

---

# Alcuni elementi di acustica di base

---

- A. Pinto - M. Montorfano
- Corso di Acustica degli edifici / tecnici impiantisti
- 25-26 Settembre 2015

---

# Fenomeni ondulatori

---

Un fenomeno sonoro può essere identificato individuando le caratteristiche di due elementi fondamentali:

- ☀ La sorgente
- ☀ Il mezzo elastico

---

# Sorgente

---

La sorgente di un fenomeno sonoro può essere costituita da:

- \*vibrazioni (un qualsiasi oggetto oscillante con regolarità o in maniera del tutto casuale) nei solidi,
- \*turbolenze (quando una corrente d'aria incontra un ostacolo) nei fluidi.

---

# Mezzo elastico

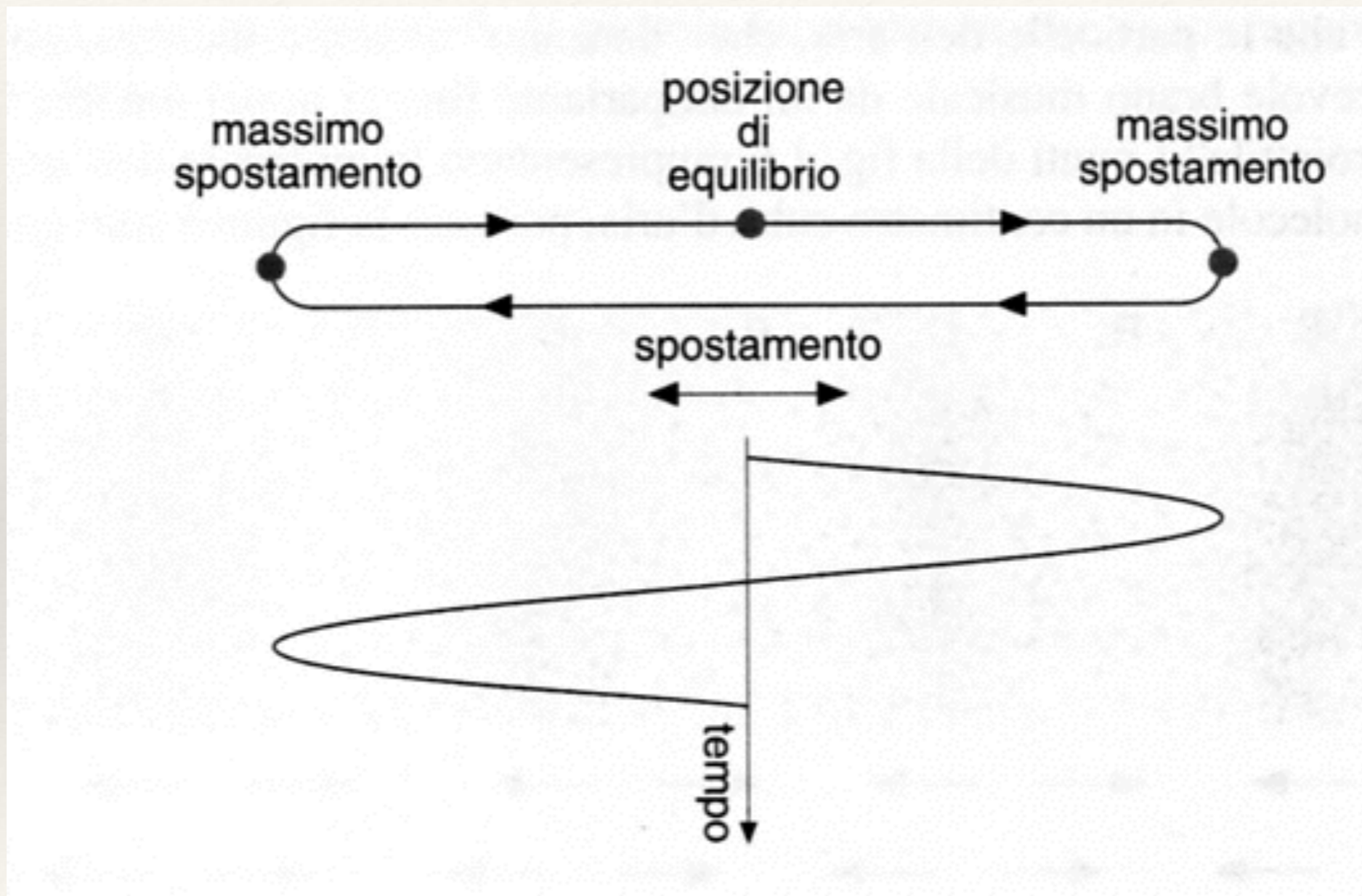
---

Il mezzo elastico può essere un qualsiasi mezzo (aria, acqua, metalli, etc.) nel quale esistono forze elastiche interne di richiamo.

