

# ACUSTICA

1. La fisica del suono
2. Danni da rumore
3. Strumenti di misura
4. Strumenti di previsione
5. Legislazione

a cura di Marco Tosco

# 1. LA FISICA DEL SUONO



# 1. Cos'è l'acustica?

Studio delle onde in mezzi elastici (solidi, liquidi o gassosi), in particolare:

- della loro generazione
- della loro propagazione
- della loro ricezione



*Infrasuoni*

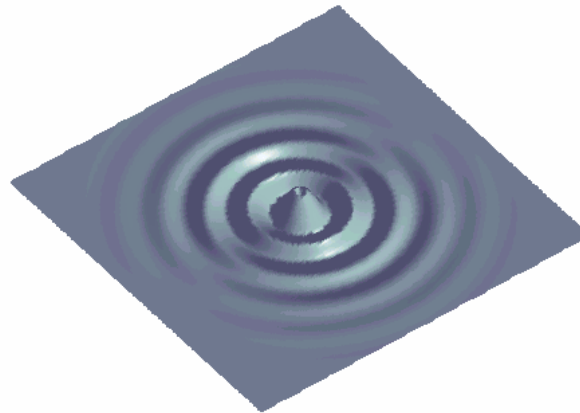
*Suoni*

*Ultrasuoni*

# 1. Cos'è un'onda?

Una perturbazione di un mezzo

ELASTICITA'



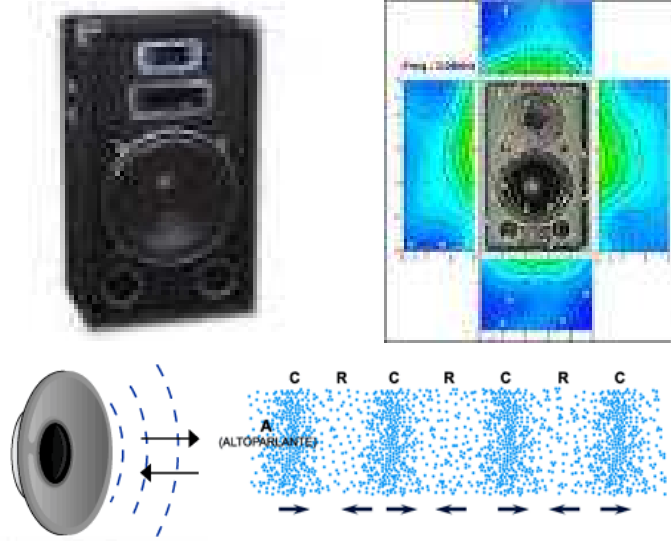
INERZIA

oscillazione attorno  
alla posizione di equilibrio

con una massa  
per trasferire energia  
meccanica

**La perturbazione si propaga  
la materia sta ferma !!**

# 1. Come si propaga un'onda?

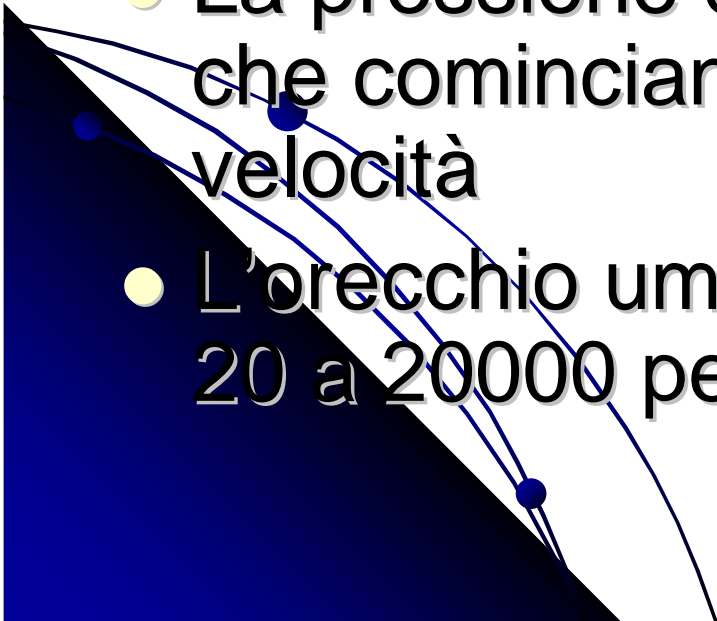


- Cerchi concentrici
- Moto oscillatorio circolare verticale

- Semisfere concentriche
- Moto oscillatorio rettilineo orizzontale

Il suono può viaggiare attraverso tutti i materiali: gas, liquidi e solidi ma non può propagarsi nel VUOTO!!!!

- L'aria attorno a noi ha pressione barometrica abbastanza costante
- Il suono è una minuscola fluttuazione di pressione
- La pressione comprime le molecole d'aria che cominciano a muoversi e acquistano velocità
- L'orecchio umano capta le fluttuazioni da 20 a 20000 per secondo



# 1. Come si produce un suono?



**Vibrazione di un oggetto solido ed elastico**

la vibrazione viene trasmessa alle particelle di aria circostante

le oscillazioni generano compressioni e rarefazioni

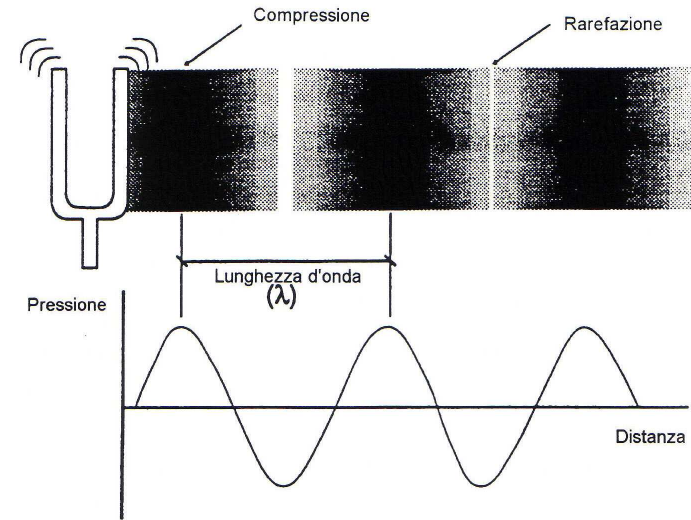
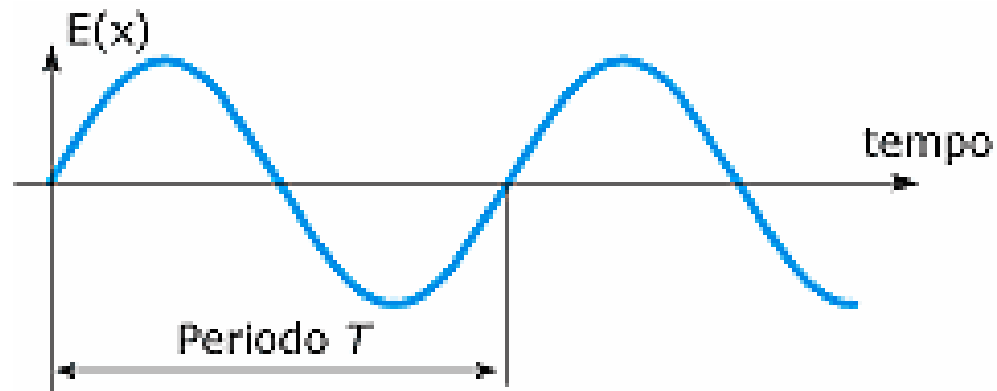
**Suono: variazione rapida di pressione**



**Turbolenza dell'aria**

nell'aria si formano a causa di forze esterne stadi di pressione superiore a quella atmosferica che si alternano a stadi rarefatti

# 1. Quali parametri lo descrivono?



- Frequenza: numero di cicli nell'unità di tempo  $\nu$  (Hz = 1/s)
- Periodo: durata di un ciclo completo  $T = 1/\nu$  (s)
- Lunghezza d'onda: spazio percorso in un periodo  $\lambda = c'/\nu$  (m)
- Ampiezza: variazione di pressione fra max e min  $A$  (Pa)
- Velocità: proporzionale alla densità del materiale, indipendente dalla frequenza. Nell'aria  $c = 331.6 + 0.6 T_c \approx 345$  m/s a  $23^\circ\text{C}$



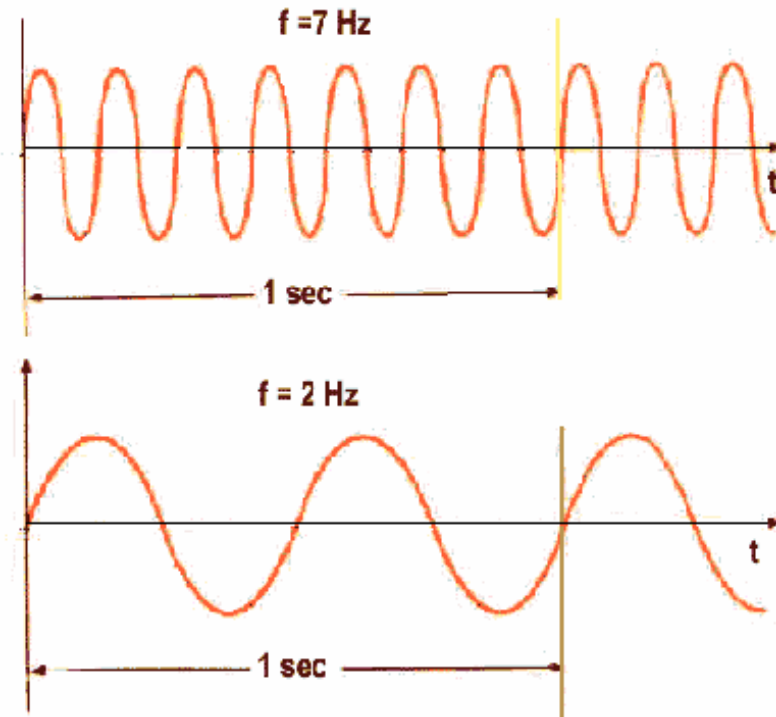
# 1. Frequenza

Altezza di un suono:  
acuto      alta freq

**ULTRASUONI**

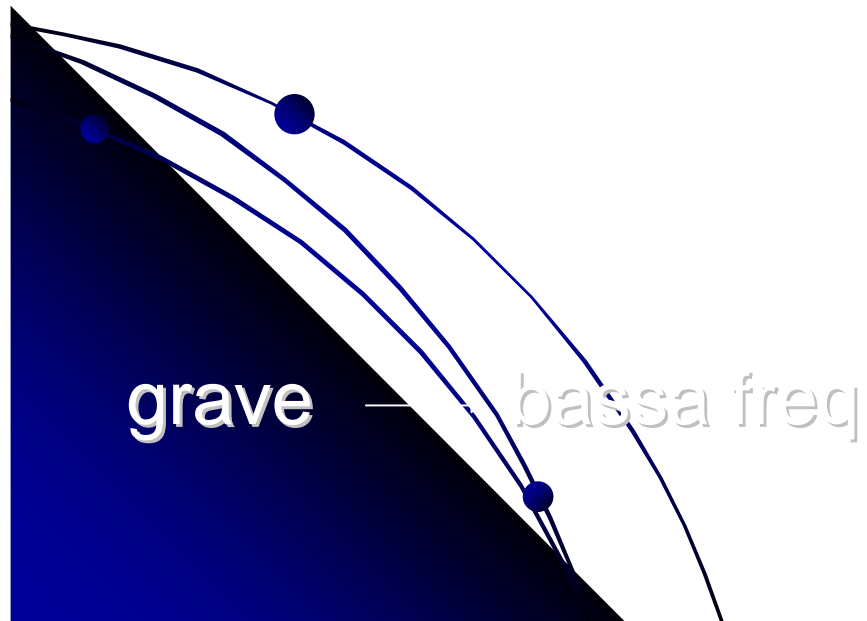
20000 Hz

suono di calibrazione



20 Hz

**INFRASUONI**



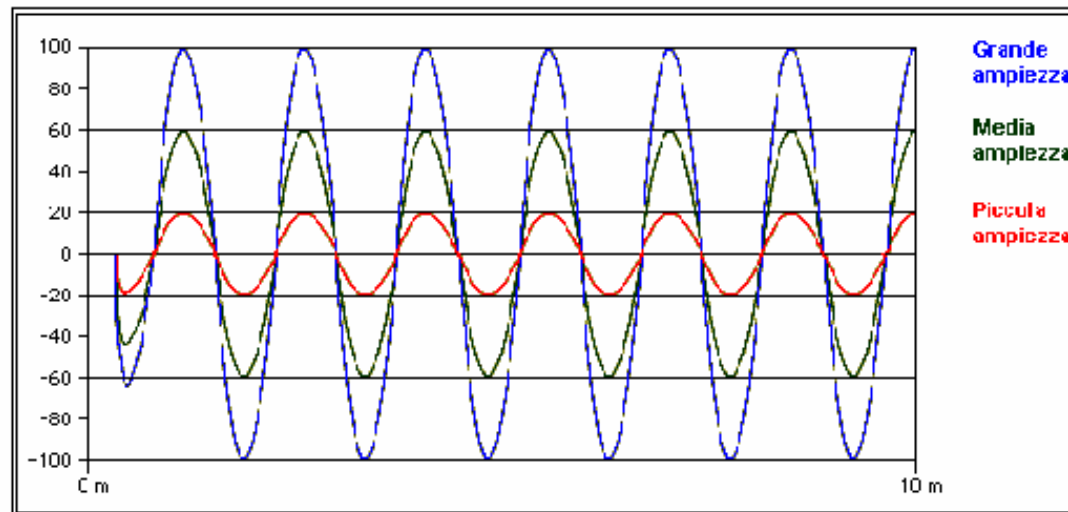
# 1. Ampiezza

Intensità di un suono:

