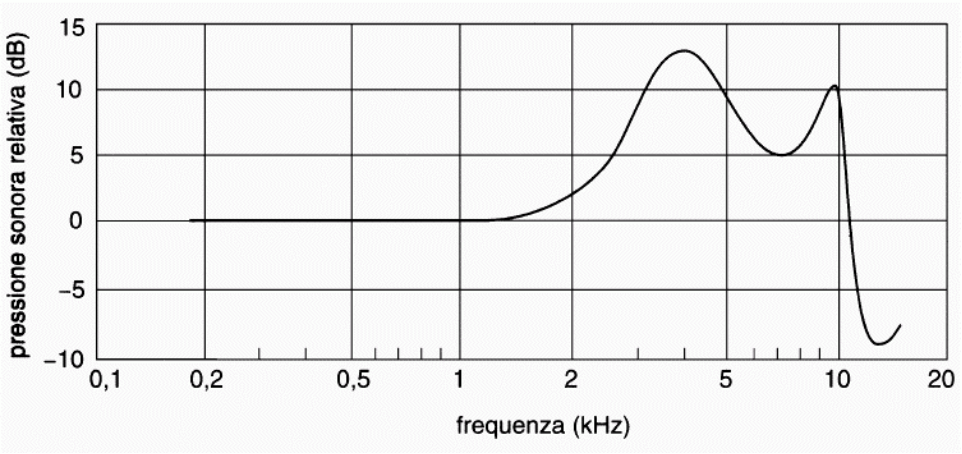


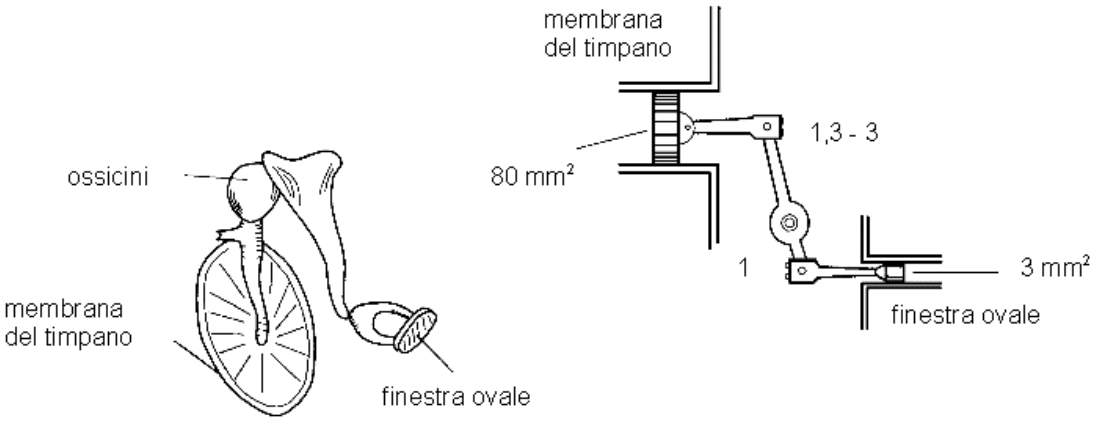
Le dimensioni del canale uditivo indicano che esso ha una frequenza di risonanza a 3000 Hz (lunghezza d'onda 12 cm, 4 volte la lunghezza del canale) in corrispondenza della quale si ha un picco nella risposta in frequenza dell'orecchio. Un picco secondario si ha a 9000 Hz. Il picco in risposta ai 3000 Hz indica che l'orecchio è specificamente "tarato" sulla voce umana.

L'orecchio medio

L'orecchio medio ha un compito molto particolare: trasmettere l'energia sonora da un mezzo rarefatto come l'aria ad un mezzo molto più denso come il fluido che riempie l'orecchio interno. L'energia sufficiente a causare le vibrazioni nell'aria sarebbe insufficiente per causare le stesse vibrazioni nel fluido dell'orecchio interno: il rapporto, assimilabile ad un rapporto d'impedenza, è di circa 4000:1. Assolvono allo scopo di "adattatori d'impedenza" i tre ossicini martello, incudine e staffa, i quali, con un complesso gioco di leve meccaniche, compensano la situazione di partenza sfavorevole, adottando cioè un sistema di trasmissione vantaggiosa. Nella figura che segue si vedono una raffigurazione

semplificata della struttura dell'orecchio medio ed una raffigurazione meccanica del sistema di leve.





L'orecchio interno

L'orecchio interno è costituito dalla chiocciola, uno strumento di alta ingegneria biologica il cui funzionamento non è ancora perfettamente chiaro. È la chiocciola che deve trasformare gli impulsi di pressione provenienti dall'orecchio medio in impulsi nervosi (elettrici) destinati al cervello, conservando tutte le informazioni (frequenza, intensità...) relative al suono.

Le onde stazionarie, attraverso un particolare sistema di stereocilia (terminali nervosi della membrana), si trasformano nell'informazione inviata al cervello per l'interpretazione del suono.

6.5 Livelli sonori e scala dei decibel:

I suoni percettibili dall'orecchio umano variano in un campo di frequenze comprese tra 20 e 20000 Hz e pertanto le corrispondenti lunghezze d'onda λ sono variabili tra 17 m (20 Hz) e 0,017 m (20000 Hz), in accordo con la relazione $c = \lambda f$.

La pressione p_e e l'intensità sonora I relative ai suoni udibili possono variare entro un campo molto esteso:

- suono appena udibile (soglia di percezione) a 1000 Hz $\Leftrightarrow$ $p_{e,min} \cong 2 \cdot 10^{-5}$ Pa
- suono intollerabile (soglia del dolore) a 1000 Hz $\Leftrightarrow$ $p_{e,max} \cong 20$ Pa.

Pertanto il rapporto $p_{e,min}$ / $p_{e,max}$ assume valori dell'ordine di 10^6. Per semplicità d'ora in avanti con p s'intenderà sempre la pressione efficace. La relazione che lega l'intensità alla pressione efficace è:

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{p^2}{\rho_o c} d\tau = \frac{1}{\rho_o c}\frac{1}{T}\int_0^T p^2 d\tau = \frac{p_e^2}{\rho_o \cdot c}$$

L'intensità media I è quindi proporzionale alla quantità $\frac{1}{T}\int_0^T p^2 d\tau$ indicata come p_e^2 e cioè al valore della pressione efficace elevato al quadrato.