Una particella di un mezzo elastico che viene messa in oscillazione da una forza, si allontana dalla sua posizione iniziale di equilibrio fino ad una certa distanza detta elongazione dell'oscillazione.

Per effetto dell'elasticità del mezzo la particella viene richiamata verso la posizione di equilibrio ed inizia una serie di oscillazioni attorno alla posizione di equilibrio che, a meno di smorzamenti, si protraggono all'infinito: la particella compie un moto armonico con una certa velocità detta velocità della particella  $u$ .

# Mezzo elastico



---

# Mezzo elastico

---

La particella oscillante è accostata ad un'altra particella del mezzo che, risentendo delle suddette oscillazioni, comincerà ad oscillare, anche se con un certo ritardo, attorno alla sua posizione di equilibrio: a sua volta quest'ultima particella è accostata ad un'altra particella che entrerà in oscillazione con un ritardo ancora maggiore rispetto alla prima e così di seguito per tutte le altre particelle del mezzo.

L'oscillazione della prima particella si trasmetterà quindi in tutto il mezzo con una certa velocità di propagazione dipendente dal tipo di mezzo, detta velocità dell'onda  $c$ .

Senza mezzo elastico non ci può essere trasmissione del suono.

---

# Ricettore

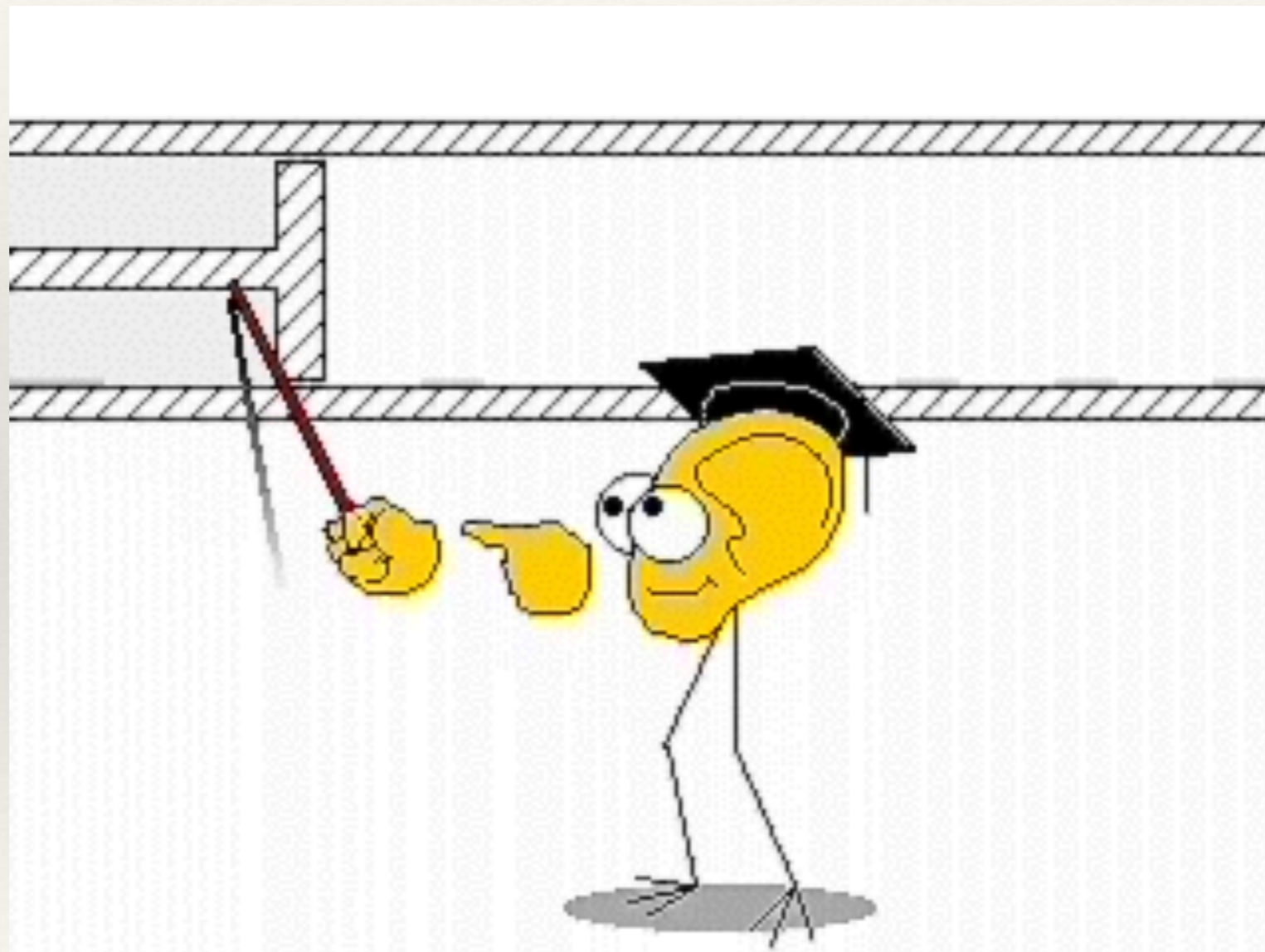
---

Per identificare un fenomeno sonoro è necessario anche un soggetto che lo percepisca, ovvero un ricettore, dotato di un apparato uditivo, che verrà trattato in seguito.

---

# Generazione di un'onda piana

---





---

# Generazione di un'onda piana

---

L'onda generata all'interno del tubo sonoro vista in precedenza è un'onda definita piana progressiva.

In tale onda la pressione dell'onda e la velocità delle particelle sono in fase.

Per la sua semplicità è il punto di partenza per la definizione di alcune grandezze.

---

# Equazione onda armonica

---

$$y(x, t) = A \cos 2\pi \left( t / T - x / \lambda \right)$$