**SOGLIA DEL DOLORE**

forte

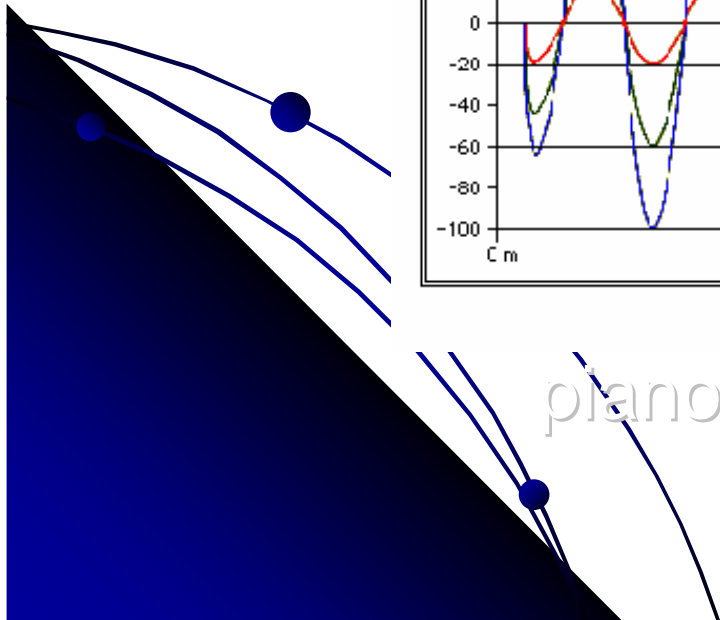
120 Pa



piano

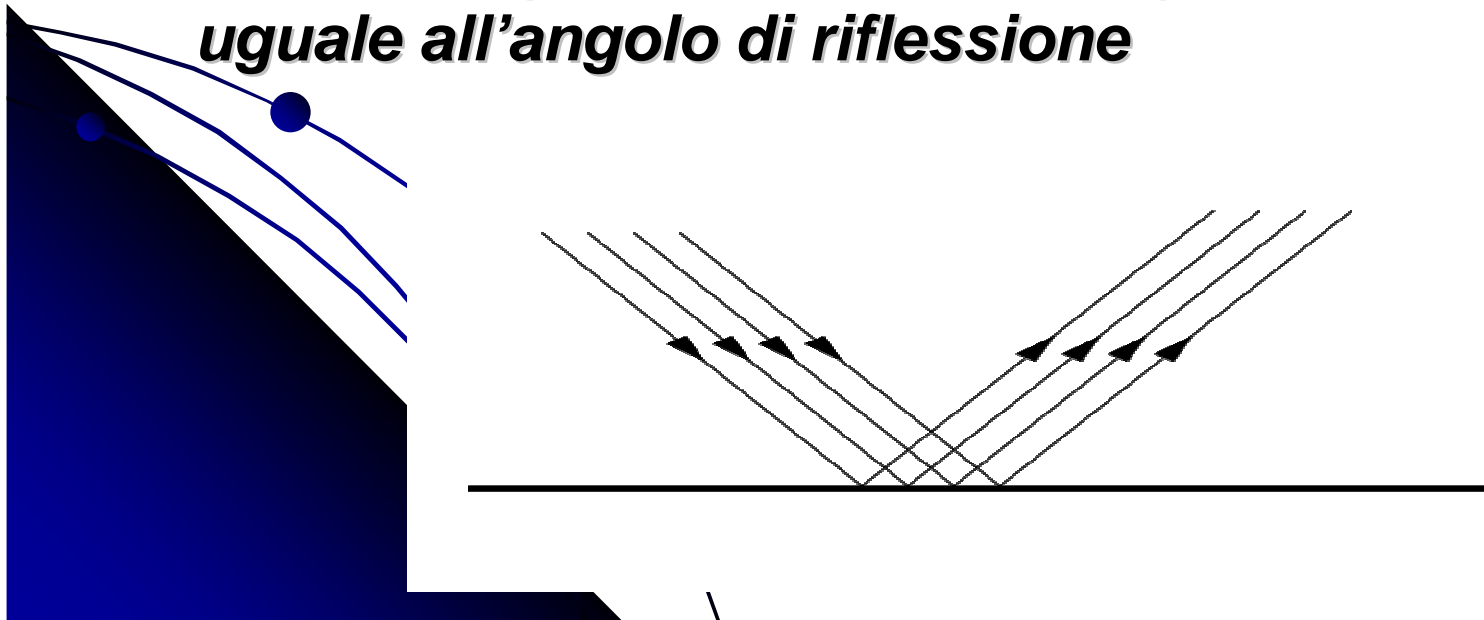
20  $\mu$ Pa

**SOGLIA DI UDIBILITA'**<sub>10</sub>



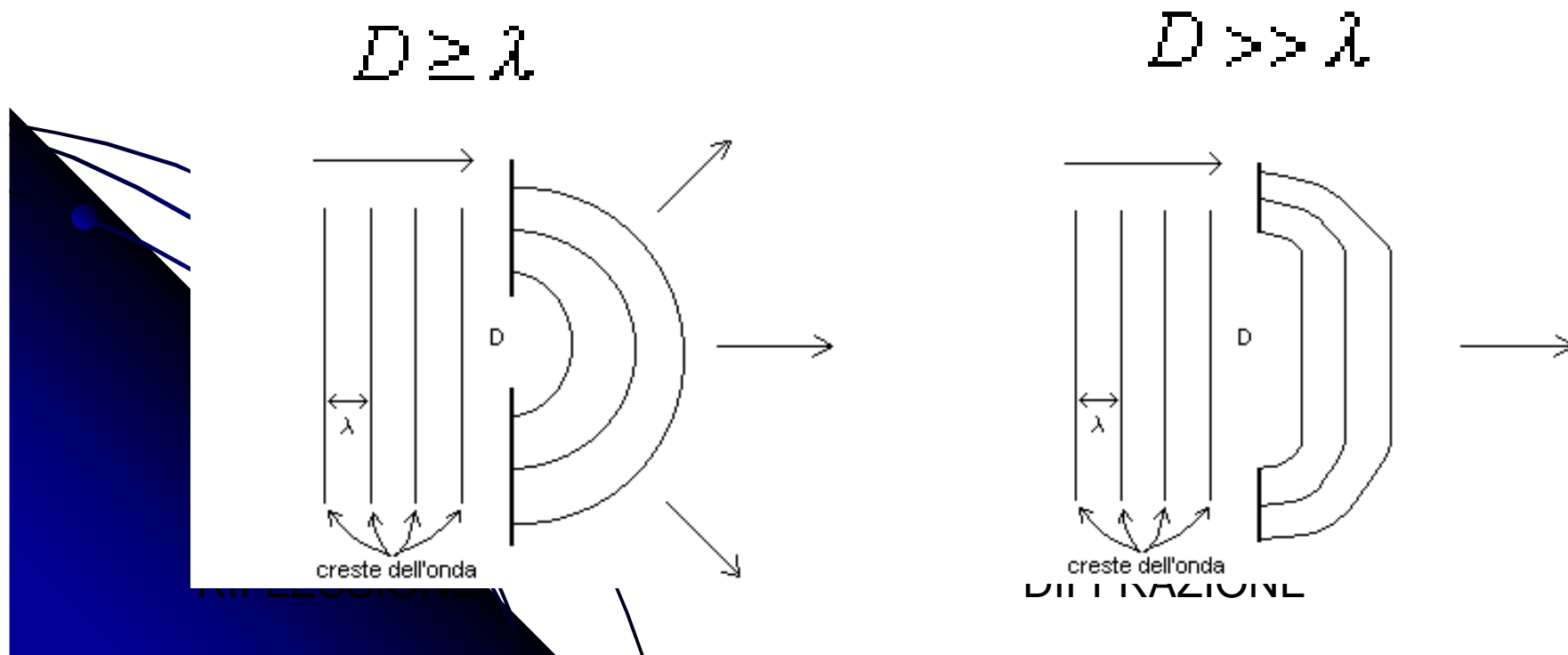
# 1. Riflessione, diffrazione rifrazione

- ***Durante la propagazione le onde sonore subiscono una serie di fenomeni determinati dall'interazione con superfici, ostacoli o dovuti a condizioni del mezzo di propagazione. I fenomeni in esame sono: riflessione, rifrazione e diffrazione.***
- ***Nella riflessione le onde sonore seguono le leggi dell'ottica geometrica, cioè l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione***



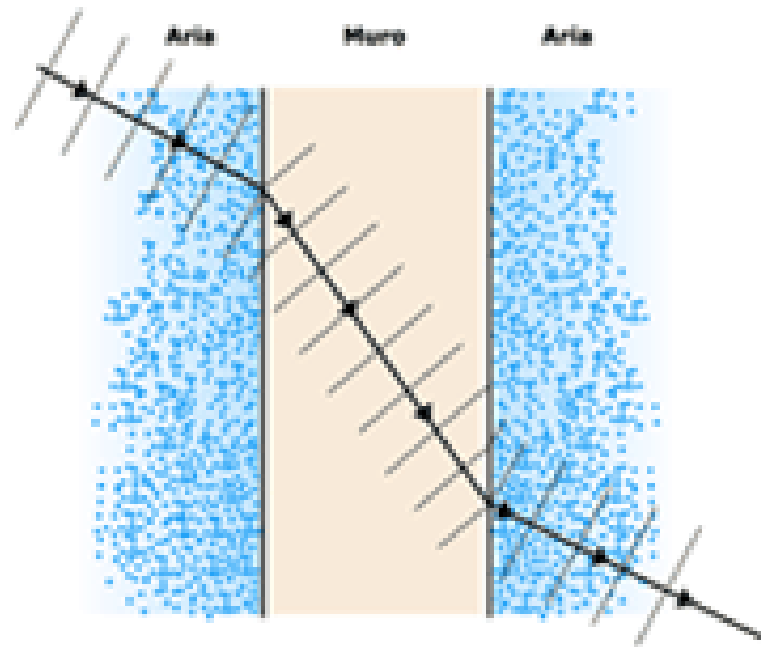
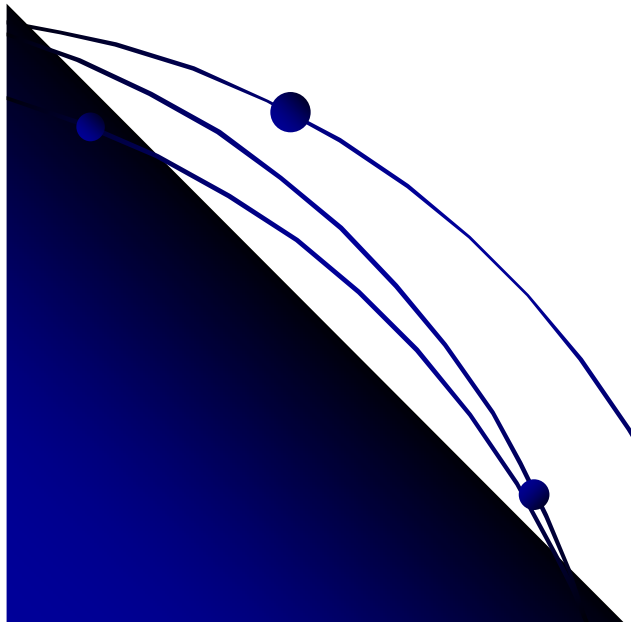
# 1. Riflessione, diffrazione rifrazione

- **Diffrazione:** quando delle **onde attraversano un foro** o una **fenditura** praticati su un **mezzo opaco** (a quelle onde), esse si **propagano** (oltre il foro o la fenditura) **non più in linea retta**.  
**caratteristiche.**



# 1. Riflessione, diffrazione rifrazione

- **Rifrazione:** Con tale termine si indica il fenomeno secondo il quale un'onda che attraversa due mezzi di diversa densità cambia direzione.