La pressione efficace p_e viene anche detta valore quadratico medio di $p(\tau)$:

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2 d\tau}$$

Quindi si ottiene un rapporto tra i corrispondenti valori dell'intensità (soglia di percezione e del dolore) dell'ordine di 10^{12}. In conseguenza di questo fatto è opportuno utilizzare una scala logaritmica per contrarre il campo numerico di variazione delle grandezze utilizzate. Una qualunque grandezza W può essere definita sotto forma di scala di livello in decibel (dB) nel seguente modo:

$$L = 10 \cdot \mathrm{Log}\frac{W_1}{W_2} \qquad [dB]$$

Questa relazione esprime in forma logaritmica un rapporto tra due grandezze delle quali, al fine di definire una scala, una viene assunta come riferimento.

Se W_2 è il riferimento, la relazione precedente definisce il livello di W_1 rispetto a W_2 espresso in decibel. Il livello di 0 dB corrisponde evidentemente a $W_1 = W_2$.

I livelli che vengono più largamente utilizzati in acustica sono i seguenti:

Livello di potenza sonora:

$$L_\Pi = 10 \text{ Log } \frac{\Pi}{\Pi_{rif}} \qquad [dB]$$

potenza di riferimento $\Pi_{rif} = 10^{-12}$ W

Livello di intensità sonora:

$$L_I = 10 \text{ Log } \frac{I}{I_{rif}} \qquad [dB]$$

intensità sonora di riferimento $I_{rif} = 10^{-12}$ W/m^2

Livello di pressione sonora:

$$L_p = 10 \text{ Log } \frac{\mathbf{p^2}}{\mathbf{p^2_{rif}}} \qquad [dB]$$

$p_{rif} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa (soglia di udibilità a 1000 Hz di un individuo medio).

Dei tre livelli introdotti, quello più comunemente usato in acustica è il livello di pressione sonora, in quanto gli strumenti di misura utilizzati sono in genere sensibili alla pressione sonora. Se si considerano per l'aria i valori di riferimento $\rho = 1.17$ kg/m^3 e $c = 340$ m/s (aria a pressione atmosferica e a 20°C), si ottiene:

$p = p_{rif} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa

$$I = p^2 / \rho c = 1.006 \cdot 10^{-12}$$

e quindi

$I \cong I_{rif}$

Ipotizzando:

$\rho c \cong (\rho c)_{rif}$

risulta inoltre sempre sufficientemente verificata la:

$$L_p = 10 \ \mathrm{Log} \frac{p^2}{p_{rif}^2} \cong L_I = 10 \ \mathrm{Log} \frac{I}{I_{rif}}$$

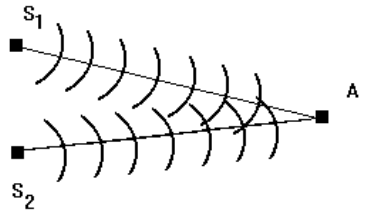
Nella seguente tabella si riportano i valori di pressione e i corrispondenti livelli in alcune tipiche situazioni.

p [Pa]	**L_p [dB]**	**Situazione**
$2\ 2 \cdot 10^{-4}$	220	Orologio da polso
$2\ 2 \cdot 10^{-3}$	440	Camera tranquilla
$2\ 2 \cdot 10^{-2}$	660	Automobile a 10 m
$2\ 2 \cdot 10^{-1}$	880	Radio volume elevato
22	1100	Clacson
220	140	Martello pneumatico (soglia del dolore)

Livelli di pressione sonora riferiti a situazioni tipiche

6.5.1 Somma di livelli sonori

I **livelli sonori**, a differenza d'intensità e pressione acustiche, non sono quantità additive. Esempio: si valuti il livello d'intensità sonora **I** nel punto **A** (vedi figura) ove con $\mathbf{S_1}$ ed $\mathbf{S_2}$ sono indicate due sorgenti sonore ciascuna delle quali produrrebbe nel punto **A** un livello sonoro rispettivamente pari a $\mathbf{L_{I1}}$ ed $\mathbf{L_{I2}}$ e che sia $\mathbf{L_{I1} = L_{I2} = 60\ dB}$.



L'intensità $\mathbf{I_1}$ in **A** prodotta dalla sorgente $\mathbf{S_1}$ si ottiene immediatamente dalla definizione di livello sonoro:

$$\mathbf{L_{I1} = 60 = 10\ Log \frac{I_1}{I_{rif}}}$$

da cui (per le note proprietà dei logaritmi):

$$\mathbf{\frac{I_1}{I_{rif}} = 10^{-6}}$$

Si ha:

$\mathbf{I_1 = 10^6\ I_{rif}}$

$\mathbf{I_2 = 10^6\ I_{rif}}$

$$\mathbf{L_I = 10\ Log \frac{I_1 + I_2}{I_{rif}} = 10\ Log \frac{10^6 I_{rif} + 10^6 I_{rif}}{I_{rif}}}$$

Il livello di intensità sonora risultante sarà:

$$\mathbf{L_I = 10\ Log\ (2 \cdot 10^6) = 10\ Log\ 2 + 10\ Log\ 10^6 = 3 + 60 = 63\ dB}$$

Pertanto, ad un raddoppio dell'intensità sonora in un punto del campo acustico, corrisponde un incremento di **3 dB** del livello corrispondente. Se $\mathbf{L_{I1} \neq L_{I2}}$ e la differenza tra i due livelli in valore assoluto è maggiore o uguale a 10, il contributo della sorgente più debole al livello sonoro complessivo è trascurabile.

Esempio:

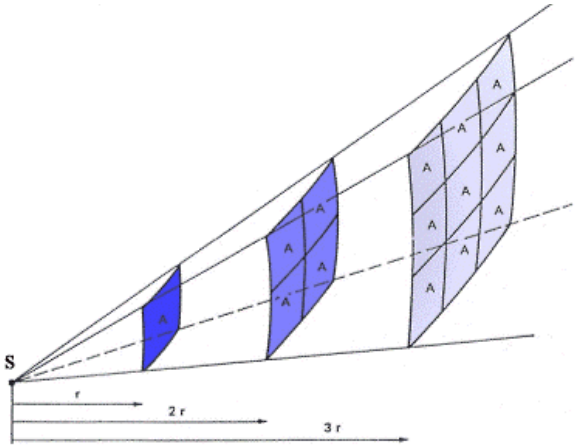
$\mathbf{L_{I1} = 60\ dB}$ e $\mathbf{L_{I2} = 50\ dB}$

risulta, sulla base di quanto visto precedentemente:

$$\mathbf{L_I = 10\ Log\ (I_1 + I_2)\ /\ I_{rif} = 10\ Log\ (10^6\ I_{rif} + 10^5\ I_{rif})\ /\ I_{rif} = 60.4\ dB}$$

6.5.2 Decadimento del livello sonoro con la distanza

Si supponga ora di considerare la sorgente precedentemente discussa a proposito della propagazione in campo libero. Trascurando i piccoli effetti d'assorbimento dell'energia acustica da parte dell'aria atmosferica, si può osservare che la potenza emessa si distribuisce sulla superficie di una sfera. La potenza acustica che si propaga è costante, a parte un piccolo assorbimento atmosferico del tutto trascurabile su brevi distanze, ma l'intensità sonora **I** diminuisce poiché la potenza acustica si distribuisce su una superficie sempre maggiore.