La legge può anche essere espressa in funzione di altre due costanti:

la *pulsazione*  $\omega = 2\pi / T$

ed il *numero d'onda*  $k = 2\pi / \lambda$

$$y(x, t) = A \cos (\omega t - k x)$$

---

# Impedenza caratteristica del mezzo

---

L'impedenza caratteristica del mezzo  $Z$  è data da:

$$Z = \frac{p}{u}$$

dove  $p$  è la pressione dell'onda sonora sul mezzo e  $u$  la velocità delle particelle risultante: si misura in rayl.

---

# Impedenza di un'onda piana

---

Per un'onda piana l'impedenza caratteristica del mezzo vale:

$$Z = \rho c$$

dove  $\rho$  è la densità del mezzo e  $c$  la velocità del suono nel mezzo.

---

# Velocità delle particelle

---

La velocità delle particelle  $u$  in un mezzo qualsiasi è data da:

$$u = \frac{p}{\rho c}$$

dove  $p$  è la pressione esercitata sul mezzo,  $\rho$  la densità del mezzo e  $c$  la velocità di propagazione dell'onda sonora nel mezzo.

---

# Onde longitudinali

---

Le onde longitudinali, del tipo di quelle che viaggiano su una molla, hanno la direzione di propagazione parallela a quella di vibrazione delle particelle del mezzo.



---

# Parametri caratteristici del suono

---

Poiché si è visto che il suono è un'onda di pressione che si propaga in un mezzo elastico, risulta necessario definire alcuni parametri che riguardano i fenomeni ondulatori in generale.

---

# Rappresentazione grafica di un moto oscillatorio

---

La descrizione di un'onda deve essere compiuta sia nello spazio che nel tempo: infatti la forma di un'onda dipende sia dal punto dello spazio in cui ci si trova sia dall'istante di tempo in cui si va a considerarla.

Un'onda può quindi essere rappresentata tramite due tipi di grafici cartesiani:

in ascisse il tempo  $t$  e in ordinate l'ampiezza dell'elongazione  $A$  (grafico  $t, A$ );

in ascisse lo spazio  $s$  e in ordinate l'elongazione  $A$  (grafico  $s, A$ ).