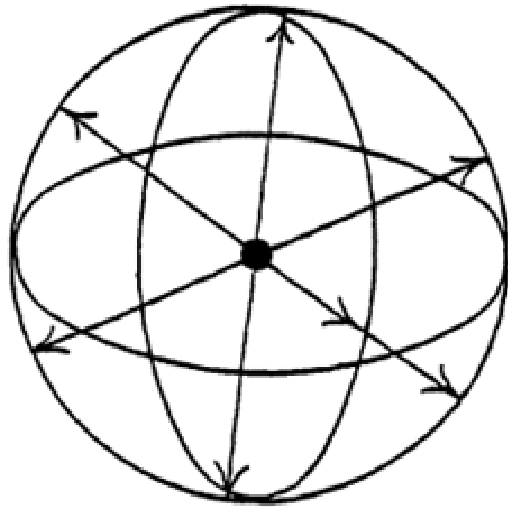


# 1. Effetto doppler:

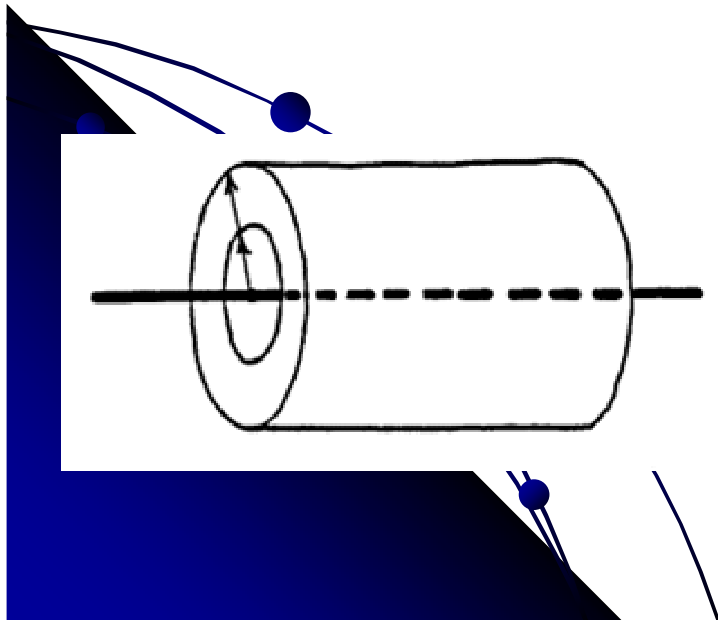
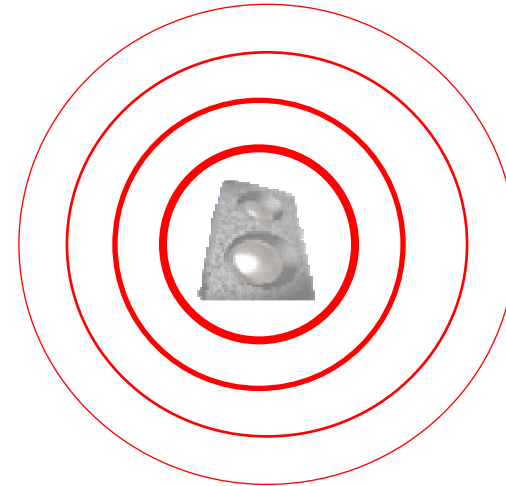
- È l'apparente variazione di frequenza di un suono quando la sorgente sonora o il ricevente si muovono l'una rispetto all'altra
- Se sorgente e ricevente convergono la frequenza apparentemente aumenta
- Se si allontanano la frequenza apparentemente diminuisce


$$f' = f_s \cdot \left[ \frac{c + c_r}{c - c_s} \right]$$

**f'**= frequenza apparente  
**f<sub>s</sub>**= frequenza sorgente  
**c**= velocità del suono (aria)  
**c<sub>r</sub>**= velocità del ricevente  
**c<sub>s</sub>**= velocità della sorgente



**Una cassa acustica  
per le basse  
frequenze è  
paragonabile ad  
una sorgente  
puntiforme e  
quindi  
propagazione per  
onde sferiche**



**Una strada ad alto  
traffico può essere  
vista come una  
sorgente lineare e  
quindi  
propagazione per  
onde cilindriche**



# 1. Quali grandezze misurano il suono?

- **Pressione acustica:** incremento di pressione sonora rispetto ad un valore di riferimento ( $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ );
- **Potenza sonora:** energia irradiata nell'unità di tempo, caratterizza la sorgente sonora, misurata in watt;
- **Intensità sonora:** energia che fluisce nell'unità di tempo attraverso una superficie unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione, ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).





# 1. Cos'è il decibel?

L'orecchio copre un vasto range di pressioni sonore:

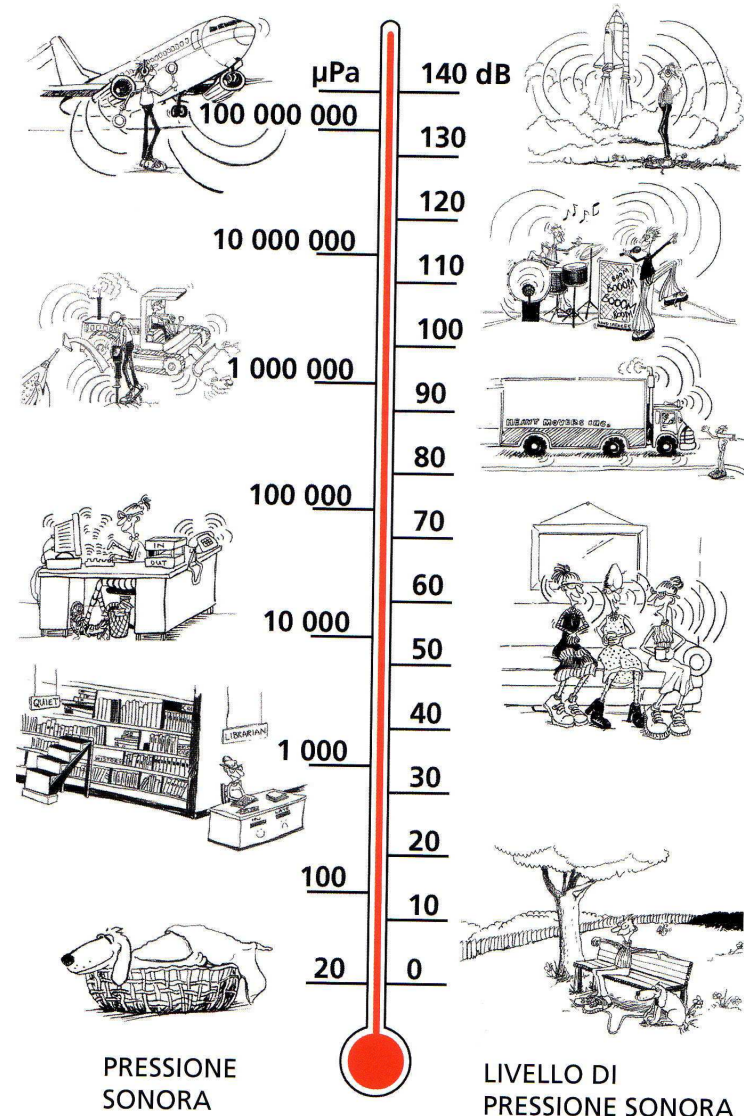
1. da  $20 \cdot 10^{-6}$  Pa a 100 Pa: 6 ordini di grandezza (l'uso della scala lineare comporterebbe l'uso di milioni di divisioni)

2. l'orecchio risponde non in modo lineare, ma secondo una scala logaritmica

$$\text{dB}(\text{sonoro}) = 10 \log_{10} (P^2 / P_0)$$

$P_0$  = pressione sonora minima percettibile dall'orecchio umano

Il dB non è un'unità di misura, è adimensionale

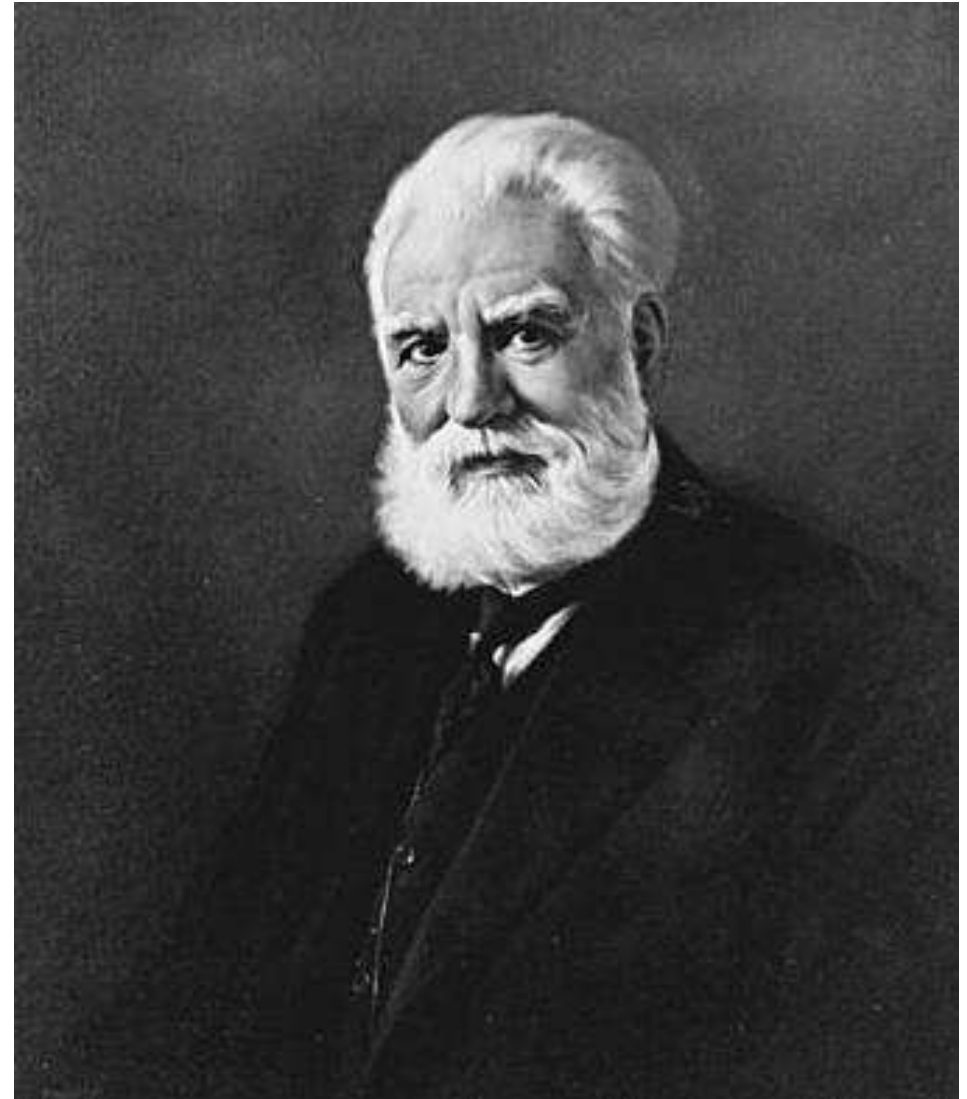


# 1. Alexander Graham Bell

Fisiologo e fisico, nacque in Scozia, a Edimburgo nel 1847, si trasferì in Canada nel 1870 e divenne cittadino americano

Inventò:

- il telefono nel 1876
- il precursore del grammofono
- Il Bel è così chiamato in suo onore
- I Bels sono esponenti di dieci. "deci-" significa "un decimo di"



# 1. I livelli

Parametri acustici espressi in dB:

Livello di pressione

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

Livello di potenza

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

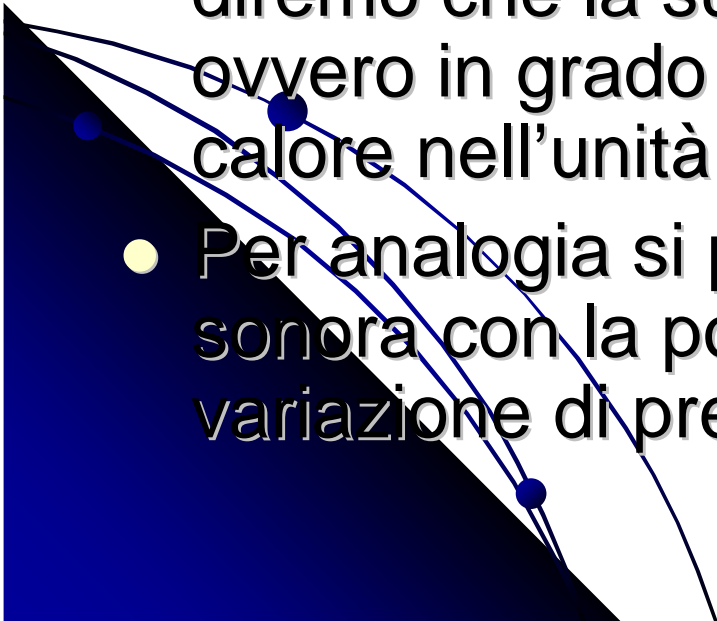
Livello equivalente

$$L_{A,eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right]$$

Livello sonoro di un ipotetico rumore costante che sostituito a quello reale variabile nel tempo comporta la stessa quantità di energia.