In riferimento a due valori della distanza $\mathbf{r_1}$ ed $\mathbf{r_2}$ risulta:

$$\mathbf{I_1 = \frac{\Pi}{4\pi r_1^2} \Rightarrow L_{I1} = 10\ Log\ \frac{I_1}{I_{rif}}} \qquad \mathbf{I_2 = \frac{\Pi}{4\pi r_2^2} \Rightarrow L_{I2} = 10\ Log\ \frac{I_2}{I_{rif}}}$$

La differenza tra i livelli sonori alle distanze r_1 ed r_2 è pertanto pari a:

$$\mathbf{\Delta L = 10\ Log\ \frac{I_2}{I_1} = 10\ Log\ \frac{r_1^2}{r_2^2}}$$

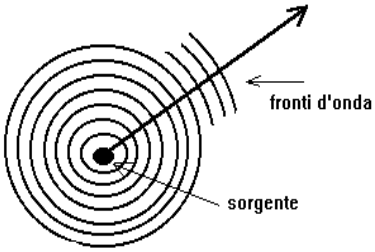
Ad esempio, se $\mathbf{r_2 = 2r_1}$ si ottiene immediatamente: $\mathbf{L_{I2} - L_{I1} = -\ 6\ dB}$

E cioè il *livello sonoro in campo libero diminuisce di* **6 dB** *in corrispondenza al raddoppio della distanza dalla sorgente.*

6.6 Propagazione del suono all'aperto e negli ambienti confinati:

Lo studio della propagazione del suono all'aperto presenta notevole importanza in campo urbanistico, ad esempio, per valutare il livello di pressione sonora prodotto da sorgenti presenti all'interno di una zona residenziale (industrie, linee ferroviarie, autostrade ecc.).
Anche lo studio della propagazione del suono all'interno degli ambienti confinati (acustica ambientale) presenta ovviamente grande importanza per l'Architetto, ad esempio nella progettazione di edifici, teatri sale. Aspetti importanti, sono dovuti alle *interazione delle onde sonore con le pareti delimitanti gli ambienti*, che determinano le *caratteristiche del campo sonoro all'interno degli ambienti*. Altro aspetto, di grande importanza pratica riguarda *la propagazione del suono attraverso elementi strutturali di separazione tra ambienti diversi*, ad esempio pareti, tramezzi, ecc. (isolamento acustico).

6.6.1 Propagazione in campo libero



In figura è rappresentata una **sorgente sonora puntiforme isotropa** che, pertanto, emette onde sonore secondo superfici sferiche.
Si noti che un elemento del fronte d'onda, a sufficiente distanza dalla sorgente (in assenza d'ostacoli), può essere considerato come un'onda piana che si muova in linea retta, la cui propagazione può essere rappresentata graficamente mediante raggi sonori normali ai fronti d'onda stessi, come rappresentato nella precedente figura.

6.6.2 Propagazione del suono in presenza di ostacoli

Quando un'onda sonora interagisce con ostacoli si verificano alcuni importanti fenomeni dipendenti dalla lunghezza d'onda del suono e dalle dimensioni dell'ostacolo: questi sono la diffrazione, la riflessione e la rifrazione.

Diffrazione

Si supponga di considerare inizialmente onde marine anziché sonore. Si consideri, da punto di vista qualitativo, la situazione rappresentata nelle figure a) e b) e cioè la diga di un porto investita da onde di un mare in tempesta.

Se nella diga è presente un'apertura di ampiezza **d,** il comportamento, oltre la diga, delle onde (lunghezza d'onda λ) risulta notevolmente diverso in relazione al rapporto $\mathbf{d/\lambda}$. Quando il rapporto $\mathbf{d/\lambda}$ è numericamente grande e cioè l'apertura **d** è grande rispetto alla lunghezza d'onda λ la situazione si presenta come rappresentato in figura (a), mentre nel caso opposto come rappresentato nella figura (b).

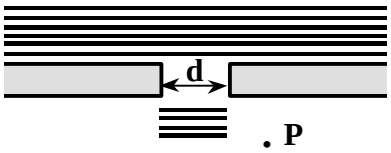


Figura a

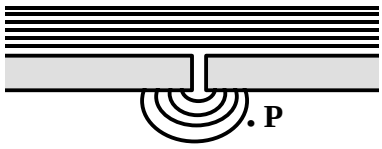
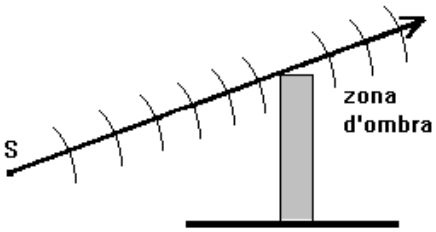


Figura b

Nel **primo caso** (**d »** λ) la propagazione delle onde oltre l'apertura può essere descritta geometricamente in modo molto semplice mediante raggi vettori. In particolare la diga proietta "*un'ombra*" pressoché netta come rappresentato nella figura (a), per cui nel punto P le acque possono essere considerate calme.

Nel **secondo caso** (**d** $\cong \lambda$**)** ove le dimensioni geometriche dell'apertura sono paragonabili alla lunghezza d'onda λ delle onde incidenti, l'apertura stessa diventa punto di origine di onde sferiche, per cui non esiste più un'ombra di calma significativa esercitata dalla diga: le perturbazioni ondose aggirano l'ostacolo.

Questi fenomeni di diffrazione sono comuni a tutti i tipi di onde e pertanto si verificano anche nel caso delle onde sonore. Nella situazione rappresentata in figura, che si riferisce al caso in cui la lunghezza

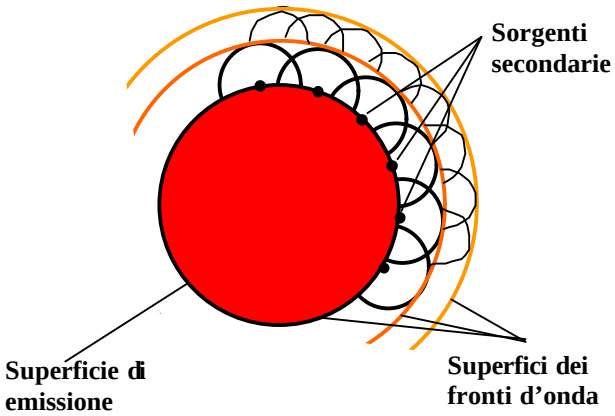


d'onda λ di un'onda sonora sia molto più piccolo delle dimensioni dell'ostacolo, la propagazione delle onde sonore viene ad essere nettamente delimitata con formazione della zona d'ombra ove il suono non è percepibile.