---

# Rappresentazione grafica di un moto oscillatorio

---

I due grafici hanno un'interpretazione molto semplice: il primo rappresenta l'oscillazione nel tempo di una particella del mezzo in un punto fissato dello spazio, il secondo costituisce la "fotografia" dell'onda in un determinato istante.

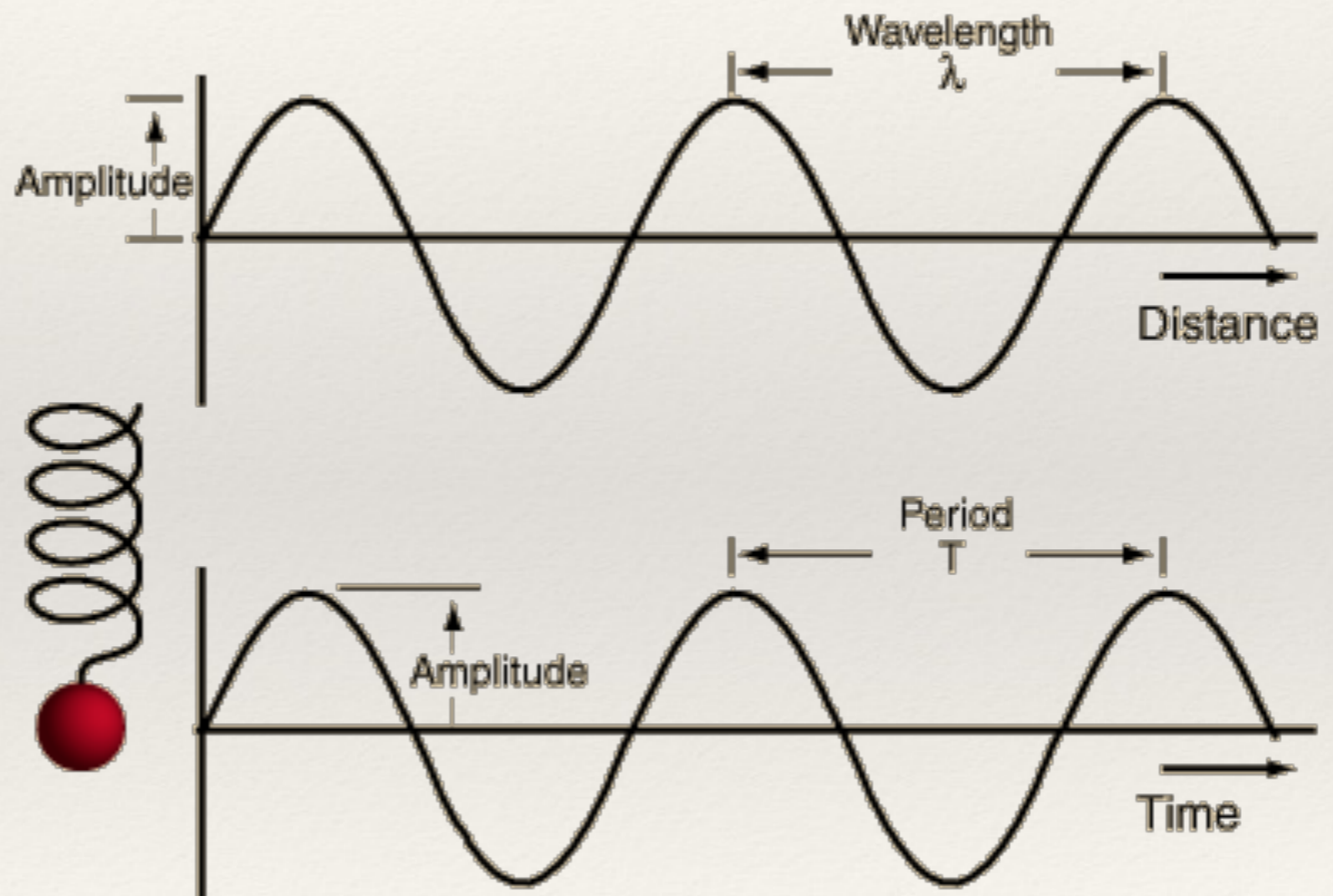
L'andamento oscillante di tali grafici viene detto sinusoidale e il grafico corrispondente sinusoidale.

I punti di massima elongazione superiori vengono detti creste, quelli inferiori gole.