# 1. Per capire il concetto di potenza sonora si fa l'analogia col calore

- Per aumentare la temperatura di una stanza da 20° a 25° possiamo azionare una stufa, che, immettendo calore, aumenta la temperatura
- Per caratterizzare la stufa non diremo che è in grado di produrre la temperatura di 25°, bensì diremo che la sua potenza termica è 1Kw, ovvero in grado di erogare una certa quantità di calore nell'unità di tempo
- Per analogia si può caratterizzare una sorgente sonora con la potenza (w), il cui effetto è la variazione di pressione sonora ( $N/m_2$ )

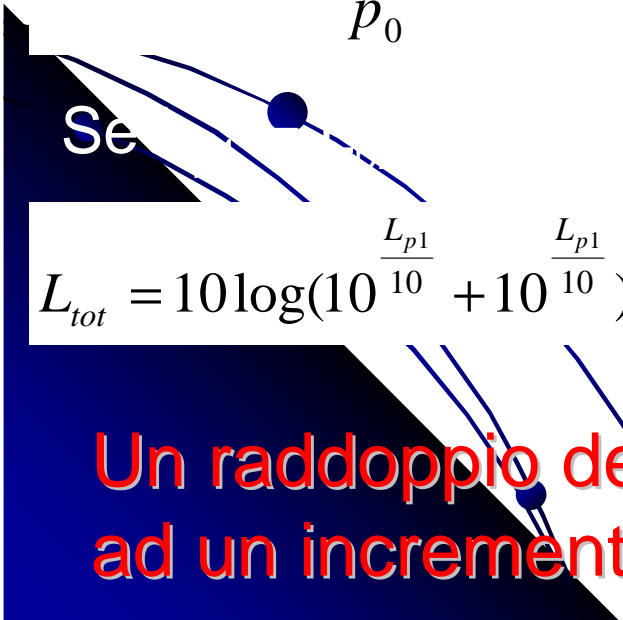


# 1. Somme e sottrazioni

$$L_{p1} = 10 \log \frac{p_1^2}{p_0^2} \qquad \frac{p_1^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_{p1}}{10}}$$

$$L_{p2} = 10 \log \frac{p_2^2}{p_0^2} \qquad \frac{p_2^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_{p2}}{10}}$$

$$L_{tot} = 10 \log \frac{p_{tot}^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{(p_1^2 + p_2^2)}{p_0^2} = 10 \log \left( \frac{p_1^2}{p_0^2} + \frac{p_2^2}{p_0^2} \right) = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right)$$

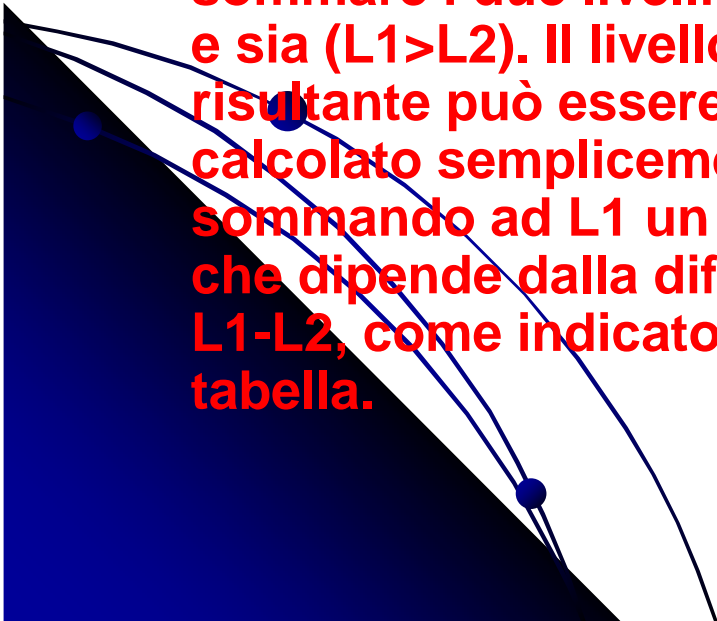

$$L_{tot} = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \right) = 10 \log \left( 2 * 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \right) = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \right) + 10 \log 2 = L_{p1} + 3dB$$

**Un raddoppio della pressione acustica corrisponde ad un incremento di 3 dB del livello di pressione!!**

# 1. SOMMA DI LIVELLI SONORI (metodo “spicciolo”)

- Per la somma di due livelli c'è un procedimento semplificato, che torna molto comodo in molte situazioni reali sul campo.
- Supponiamo di voler sommare i due livelli L1 e L2 e sia ( $L1 > L2$ ). Il livello risultante può essere calcolato semplicemente sommando ad L1 un valore che dipende dalla differenza L1-L2, come indicato nella tabella.

Differenza (L1-L2) dB	Valore da sommare ad L1 (dB)
0	3
1	2,5
2 o 3	2
4	1,5
5,6 o 7	1
8 o 9	0,5
10 o più	0



# 1. Per sommare più di 2 livelli sonori:

- Si procede con somme successive di coppie di valori; per ridurre l'errore occorre sommare coppie di valori prossimi tra loro

- Esempio:  $84+78+84+87+61$

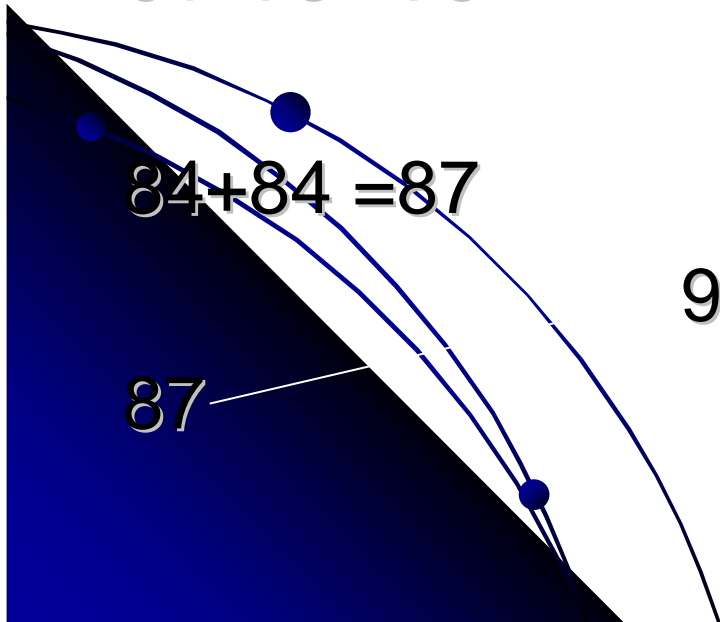
$$61+78 = 78$$

$$84+84 = 87$$

87

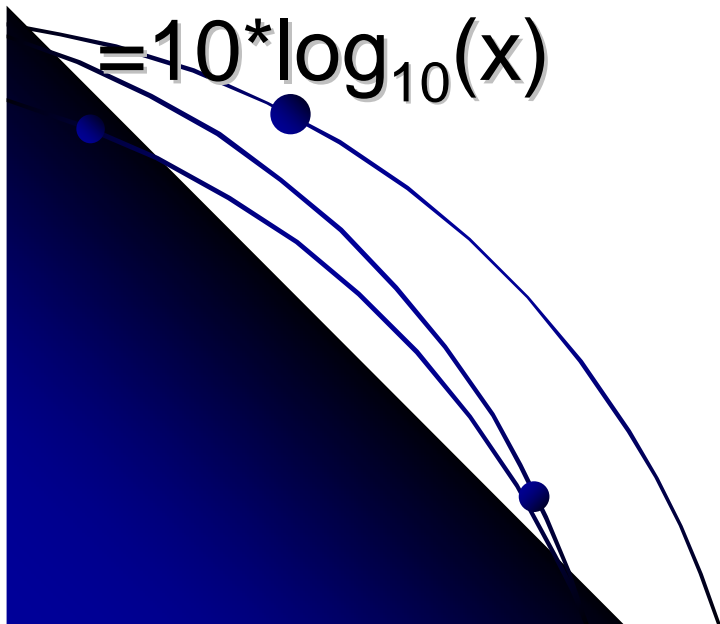
90

90



# 1. Oppure:

- Si trasformano i dati in valori lineari = 10 (Lp1/10)
- Si effettuano le operazioni matematiche
- Si riconverte il risultato in valore logaritmico





# 1. Propagazione del suono in diverse condizioni di campo acustico

- La propagazione del suono da una sorgente è fortemente influenzata dall'ambiente in cui si trova la sorgente.
- Il problema che ci si pone è: data la potenza sonora di una certa sorgente occorre poter prevedere il livello di pressione sonora ad una distanza qualsiasi dalla sorgente, tenendo conto delle proprietà acustiche dell'ambiente.



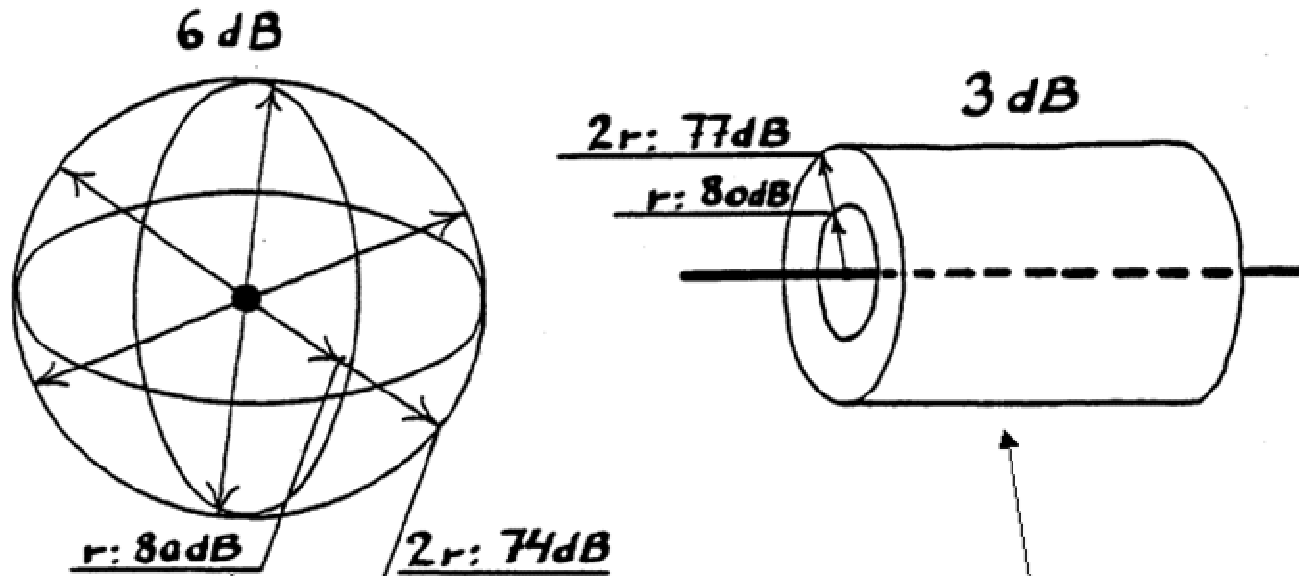
- Propagazione in campo libero

- Propagazione in campo libero su superficie riflettente

- Propagazione negli ambienti chiusi

## -Propagazione in campo libero

E' il caso più semplice (ma difficile da trovare in pratica). L'onda si propaga liberamente in tutte le direzioni senza incontrare ostacoli.