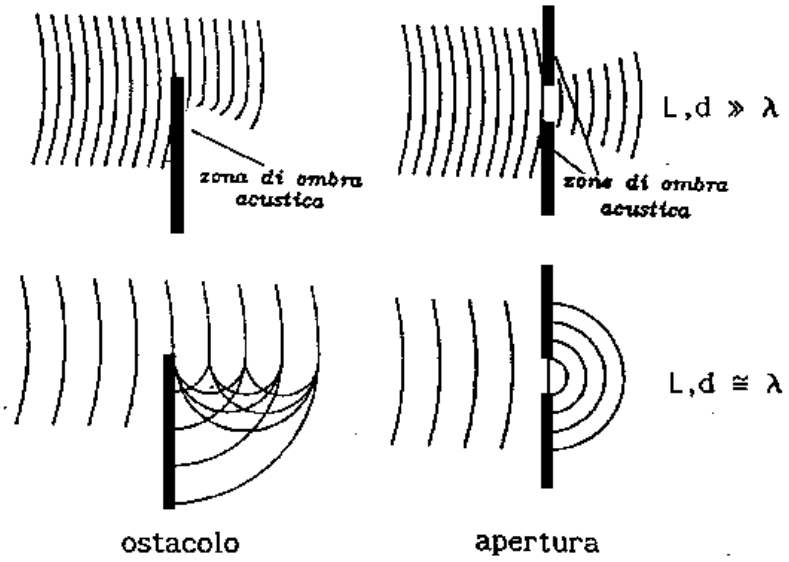
In genere, almeno per i suoni che rientrano nel campo medio-basso delle frequenze udibili, quando cioè le lunghezze d'onda risultano paragonabili alle dimensioni geometriche dell'ostacolo, la zona d'ombra risulta molto meno definita, rispetto al caso rappresentato in figura, proprio in conseguenza del fenomeno della diffrazione.

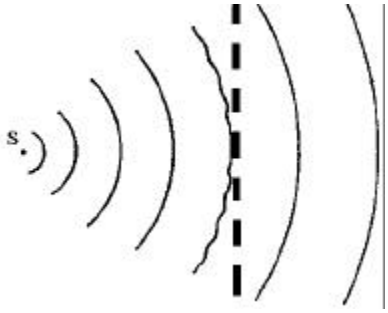
Quando la diffrazione condiziona la propagazione delle onde acustiche in modo apprezzabile, lo studio della propagazione non può più essere condotto tracciando linee e segmenti (approccio tipico **dell'acustica geometrica**) anche se può essere ancora svolto mediante un procedimento grafico (**principio di Huygens**). In particolare ogni punto della zona interessata alla propagazione delle onde può essere considerato una sorgente puntiforme secondaria emettente fronti d'onda sferici.

L'inviluppo di questi formerà il fronte d'onda complessivo, ciascun punto del quale a sua volta può essere ancora considerato una sorgente puntiforme; un esempio di questo tipo di costruzione è rappresentato in figura.



Applicando questo tipo di procedimento ad un ostacolo su cui incidano onde sonore, si potranno ottenere, a seconda della lunghezza d'onda delle onde sonore, in relazione alle dimensioni dell'ostacolo (ove ad esempio **L** rappresenta l'altezza di un muro e **d** l'ampiezza di un'apertura nel muro stesso), comportamenti diversi, come illustrato in figura.

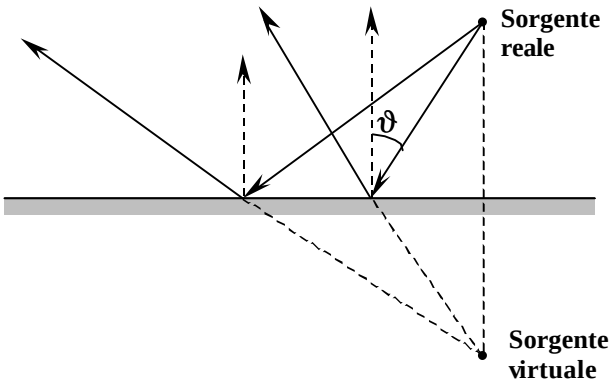




Se poi infine un'onda sonora interagisce con ostacoli le cui dimensioni fisiche siano decisamente inferiori alla lunghezza d'onda, l'ostacolo può essere considerato trasparente, in altre parole è come se non esistesse.

Riflessione

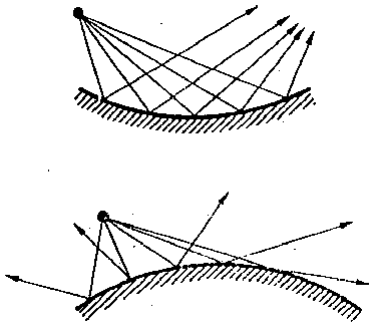
Se le dimensioni dell'ostacolo sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda sonora e le irregolarità presenti sulla superficie sono molto piccole sempre rispetto alla lunghezza d'onda, e cioè la superficie stessa appare "liscia", le leggi che descrivono la riflessione delle onde sonore sono simili a quelle che regolano la riflessione delle onde elettromagnetiche e luminose.



In particolare, come rappresentato in

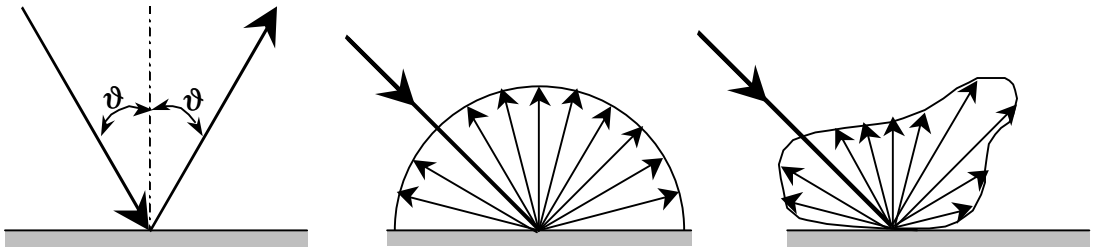
figura, sempre mediante la schematizzazione dei raggi sonori, il raggio riflesso forma lo stesso angolo ϑ con la normale alla superficie del raggio incidente e i due raggi giacciono sullo stesso piano.