# Parametri dell'onda

I parametri utili a descrivere un'onda sono di due tipi: temporali e spaziali.

I primi (periodo e frequenza) compaiono nel grafico  $(t, A)$ , i secondi (lunghezza d'onda) nel grafico  $(s, A)$ .



---

# Periodo

---

Parametro di tipo temporale simboleggiato generalmente dalla lettera  $T$ , rappresenta il tempo impiegato da una particella del mezzo a compiere una oscillazione completa e si misura in secondi (s).

---

# Frequenza

---

Parametro di tipo temporale simboleggiato generalmente dalla lettera  $f$ , rappresenta il numero di oscillazioni complete compiute da una particella del mezzo in un  $s$  e si misura in Hertz (Hz).

La frequenza è collegata all'altezza di un suono, ovvero alla sensazione di grave o acuto: maggiore la frequenza, maggiore l'altezza.

---

# Frequenza

---

Non tutte le frequenze possono essere percepite dall'orecchio umano: solo le oscillazioni con frequenza compresa tra 20 Hz e 20000 Hz sono in grado di generare una sensazione uditiva.

L'insieme di queste frequenze viene detto gamma acustica.

Le oscillazioni aventi frequenza inferiore o superiore a detti limiti vengono dette rispettivamente infrasuoni ed ultrasuoni.

---

# Lunghezza d'onda

---

Parametro di tipo spaziale simboleggiato generalmente dalla lettera  $\lambda$ , rappresenta la distanza tra due creste o due gole successive e si misura in metri (m).

---

# Ampiezza

---

Parametro che compare sia nei grafici temporali che in quelli spaziali, simboleggiato generalmente dalla lettera  $A$ , rappresenta la massima elongazione dell'oscillazione e si misura in metri.

L'ampiezza è collegata alla percezione dell'intensità sonora, ovvero di ciò che viene detto comunemente volume: maggiore l'ampiezza, maggiore l'intensità, ovvero maggiore il volume.

---

# Velocità dell'onda

---

Parametro che non compare in nessuno dei due grafici dell'onda, simboleggiato generalmente dalla lettera  $c$ , rappresenta la velocità con la quale si propaga un fenomeno ondulatorio e si misura in metri al secondo (m/s).

La velocità dell'onda può essere influenzata da vari fattori dipendenti dalle caratteristiche del mezzo, tant'è che il suono si propaga con differenti velocità nei diversi materiali.



---

# Velocità dell'onda

---

Velocità del suono  $c$  in un solido:

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

dove  $E$  è il modulo di Young del materiale e  $\rho$  la densità del mezzo.

---

# Velocità dell'onda

---

Velocità del suono  $c$  in un aeriforme:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R_0 T}{m}}$$

dove  $\gamma$  è il rapporto dei calori specifici,  $p$  la pressione del mezzo,  $\rho$  la densità del mezzo,  $R_0$  la costante universale dei gas,  $m$  il peso molecolare dell'aeriforme e  $T$  la temperatura assoluta.

# Velocità dell'onda

| medium         | speed of longitudinal waves (m/s) | speed of transverse waves (m/s) |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Air            | 340                               |                                 |
| Water          | 1500                              |                                 |
| Aluminium      | 6400                              | 3040                            |
| Steel          | 5900                              | 3200                            |
| Copper         | 4700                              | 2110                            |
| Quartz         | 5700                              | 3920                            |
| Heavy concrete | 3350                              | 2225                            |

---

# Fronte d'onda

---

Linea immaginaria che unisce tutti i punti di un'onda aventi la stessa elongazione ad un certo istante fissato.

---

# Fronte d'onda

---

Un fronte d'onda può assumere varie forme: generalmente se un oggetto vibra trasmettendo le sue oscillazioni all'aria circostante, il fronte d'onda corrispondente ha una forma molto simile quella dell'oggetto stesso in prossimità del medesimo (campo vicino).

A grandi distanze dalla sorgente (campo lontano), si preferisce semplificare la forma del fronte d'onda parlando di fronte d'onda sferico se la sorgente è assimilabile ad un punto o fronte d'onda piano se la sorgente è assimilabile ad una superficie.