**Raddoppio della distanza  
=> pressione sonora  
diminuisce di 6 dB**

**Raddoppio della distanza  
=> pressione sonora  
diminuisce di 3 dB**

Per una sorgente sferica si ha :  $L_p = L_w - 20 \log r - 11$  dB

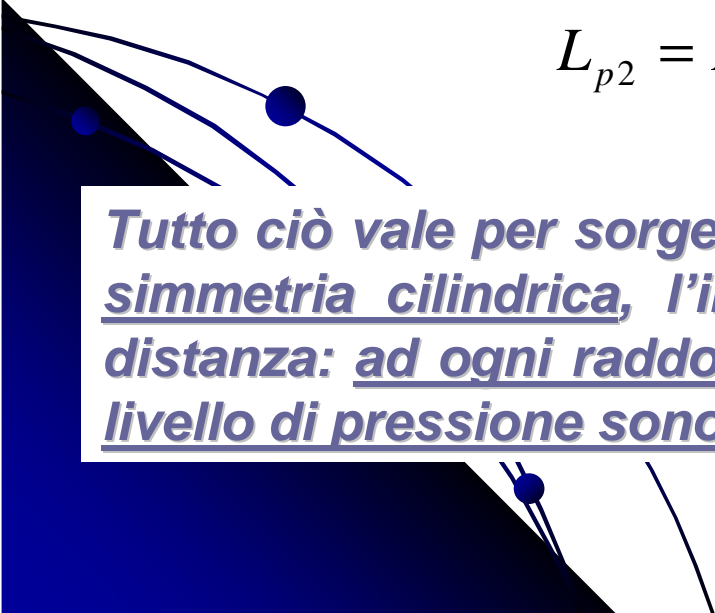
**Se si conosce il livello di pressione sonora ad una certa distanza di riferimento  $r_1$  dalla sorgente si può calcolare il livello di pressione ad una distanza  $r_2$  senza dover conoscere la potenza sonora della sorgente:**

$L_{p1}$  livello di pressione sonora in  $r_1$

$L_{p2}$  livello di pressione sonora in  $r_2$

$$L_{p1} - L_{p2} = 20 \log r_2 - 20 \log r_1 \text{ (dB)}$$

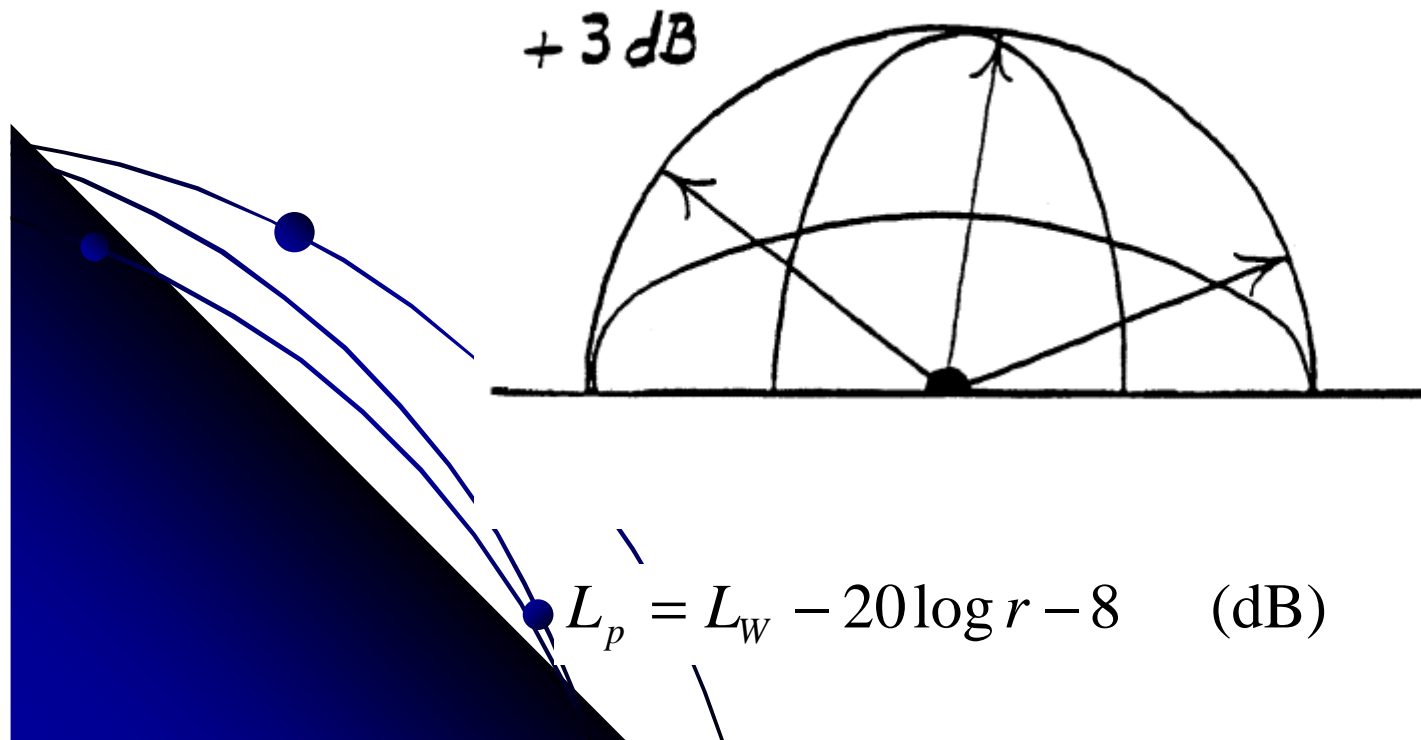
$$L_{p2} = L_{p1} - 20 \log(r_2/r_1) \text{ (dB)}$$



**Tutto ciò vale per sorgenti sferiche. Per sorgenti di tipo lineari, con simmetria cilindrica, l'intensità diminuisce semplicemente con la distanza: ad ogni raddoppio della distanza l'intensità si dimezza (il livello di pressione sonora diminuisce di 3 dB)**

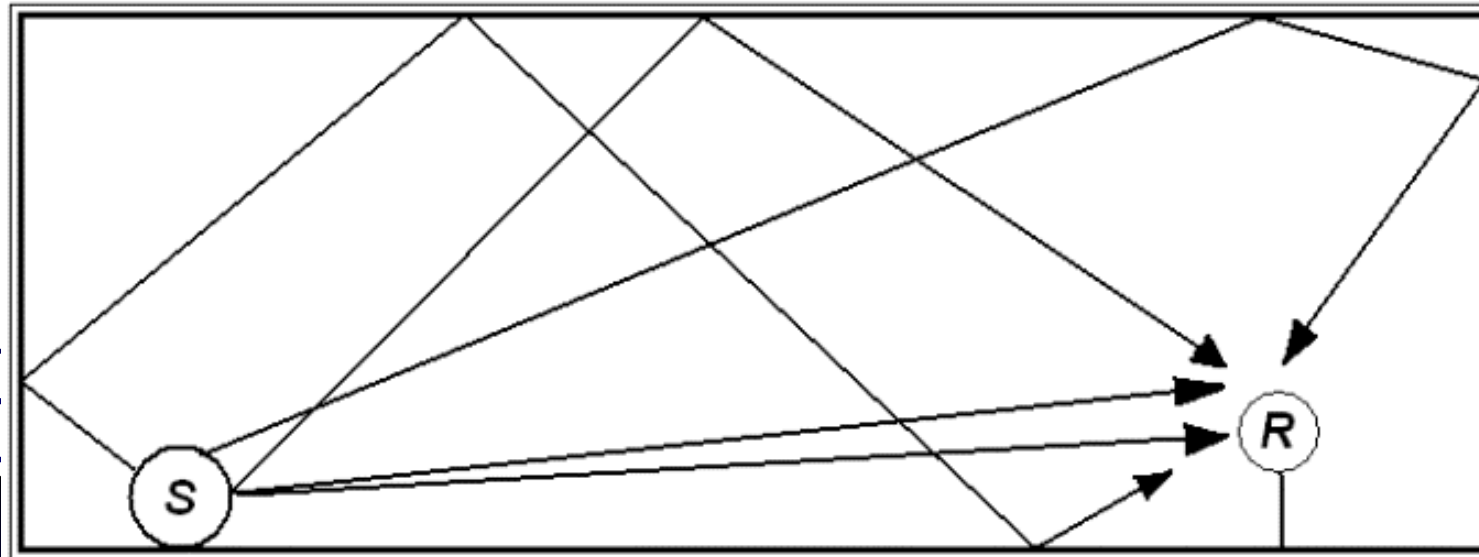
## -Propagazione in campo libero su superficie riflettente

Se la sorgente puntiforme che irradia appoggia su di una superficie perfettamente riflettente dal punto di vista acustico, l'energia sonora irradiata verso la superficie verrà riflessa verso l'alto. L'emissione diventerà di tipo emisferico. In ogni punto si troverà un'intensità doppia, cioè un livello di pressione sonora di 3 dB più elevato del caso di sorgente sferica in campo libero.



## 1. Propagazione negli ambienti chiusi

**Quando una sorgente sonora è attiva all'interno di un ambiente chiuso, il livello di pressione sonora in ogni punto dell'ambiente sarà determinato non solo dall'energia irradiata direttamente, ma anche dal contributo dovuto dall'energia riflessa dalle superfici che delimitano l'ambiente.**