Si parla quindi di riflessione speculare o regolare. Si osservi come l'onda riflessa si propaghi come se fosse emessa da una sorgente virtuale posizionata, simmetricamente rispetto alla sorgente reale, da parte opposta della superficie riflettente. In questi casi, in cui λ è molto minore delle dimensioni lineari dell'ostacolo, si possono studiare i fenomeni di propagazione mediante i semplici metodi grafici dell'acustica geometrica.



È interessante considerare il caso di una riflessione regolare su superfici lisce rispettivamente concave o convesse. Si osservi come nel primo caso si verifichi una concentrazione dei fronti d'onda, mentre nel secondo caso si abbia una loro dispersione su un'area più ampia.

Se la superficie dell'ostacolo non risulta sufficientemente liscia, rispetto alla lunghezza d'onda delle onde sonore incidenti, la riflessione non è più di tipo regolare, bensì diffusa, come nell'esempio schematizzato in figura.



speculare **diffusa** **generale**

Nei riguardi della riflessione è ancora opportuno ricordare che il comportamento delle superfici reali risulta sempre intermedio tra le due situazioni limite già note e cioè tra la riflessione speculare su una superficie liscia e la riflessione perfettamente diffusa, qualora la superficie risulti opportunamente "rugosa". Si precisa che ovviamente i termini "liscia" e "rugosa"

vanno intesi in senso relativo e cioè in relazione alla lunghezza d'onda delle onde sonore.

Un esempio di riflessione delle onde sonore e' il fenomeno dell'ECO che si verifica quando un osservatore emette un suono trovandosi di fronte ad un ostacolo in grado di riflettere le onde incidenti, per cui percepisce lo stesso suono due volte (l'onda diretta e quella riflessa).

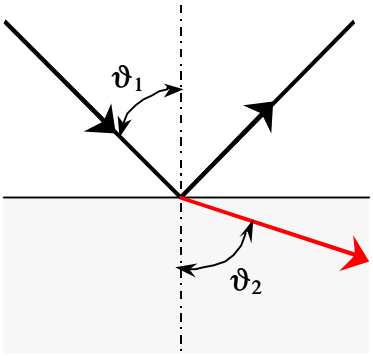
Il verificarsi dell'eco è comunque vincolato alla capacità dell'orecchio umano di separare due impulsi sonori in successione .Questa capacità si chiama "potere separatore "ed e' dell'ordine di 1/10 di secondo.

Poichè la velocità del suono nell'aria e' circa 340 m/s, in 1/10 di secondo il tratto percorso e' 34 metri, per cui il fenomeno ha luogo solo quando la parete riflettente e' posta ad una distanza minima di 17 m dall'osservatore, tenuto conto che il suono deve percorrere il cammino in andata e ritorno, prima di arrivare di nuovo all'orecchio.

Se questa condizione non e' soddisfatta si ha il fenomeno del RIMBOMBO (sovrapposizione di suoni).

- **Rifrazione**

Un'onda sonora, rappresentata mediante un raggio sonoro, in conseguenza del passaggio tra un mezzo ed un altro, subisce anche un fenomeno di rifrazione, intendendo per questo una deviazione dei raggi sonori stessi, come rappresentato in figura.



La rifrazione sonora segue una legge analoga a quella dell'ottica geometrica, ovvero:

$$\frac{\mathbf{sen}\,\vartheta_1}{\mathbf{sen}\,\vartheta_2} = \frac{\mathbf{c_1}}{\mathbf{c_2}}$$

ove c_1 , c_2 rappresentano le velocità del suono nei due mezzi. Fenomeni di rifrazione possono verificarsi nel passaggio tra due strati d'aria a diversa temperatura.

6.6.3 Propagazione sferica, emisferica e fattore di direttività.

Come visto, in caso di ***sorgente isotropa***, indicando con Π la potenza sonora della sorgente, l'intensità I alla distanza r dalla sorgente stessa è data da:

$$I = \frac{\Pi}{4\pi \cdot r^2}$$

Se L_π (livello di potenza sonora riferito a $\Pi_{rif} = 10^{-12}$ W), vale:

$$L_\pi = 10 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{\Pi}{\Pi_{rif}}\right)$$

si ottiene che il livello di pressione sonora L_p è dato da:

$$L_p = 20 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{p}{p_{rif}}\right) \cong 10 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{I}{I_{rif}}\right) = 10 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{\Pi}{\Pi_{rif}}\right) - 10 \cdot \mathrm{Log}(4\pi \cdot r^2)$$

Pertanto il livello di pressione sonora $\mathbf{L_p}$ a distanza **r** è espresso dalla relazione seguente:

$\mathbf{L_p = L_\pi - 20\ Log\ r - 11}$

Osservazione: questa relazione è in accordo con il già noto risultato, che ad ogni raddoppio della distanza, L_p diminuisce di 6 dB.

In caso di ***sorgente non isotropa***, che presenta caratteristiche direzionali in una generica direzione, si usa introdurre, come già osservato il fattore di direzionalità **Q = f(direzione)** $\neq$ 1.

Si ricorda che **Q** può essere inteso come *rapporto tra l'intensità sonora in un punto ad una certa distanza dalla sorgente in esame e l'intensità sonora che si sarebbe avuta nello stesso punto nel caso di sorgente sonora isotropa* (si suppone, ovviamente, che entrambe le sorgenti emettano la stessa potenza sonora):

$$Q = \frac{p_e^2}{p_{e,rif}^2}$$

L'intensità **I**, alla distanza **r** risulta esprimibile da:

$$I = \frac{Q \cdot \Pi}{4\pi \cdot r^2}$$

Inoltre ponendosi $S_o = 1\ m^2$:

$$I_{rif} = \frac{\Pi_{rif}}{S_o}$$

Allora, il livello di pressione sonora **L_p**, *se la sorgente non è isotropa*, può essere espresso:

$$L_p = 10 \cdot Log\left(\frac{I}{I_{rif}}\right) = 10 \cdot Log\left(\frac{\Pi}{\Pi_{rif}}\right) - 10 \cdot Log(4\pi \cdot r^2) + 10 \cdot LogQ + 10LogS_o$$

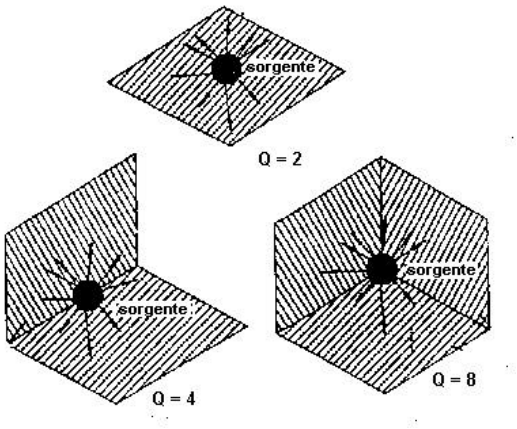
Pertanto il livello di pressione sonora **L_p** a distanza **r** è espresso dalla relazione seguente:

$L_p = L_\pi$ - 20 Log r - 11 +10Log(Q)

Osservazione 1: in generale il fattore Q è funzione della direzione; ad esempio un altoparlante emette onde sonore in determinate direzioni piuttosto che in altre.