---

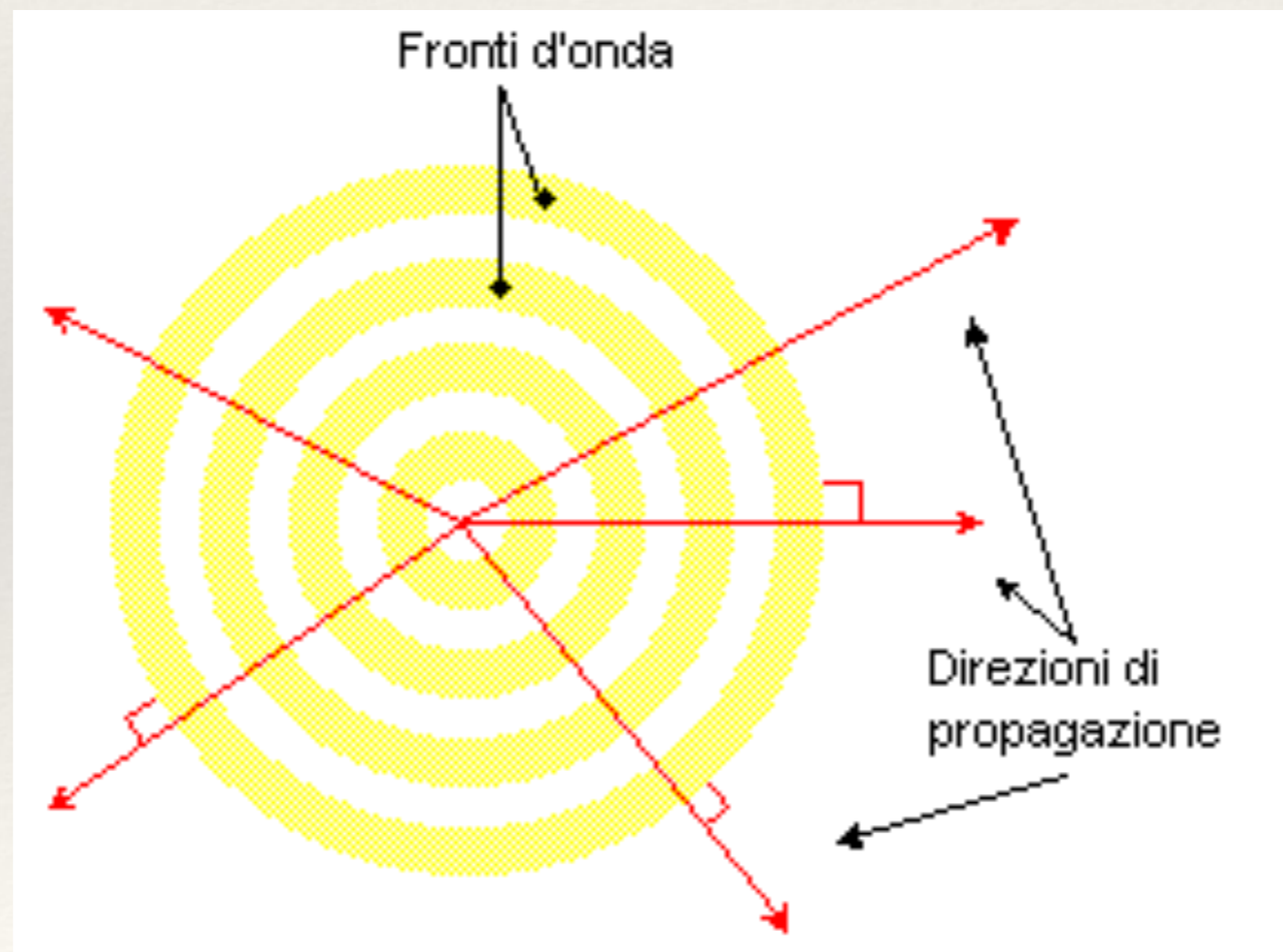
# Fronte d'onda

---



# Direzione di propagazione

Linea immaginaria perpendicolare al fronte d'onda che individua la direzione in cui l'onda si propaga.