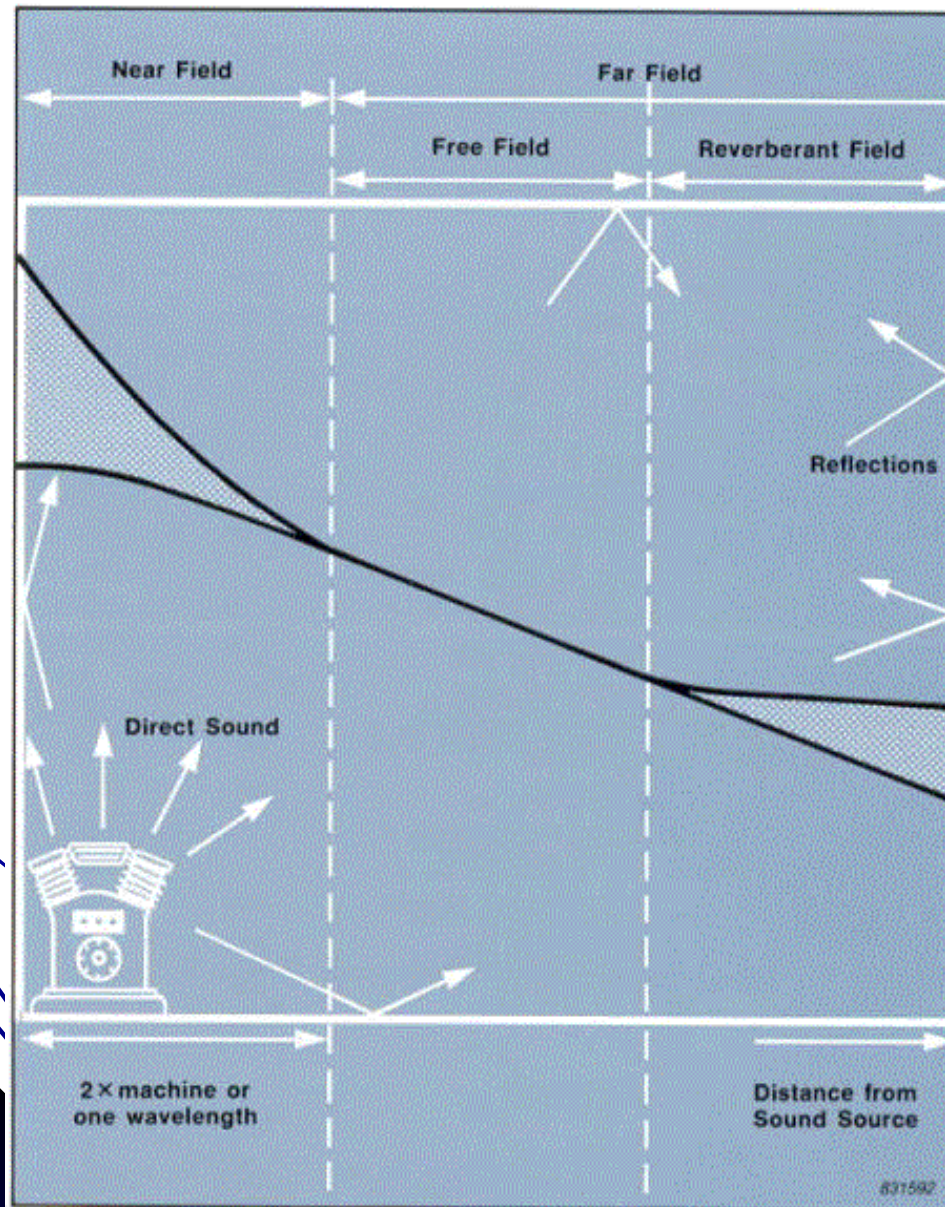


$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (\text{dB})$$

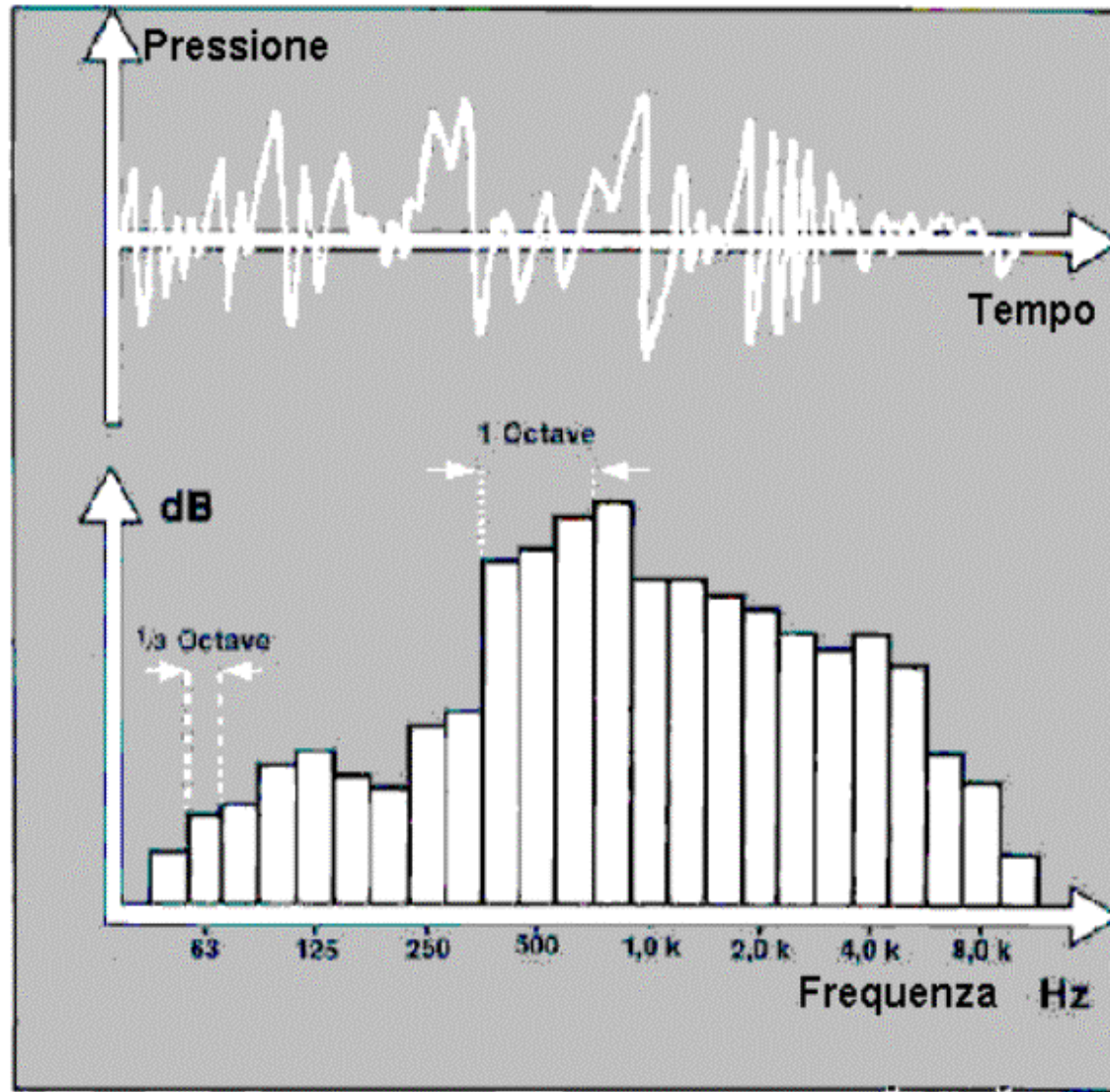
*R = tiene conto dell'assorbimento medio dell'ambiente*

*Q<sub>θ</sub> = tiene conto della direttività della sorgente*

# 1. Propagazione negli ambienti chiusi



# 1. Composizione in frequenza



*Oltre che nel tempo un segnale acustico ha un suo comportamento nel dominio della frequenza.*

*La determinazione del contenuto in frequenza di un suono è detta Analisi in Frequenza.*

*La rappresentazione del suono come funzione della frequenza è detta Spettro di Frequenza*

*Il campo di udibilità dell'orecchio umano è compreso tra:  
20 Hz e 20.000 Hz*

# 1. Bande di frequenza:

- Per gestire meglio le informazioni legate alla frequenza, la gamma dell'udibile è stata suddivisa in **BANDE DI FREQUENZA**
- Le bande più usate hanno un'ampiezza di un'ottava, chiamate **BANDA D'OTTAVA**
- *Le bande sono gruppi caratterizzati da ampiezza percentuale costante; denominata  $f_c$  la frequenza centrale e  $f_1$  e  $f_2$  le frequenze inferiori e superiori, si ha per la banda di ottava:*

$$\frac{f_2 - f_1}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{f_2}{f_1} = 2$$

- *Se  $f_{c1}$  e  $f_{c2}$  sono frequenze centrali di bande contigue, si ha:*

$$\frac{f_{c2}}{f_{c1}} = 2$$

- *Le frequenze centrali normalizzate per banda di ottava sono: 16 - 31,5 - 63 - 125 - 250 - 500 - 1000 - 2000 - 4000 - 8000 - 16000 Hz.*
- *Gli intervalli corrispondenti sono: 11-22, 22-44, 44-88, 88-177, 177-355, 355-710, 710-1420, 1420-2840, 2840-5680, 5680-11360, 11360-22720.*



***Il passaggio dal dominio del tempo a quello della frequenza avviene attraverso l'uso di filtri, ormai digitali.***

***Un filtro è dotato di una campo di frequenze in cui rileva il segnale, questo campo è detto banda di frequenza. Ogni banda di frequenza è delimitata da una frequenza di taglio superiore  $f_s$ , ed una inferiore  $f_i$ .***

***Se  $\Delta f = f_s - f_i$  è mantenuta costante si ha un'analisi a larghezza di banda costante.***

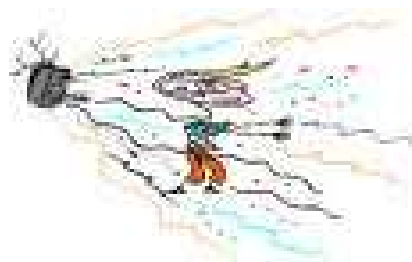
***E' un metodo utilizzato per analisi approfondite, con larghezze di banda molto strette, anche di pochi Hertz.***

***Se il rapporto tra  $(f_s / f_i)$  è mantenuto costante l'analisi è detta a percentuale di banda costante.***

***E' il tipo più usato nel campo del rumore (Simulano bene l'orecchio umano)***

***Tipicamente abbiamo filtri a bande di ottava dove  $f_s = 2f_i$ , oppure bande a terzi di ottava dove  $f_s = \sqrt[3]{2} f_i$***

## 2. DANNO DA RUMORE



# 2. L'orecchio umano

## ORECCHIO ESTERNO:

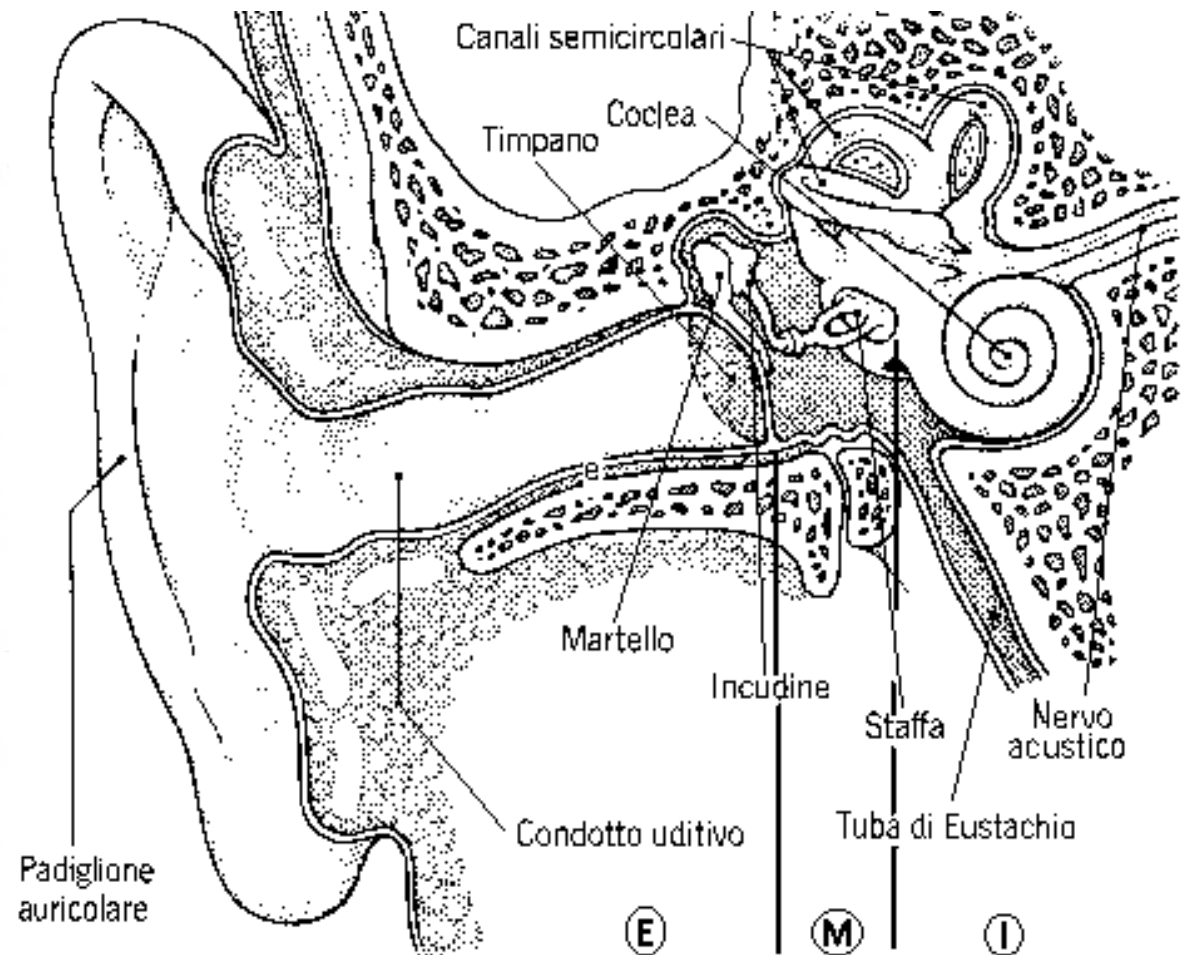
- padiglione auricolare
- condotto uditivo
- timpano

## ORECCHIO MEDIO:

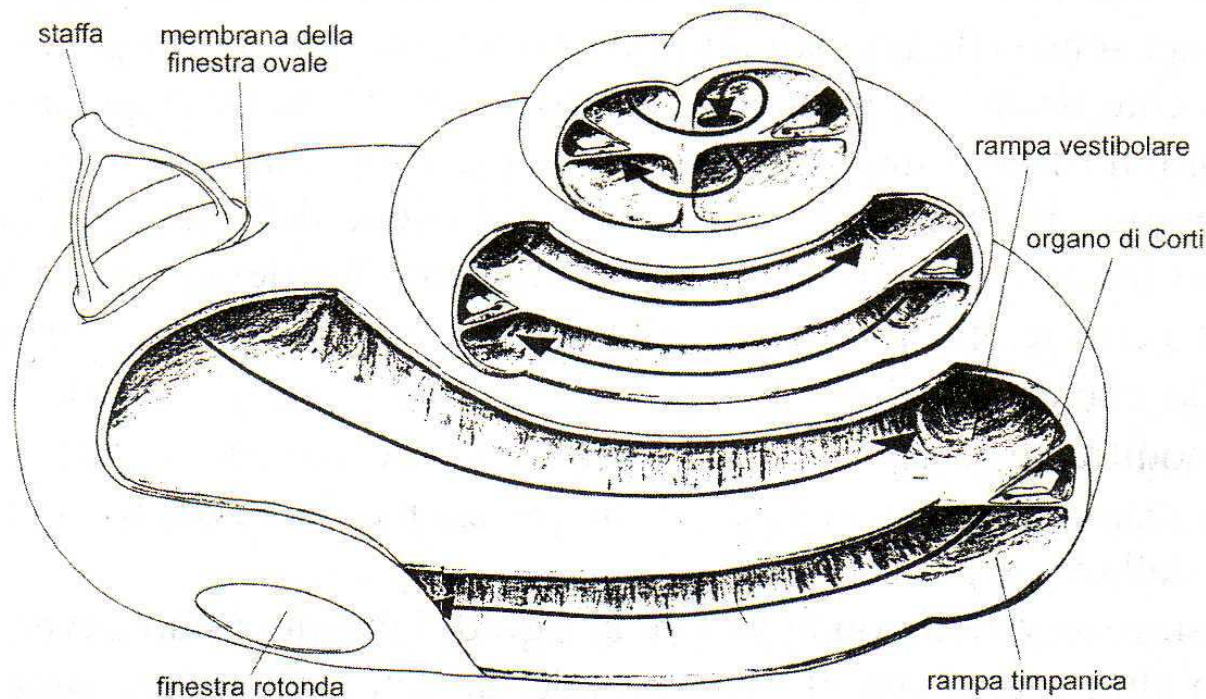
- cassa timpanica (ossicini)
- tuba di Eustachio