Osservazione 2: qualora una sorgente isotropa sia posta in prossimità di una parete perfettamente riflettente, essa indirizza verso il semispazio libero una potenza acustica doppia di quanto farebbe in campo libero totale. Per tener conto di questa riflessione si può attribuire alla sorgente un fattore di direzionalità Q = 2 per cui ad esempio si ottiene:

$L_p = L_\pi$ - 20 Log r - 8



Altre situazioni caratteristiche che richiedono Q > 2 sono riportate in figura. È opportuno osservare che anche in questi casi il livello di pressione sonora diminuisce di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza.

La variazione di livello di pressione sonora $\Delta L_{p,div}$ che, al variare della distanza r dalla sorgente sonora, può prevedersi sulla base della precedente relazione viene detta *attenuazione per divergenza delle onde sonore*.

6.6.4 Propagazione a simmetria cilindrica

Come rappresentato in figura le onde sonore prodotte da questo tipo di sorgente (lineare) formano una serie di superfici cilindriche aventi per asse la sorgente stessa. I fronti d'onda non sono più, cioè, sferici, bensì cilindrici.

Un tipico esempio di **sorgente lineare** è fornito da una strada con densità di traffico uniformemente distribuita su di essa.

Se si indica con **Π** la potenza acustica emessa da una sorgente lineare molto lunga emettente in tutto lo spazio circostante, si può osservare come questa, a distanza **r** dalla sorgente sonora, venga a distribuirsi su una superficie cilindrica di area **2 π r L**.

Pertanto risulta:

$$I = \frac{\Pi}{2\pi r L} = \frac{\Pi_L}{2\pi r}$$

ove $\Pi_L = \frac{\Pi}{L}$ indica la potenza emessa per unità di lunghezza della sorgente.

Ovviamente nel caso che la sorgente sonora lineare si trovi in prossimità del terreno e nel caso che questo possa considerarsi come perfettamente riflettente la potenza acustica nel semispazio libero risulterà doppia e pertanto, analogamente al caso precedentemente discusso per la simmetria sferica, si può considerare anche in questo caso un fattore di direzionalità **Q = 2** ottenendo:

$$I = \frac{Q \cdot \Pi_L}{2\pi \cdot r} = \frac{\Pi_L}{\pi \cdot r}$$

Indicando ora con $\mathbf{L_{\pi L}}$ il livello di potenza sonora riferito a $\mathbf{\Pi_{rif,L} = 10^{-12}\ W}$, e ponendosi $\mathbf{L_o} = \mathbf{1}$ m:

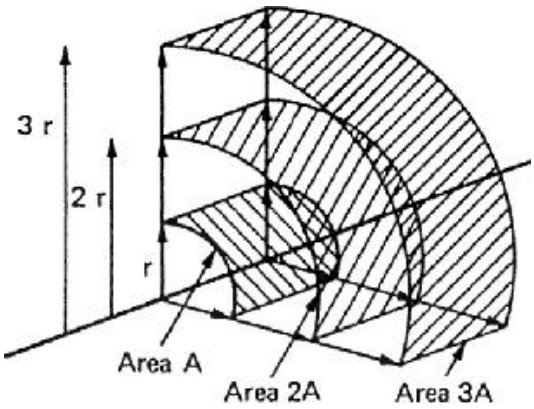
$$I_{rif} = \frac{\Pi_{rif}}{L_o}$$

si ottiene che il livello di pressione sonora $\mathbf{L_p}$ è dato da:

$$L_p = 20 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{p}{p_{rif}}\right) = 10 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{I}{I_{rif}}\right) = 10 \cdot \mathrm{Log}\left(\frac{\Pi_L}{\Pi_{rif}}\right) - 10 \cdot \mathrm{Log}\pi \cdot r + 10 \cdot \mathrm{Log}(L_o)$$

Pertanto il livello di pressione sonora $\mathbf{L_p}$ a distanza **r** è espresso dalla relazione seguente:

$$\mathbf{L_p = L_{\pi L} - 10 \, Log \, r - 5}$$



Osservazione: nel caso di propagazione in simmetria cilindrica, la variazione di livello di pressione sonora $\mathbf{\Delta L_{p,div}}$ e cioè l'*attenuazione per divergenza delle onde sonore* risulta minore del caso precedente (sorgente sonora a simmetria sferica).

Il livello di pressione sonora L_p decade infatti col crescere della distanza r dalla sorgente più lentamente (-3 dB per ogni raddoppio della distanza r) di quanto previsto per propagazione sferica in campo libero (-6 dB per ogni raddoppio della distanza r).

Allontanandosi da un'autostrada (sorgente lineare), il livello sonoro scende di 3dB per un raddoppio della distanza mentre da una fabbrica (sorgente concentrata) il livello sonoro cala di 6dB sempre per tale raddoppio.

6.7 Effetti d'attenuazione del livello sonoro

In generale si osserva che all'aperto (sempre ovviamente in assenza d'ostacoli, ad esempio muri, edifici, rilievi naturali, ecc.) il livello sonoro decade con **r** più rapidamente di quanto previsto da queste relazioni. Si parla d'effetti d'attenuazione in eccesso rispetto alla sola divergenza delle onde sonore. Le cause principali dell'eccesso d'attenuazione sono costituite da:

- parziale assorbimento dell'energia sonora delle onde da parte dell'aria atmosferica (in genere può essere sensibile solo se le distanze in gioco sono rilevanti);
- presenza di vegetazione (cespugli, alberi) tra la sorgente ed il ricevitore;
- effetti di natura metereologica, quali presenza di vento, gradienti di temperatura presenti nell'atmosfera, effetti di turbolenza atmosferica, ecc...

Pertanto, qualora s'intenda valutare il livello di pressione sonora in un punto all'aperto occorrerà correggere il valore $\mathbf{L_p}$ calcolato tenendo in debito conto le altre attenuazioni prima accennate. È utile osservare che queste attenuazioni di livello sonoro sono anche fortemente dipendenti dalla frequenza delle onde sonore perciò è opportuno effettuare questo calcolo per le varie bande d'ottava.

6.7.1 Attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico

L'assorbimento atmosferico è dovuto alla trasformazione di parte dell'energia cinetica assunta dagli strati d'aria alternativamente compressi e rarefatti durante il propagarsi delle onde sonore in calore. Indicativamente, per suoni la cui frequenza sia compresa in un'ottava con frequenza di centro banda $\mathbf{f_c}$, l'entità di quest'effetto risulta dipendere dalla temperatura **T** e dall'umidità relativa **i** dell'aria atmosferica e risulta significativa a distanze notevoli soprattutto per le bande di maggior frequenza $\mathbf{f_c}$.

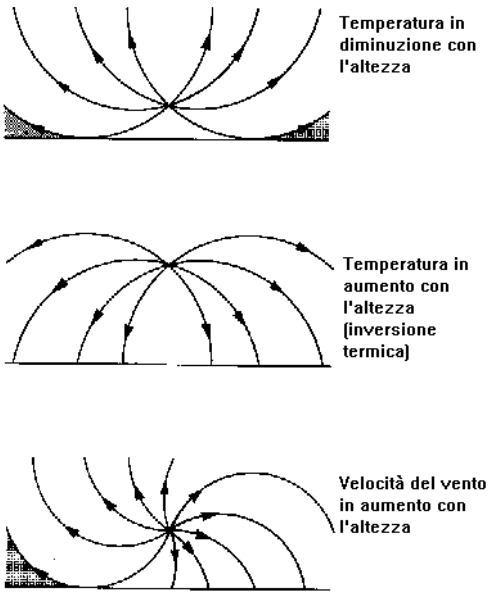
Pertanto lo spettro acustico di un rumore complesso, a distanza può essere notevolmente alterato, poiché le ottave a frequenza $\mathbf{f_c}$ maggiore sono state assorbite in misura molto maggiore.

6.7.2 Attenuazione in presenza di vegetazione

Quando la sorgente è posta in prossimità del terreno si verifica, a distanza, un'apprezzabile attenuazione del livello sonoro che aumenta con la distanza e con la frequenza e risulta sensibile per distanze superiori a qualche decina di metri, particolarmente per frequenze **f > 500 Hz**.

6.7.3 Attenuazioni conseguenti ad eventi metereologici

La presenza di vento, la cui velocità rispetto al terreno, in generale, dipende dalla quota e/o dalle differenze di temperatura dell'aria, può influenzare in modo sensibile la propagazione a distanza del suono. Se i raggi sonori risultano deviati verso l'alto si potranno verificare zone d'ombra acustica in prossimità del terreno, nel caso opposto (deviazione verso il basso) si verificheranno fenomeni di concentrazione e quindi di rinforzo dei fronti d'onda. In assenza di vento questi effetti sono provocati dalla presenza di gradienti verticali di temperatura dell'aria.



Come, infatti, ricordato in precedenza, la velocità del suono **c** nell'aria aumenta al crescere della temperatura. Pertanto quando la temperatura dell'aria diminuisce con la quota (caso più comune) i raggi sonori saranno deviati verso l'alto per rifrazione tra successivi strati d'aria, con possibilità di formazione di zone d'ombra acustica in prossimità del terreno. Talvolta però, può anche verificarsi il caso opposto, (deviazione verso il basso) con fenomeni di concentrazione e quindi di rinforzo dei fronti d'onda a livello del suolo. Questo fenomeno può verificarsi in condizioni meteorologiche particolari dette d'*inversione termica*. Ad esempio al tramonto di

giornata serena quando si verifica un rapido raffreddamento del terreno a causa dello scambio per irraggiamento da parte di questo con la volta celeste lo strato d'aria immediatamente sovrastante il terreno può risultare più freddo degli strati d'aria a quota più elevata.

Ovviamente la casistica si complica qualora si verifichino contemporaneamente sia gradienti verticali di velocità del vento sia di temperatura.

6.7.4 Attenuazioni in presenza di barriere

Qualora, tra la sorgente sonora ed il punto di rilevazione del livello di pressione sonora, siano presenti ostacoli di varia natura e cioè barriere artificiali o naturali (muri, edifici, dossi, colline, ecc.), si possono verificare ulteriori sensibili attenuazioni del livello sonoro. Particolare interesse tecnico, anche a fini urbanistici, presenta il controllo della propagazione delle onde sonore emesse da svariate sorgenti mediante la messa in opera di barriere artificiali.

In questi casi, anche se le onde sonore non possono raggiungere direttamente nei punti protetti dalle barriere, l'**ombra acustica** della barriera non risulterà mai "**netta**" in conseguenza dei già citati fenomeni di diffrazione.

L'attenuazione fornita dalla barriera risulta, pertanto, efficace in corrispondenza soprattutto ad elevate frequenze, mentre le onde sonore a maggiore lunghezza d'onda risulteranno meno attenuate. Si può osservare, pertanto, che una barriera interposta tra una sorgente ed un rilevatore modifica anche, almeno nel punto d'osservazione, lo spettro del rumore emesso dalla sorgente.

6.8 Acustica architettonica

All'interno di ambienti, a differenza di quanto si verifica all'aperto, pervengono all'orecchio dell'ascoltatore non solo onde sonore provenienti direttamente dalla sorgente, ma anche altri innumerevoli contributi riflessi e diffratti dai corpi presenti e delle strutture perimetrali (pareti, soffitti, ecc.).

Oltre a ciò i suoni stessi sono quasi sempre di natura fortemente transitoria; si pensi ad esempio alle parole pronunciate da una persona, all'esecuzione di musica. Pertanto il comportamento delle onde sonore all'interno degli ambienti risulta alquanto complesso trattandosi di fenomeni variabili sia nel tempo sia nello spazio. In generale, per studiare queste problematiche si possono utilizzare differenti metodologie:

- *metodo semplice* dell'acustica geometrica: si riferisce allo studio dei percorsi dei raggi sonori via via riflessi dalle superfici delimitanti l'ambiente, nell'ipotesi (semplificativa appunto) di riflessione speculare dei raggi sonori;
- *metodo rigoroso*: analizza la propagazione dei suoni dal punto di vista ondulatorio, considerando l'ambiente come un sistema complesso ove possono coesistere un gran numero di onde stazionarie di diverse lunghezze d'onda λ (modi di vibrazione).

In questo secondo caso è necessario risolvere l'*equazione generale di propagazione delle onde*:

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right)=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2}$$

Ad esempio nel caso di un locale rettangolare con pareti riflettenti la soluzione analitica mostra come nell'ambiente si vengono a formare un gran numero di onde stazionarie, con λ pari a 1/2, 1/3, 1/4,...1/n di una delle dimensioni dei lati o delle varie diagonali.