## ORECCHIO INTERNO:

- finestra ovale
- membrana basilare (organo di Corti)
- elicotrema



## 2. La coclea



Perilinfia

Endolinfia

Finestra ovale

endolinfia

rampa vestibolare

Finestra rotonda

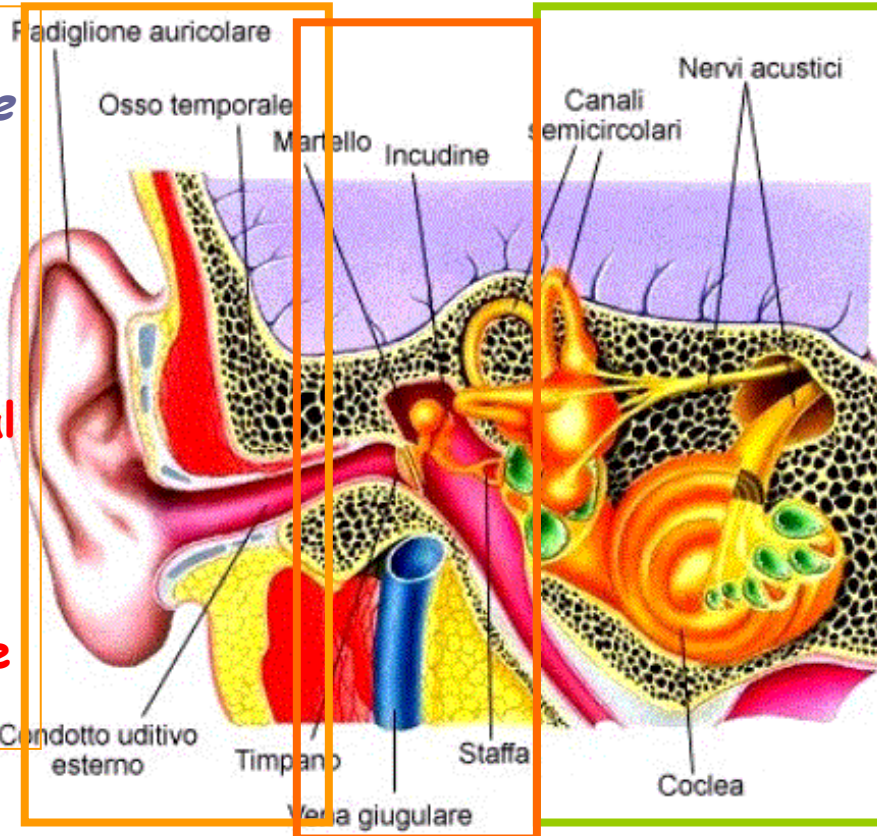
rampa timpanica

Onda - cellule cigliate - potenziale elettrico - nervo acustico

## 2. Perché sentiamo i suoni ?

*Orecchio esterno:  
Padiglione auricolare  
e condotto uditivo  
esterno.*

**Il primo ha il compito di convogliare i suoni al condotto uditivo. Il condotto uditivo ha il compito di amplificare i suoni e portarli al timpano.**



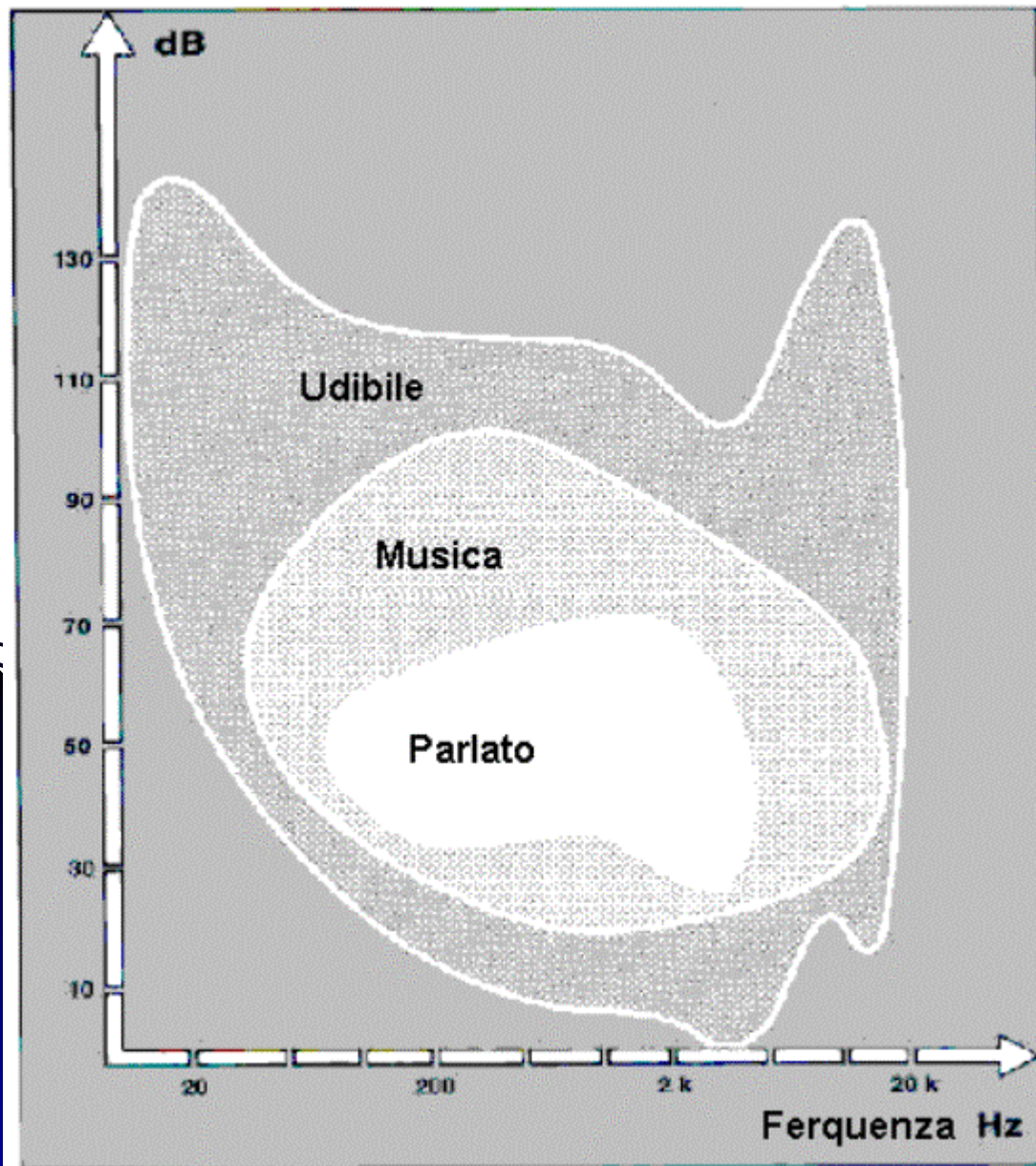
*Orecchio interno:  
Molto complesso,  
costituito da  
labirinto, coclea e  
nervi acustici.*

La staffa batte sulla coclea e comprime il liquido al suo interno portando il segnale ai nervi acustici che lo trasmettono al cervello che lo elabora.

*Orecchio medio: Timpano, martello, incudine e staffa.*

I tre ossicini hanno il compito di trasmettere le vibrazioni sonore dall'aria ai liquidi interni dell'orecchio. I suoni ad alta intensità, sopra i 100dB, si trasmettono attraverso le ossa del cranio senza passare per la catena degli ossicini.