Risulta pertanto evidente che, qualora suoni di diverse λ vengano emessi all'interno di un ambiente, alcuni di questi e cioè quei suoni la cui λ risulti, ad esempio, esattamente pari 1/2, 1/3, 1/4,...1/n di una delle dimensioni del locale si comporteranno diversamente da tutti gli altri suoni, ad esempio

persistendo per maggior tempo nell'ambiente quando la sorgente sonora abbia cessato di funzionare.

In genere, non si può prescindere da un'analisi che tenga in opportuno conto la natura ondulatoria del suono, quando l'ambiente è molto piccolo o quando la frequenza del suono bassa. Si può ancora ricordare che quando tra i lati dell'ambiente esistono *rapporti numerici esatti e semplici* (ad esempio 2:1, 3:2, ecc.) possono verificarsi effetti di rinforzo di particolari frequenze in conseguenza del fatto che, ad esempio, le onde stazionarie dovute ad una coppia di pareti opposte vengano a coincidere con quelle dovute ad un'altra coppia di pareti. È quindi opportuno far sì tra le dimensioni, ad esempio di un ambiente a forma parallelepipeda di lati A, B e C non sussistano rapporti numerici esatti.
Il semplice (e normalmente usato) approccio geometrico potrà risultare in buon accordo con la realtà soltanto quando la frequenza delle onde sonore in esame sia risulti sufficientemente elevata (e cioè λ sufficientemente ridotta rispetto alle dimensioni della sala e delle superfici ove si verificano le riflessioni).

Quando queste condizioni non saranno verificate, si dovrà tener opportuno conto della natura ondulatoria delle onde sonore e cioè delle onde stazionarie che si formano nell'ambiente e degli effetti di diffrazione.

A giustificazione circa l'utilizzo, molto diffuso, del semplice metodo dell'acustica geometrica, si può osservare che, qualora il comportamento delle onde sonore in ogni punto di un ambiente e la loro evoluzione temporale, fossero noti sulla base delle metodologie di calcolo più rigorose, il giudizio sulle *qualità acustiche* dell'ambiente presenta sempre e comunque una certa variabilità dipendente dal gusto personale d'ogni ascoltatore.

In seguito si discuterà solo del criterio principale per la caratterizzazione delle sale e cioè del *tempo convenzionale di riverberazione*, anche se molte altre caratteristiche fisiche e geometriche della sala intervengono a determinare il complesso comportamento delle onde sonore in un ambiente.

Ad esempio, un oratore parlerà d'intelligibilità della parola, un musicista parlerà di intimità, calore, ecc., rilevando come la qualità di un'esecuzione musicale possa essere esaltata o resa scadente non solo in dipendenza dal

tempo convenzionale di riverberazione, ma anche da altre caratteristiche della sala.

Una progettazione che tenga conto delle problematiche acustiche degli ambienti, se risulta già di notevole importanza per locali di piccole e medie dimensioni (aule, sale da spettacolo, conferenze, auditorium, ecc.), diviene ovviamente essenziale e necessariamente più complessa e sofisticata nel caso per ambienti di maggiore rilevanza (teatri, sale da concerto ecc.).

Fattori di riflessione ed assorbimento

In modo simile a quanto già descritto per le onde elettromagnetiche, anche per un'onda sonora d'intensità $\mathbf{I_i}$ (vedi figura) incidente su una lastra si definiscono **fattori di riflessione**, **assorbimento** e **trasmissione**. Questi fattori, in generale variano con:

- *angolo di incidenza delle onde sonore*;
- *frequenza delle onde sonore*.

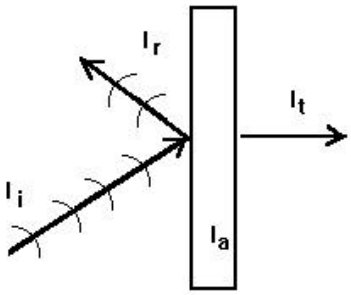
Per le applicazioni più comuni nell'acustica tecnica è in genere sufficiente riferirsi solo a valori medi per le varie bande d'ottava o a terzi d'ottava, specificando talvolta anche le condizioni d'incidenza delle onde sonore.

In questa ipotesi si può porre:

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{I_r}}{\mathbf{I_i}}$$

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{I_a}}{\mathbf{I_i}}$$

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{I_t}}{\mathbf{I_i}}$$



ove:

$\mathbf{I_r}$,$\mathbf{I_a}$, $\mathbf{I_t}$ indicano le *intensità relative rispettivamente all'onda riflessa, assorbita* (nello spessore del materiale) e *trasmessa* (aldilà della lastra).

Tra i tre fattori esiste, ovviamente, la seguente relazione:

$$\mathbf{a + r + t = 1}$$

ad esempio, se la lastra è perfettamente riflettente (**r = 1**), risulterà anche:

$$\mathbf{a = t = 0}$$

È opportuno precisare che, spesso, interessa solo l'energia acustica riflessa verso l'ambiente per cui si definisce fattore di assorbimento apparente **a'** :

a' = a + t

per cui si scrive abitualmente:

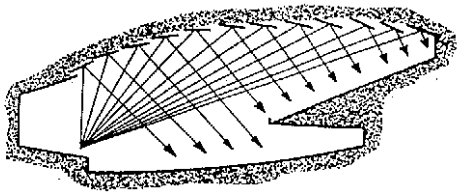
a' + r = 1

Per semplicità, d'ora in avanti s'indicherà il fattore d'assorbimento apparente **a'** semplicemente con **a**, scrivendo quindi:

a + r = 1

Oltre a ciò, è opportuno ricordare che se le superfici delimitanti l'ambiente sono sufficientemente lisce ed estese (ovviamente rispetto a λ del suono incidente) i raggi sonori incidenti saranno riflessi specularmente mentre nel caso opposto (superfici poco estese, presenza di profili irregolari, ect.) anche a causa dei citati fenomeni di diffrazione la riflessione avverrà in forma più o meno diffusa.

Ad esempio, come rappresentato in figura, la riflessione da parte di superfici lisce (specchi acustici) può essere utilizzata nella progettazione delle sale al fine di meglio distribuire le onde sonore evitando la formazione di zone d'ombra in alcune zone dell'ambiente.



In generale la riflessione speculare invece su superfici convesse, comporta una dispersione dei raggi sonori mentre, al contrario, su superfici concave si possono verificare fenomeni di concentrazione dei raggi sonori in particolari punti dell'ambiente.

Infatti le prime (superfici convesse) potranno essere utilizzate al fine di indebolire le riflessioni indesiderate disperdendo i relativi raggi sonori mentre le seconde (concave) possono spesso provocare problemi d'eccessiva concentrazione dei raggi sonori in alcuni punti dell'ambiente. In generale per evitare questo occorrerà prestare particolare attenzione alle superfici concave caratterizzate da un raggio di curvatura dello stesso ordine delle dimensioni dell'ambiente.