## 2. Sensazione sonora

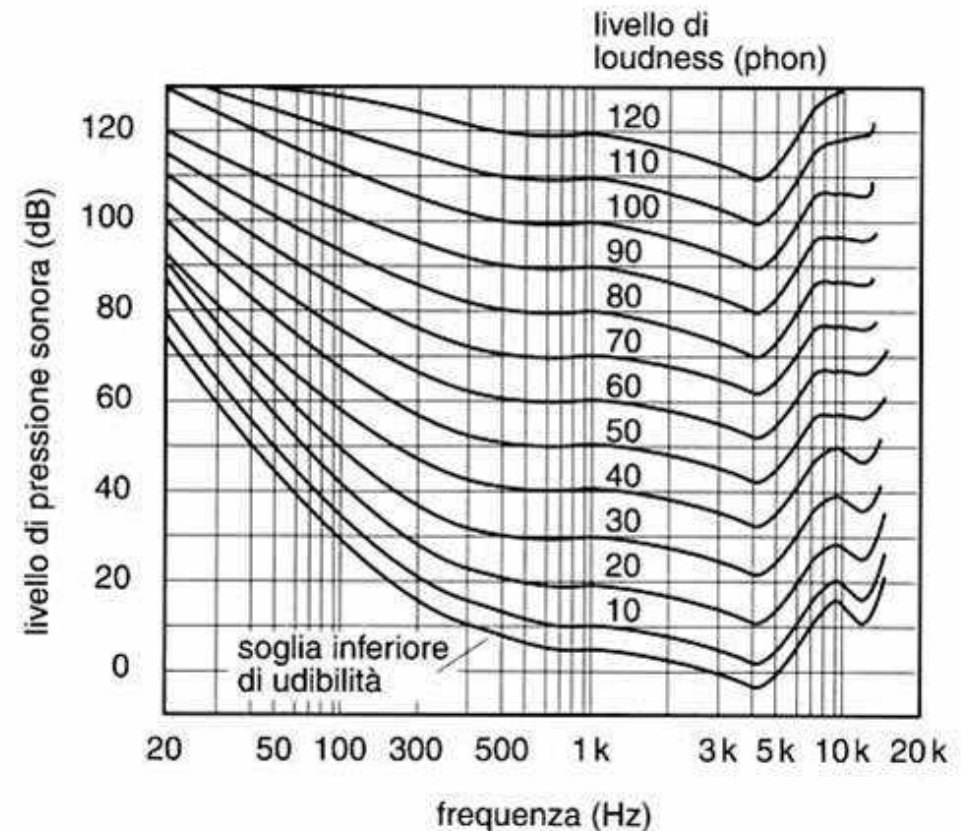


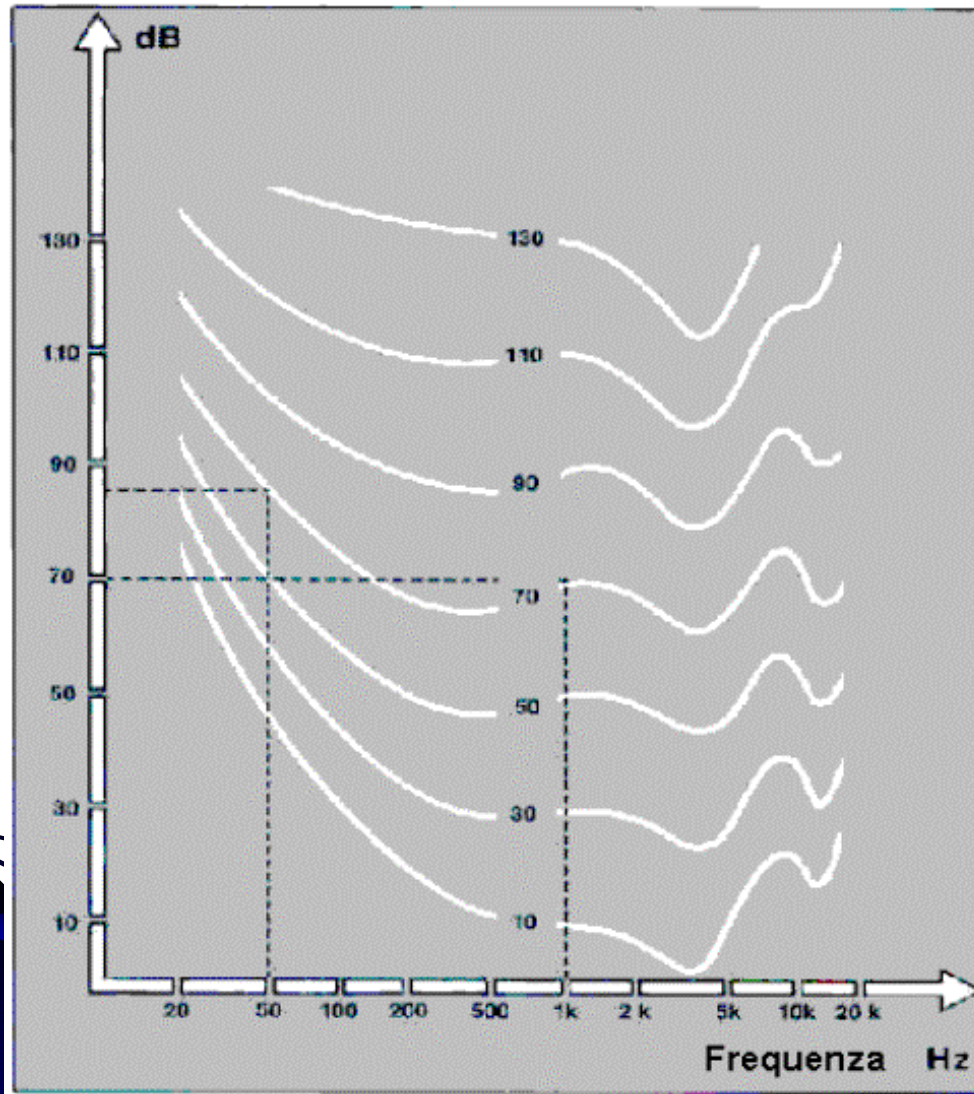
*Si definisce come soglia uditiva il minimo valore del livello di pressione sonora per cui un suono è in grado di provocare una sensazione sonora. La sensibilità uditiva varia con la frequenza, per cui la stessa soglia uditiva ha valori diversi nel campo dell'udibile (20-20.000 Hz).*

## 2. Audiogramma Fletcher - Munson

Studio sull'intensità soggettiva percepita dall'orecchio (1937).

Dato 1000 Hz ad un  $L_p$  fisso vario il  $L_p$  degli altri toni puri fino ad ottenere la stessa isointensità soggettiva.





**Misure analoghe a quelle per la determinazione della soglia uditiva hanno portato alla determinazione delle curve di uguale sensazione sonora, o isofoniche. Ognuna di esse è caratterizzata da un livello di sensazione sonora, espresso in phon, ed è formata dall'insieme dei valori di livello di pressione sonora che al variare della frequenza, comportano la stessa sensazione sonora.**

**PER LE INTENSITA' SONORE: L'ORECCHIO UMANO E' "SORDO" PER LE BASSE FREQUENZE. E MOLTO RICETTIVO PER LE ALTE**

**PER LE FREQUENZE: L'ORECCHIO UMANO E' MOLTO SENSIBILE PER LE VARIAZIONI ALLE BASSE FREQUENZE. E POCO SENSIBILE ALLE ALTE**



# 2. Curve di ponderazione

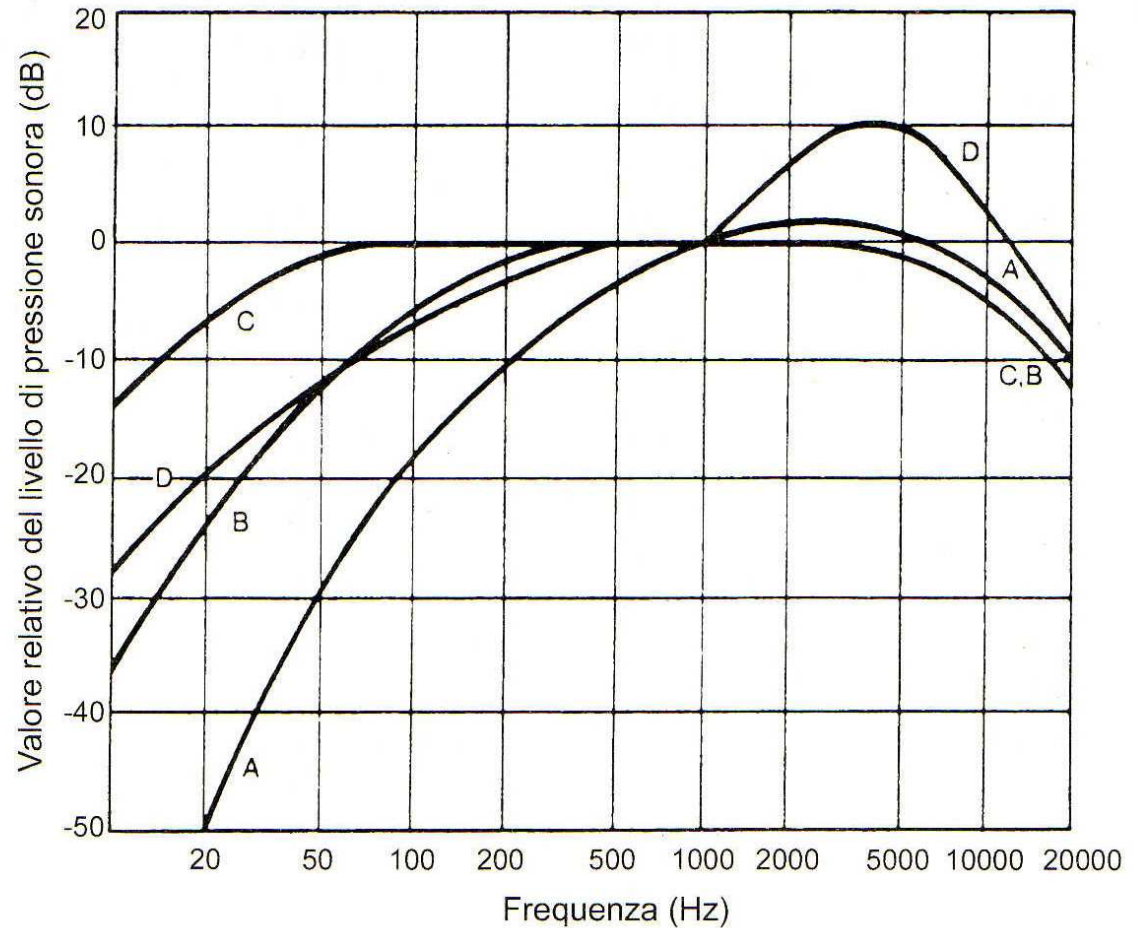
misurare un dato  
oggettivo

alterare la risposta in  
frequenza dello  
strumento

estrapolare curve  
inverse dalle  
isofoniche

curve A, B, C e D

uso della curva A



## 2. Livello di pressione sonora ponderato “A”

**Per la valutazione del rumore rispetto ai suoi effetti sull'uomo occorre stabilire una corrispondenza tra dati oggettivi (livello di pressione sonora e composizione in frequenza) e sensazione sonora.**

**Sono così nate le curve di ponderazione “A”, “B”, “C”, corrispondenti all'incirca alle isofoniche a 40, 70 e 100 phon. Successivamente si è aggiunta la curva “D”, ricavata in base a misure di disturbo prodotto da rumore di aerei. (Caratterizzati da elevati livelli di pressione e notevole contenuto di alte frequenze).**

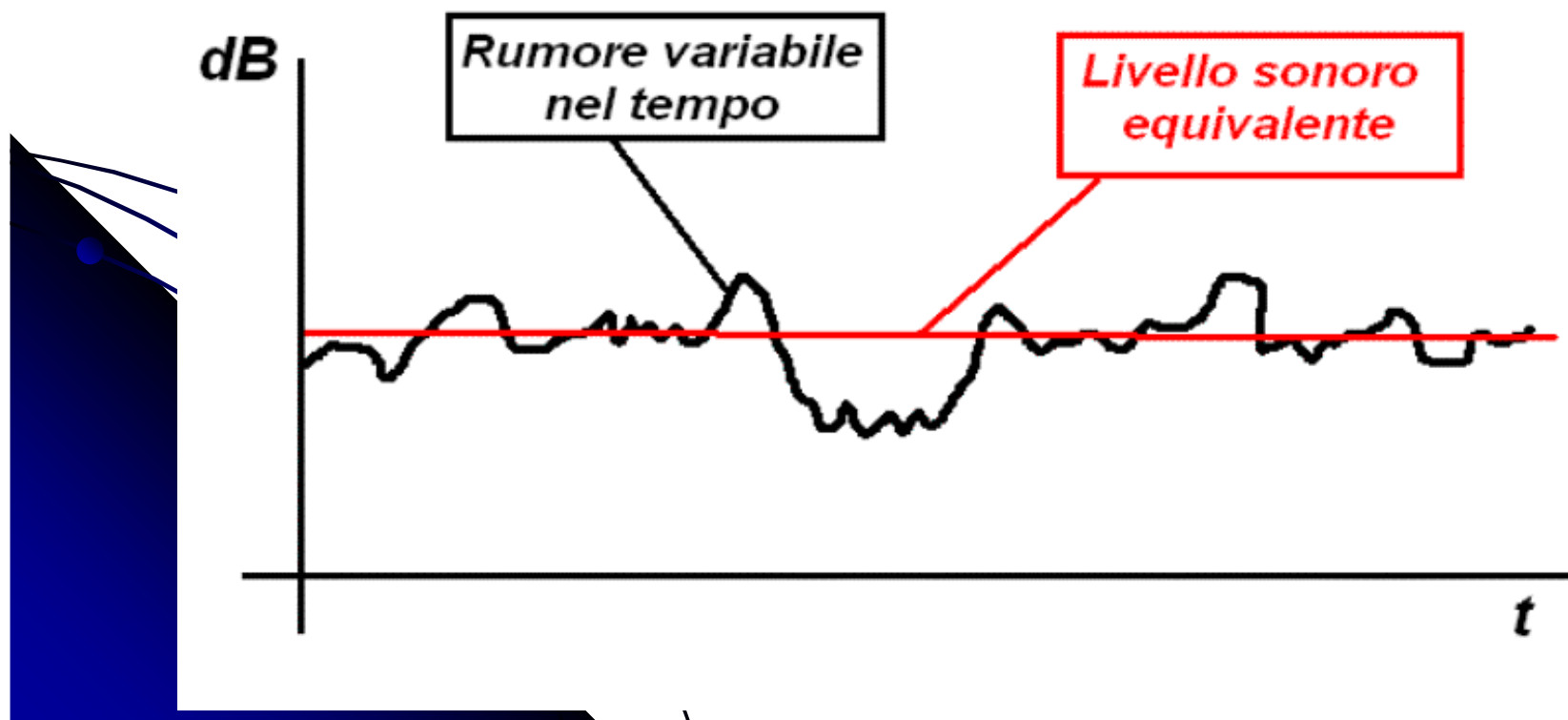
**La curva più utilizzata nelle misure di rumore aventi come scopo la valutazione dei suoi effetti sull'uomo è la curva “A” ed il risultato delle misure eseguite in questa ponderazione è espresso in dB(A).**

**Indagini epidemiologiche hanno dimostrato che il livello di pressione sonora ponderato “A” è ben correlato sia con il disturbo, sia con il danno uditivo, anche per esposizione a livelli elevati.**

## 2. Livello sonoro equivalente

*Il livello sonoro equivalente di un suono variabile nel tempo è il livello (espresso in dB(A)), di un ipotetico suono costante tale che, se sostituito al suono reale per lo stesso periodo di tempo, produrrebbe la stessa quantità di energia sonora.*

*Il livello sonoro equivalente è importante perché caratterizza un suono o rumore variabile con un unico valore direttamente connesso con la sensazione sonora.*



## **2. Il livello sonoro equivalente**

***Un fenomeno acustico, come qualsiasi fenomeno fisico (sono vibrazioni meccaniche del mezzo di propagazione, aria) per quanto complesso può essere rappresentato da opportuni indici descrittivi.***

***Il livello  $Leq(A)$  presenta il grande vantaggio di riunire in un unico parametro diverse situazioni, essendo valido ugualmente per rumori stazionari che per rumori fluttuanti nel tempo, quali traffico o i processi produttivi.***

***Benché sia di facile misurazione, grazie ai fonometri integratori, occorre porre molta attenzione nella scelta dell'unico parametro impostabile dall'operatore, cioè il tempo di integrazione.***

***Infatti il  $Leq$  ha una natura energetica ed una scelta sbagliata del tempo di integrazione può condurre a notevoli errori.***

***Nel caso di misura di rumori stazionari il problema non sussiste.***

***Nel caso di rumori fluttuanti nel tempo la scelta del tempo di integrazione è più complessa.***