---

# Relazioni tra i parametri dell'onda

---

La frequenza  $f$  è il reciproco del periodo  $T$ :

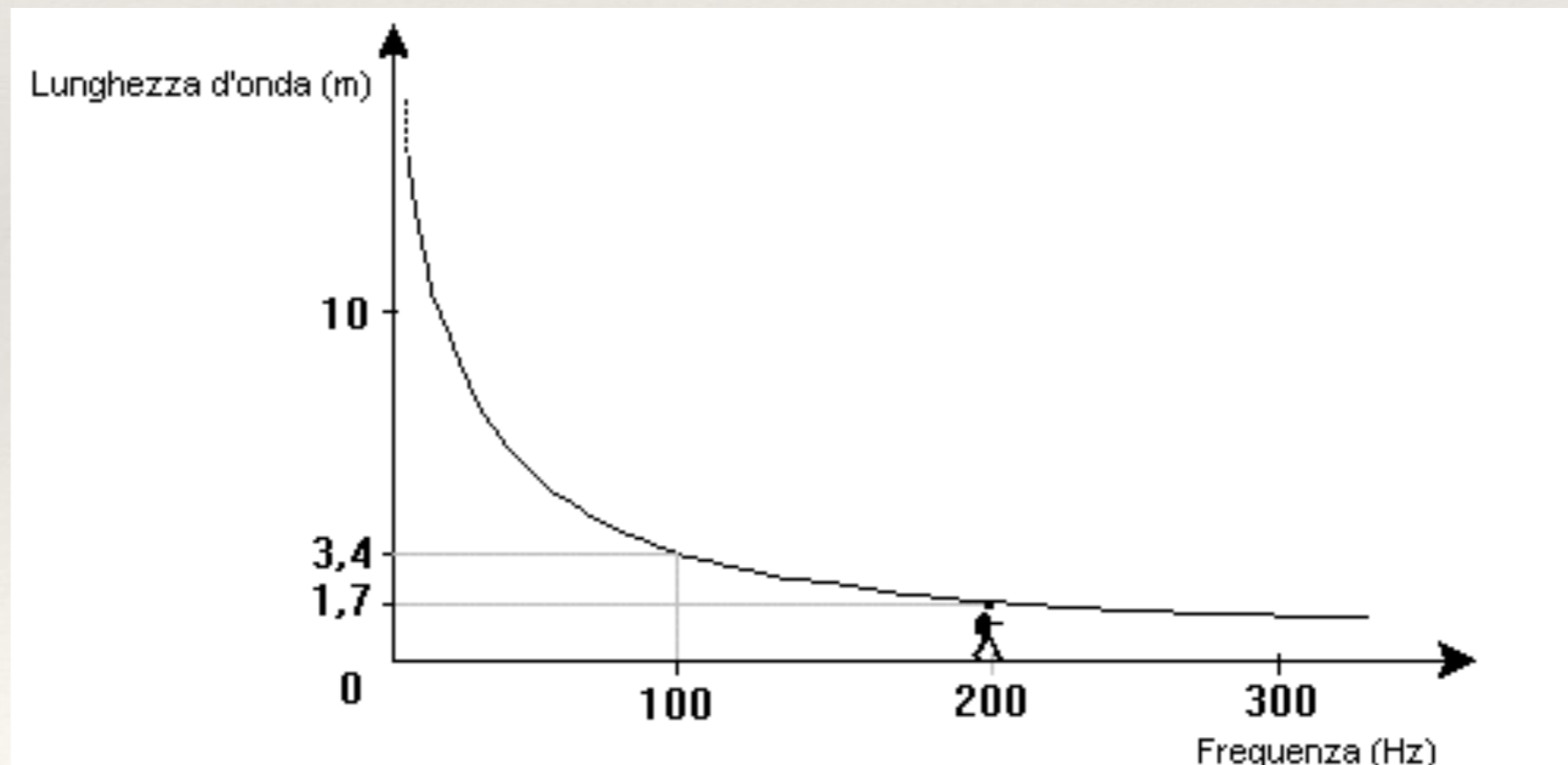
$$f = 1/T$$



# Relazioni tra i parametri dell'onda

La lunghezza d'onda  $\lambda$ , la frequenza  $f$  e la velocità di propagazione  $c$  sono legate dalla relazione:

$$c = f\lambda$$



---

# Fenomeni periodici e non periodici

---

Un fenomeno periodico è un particolare tipo di evento che si riproduce con le stesse caratteristiche dopo un certo intervallo di tempo.

Un suono musicale, ad esempio, è un suono di tipo periodico, vale a dire che la forma dell'onda di pressione che lo caratterizza si ripresenta ad intervalli regolari di tempo.

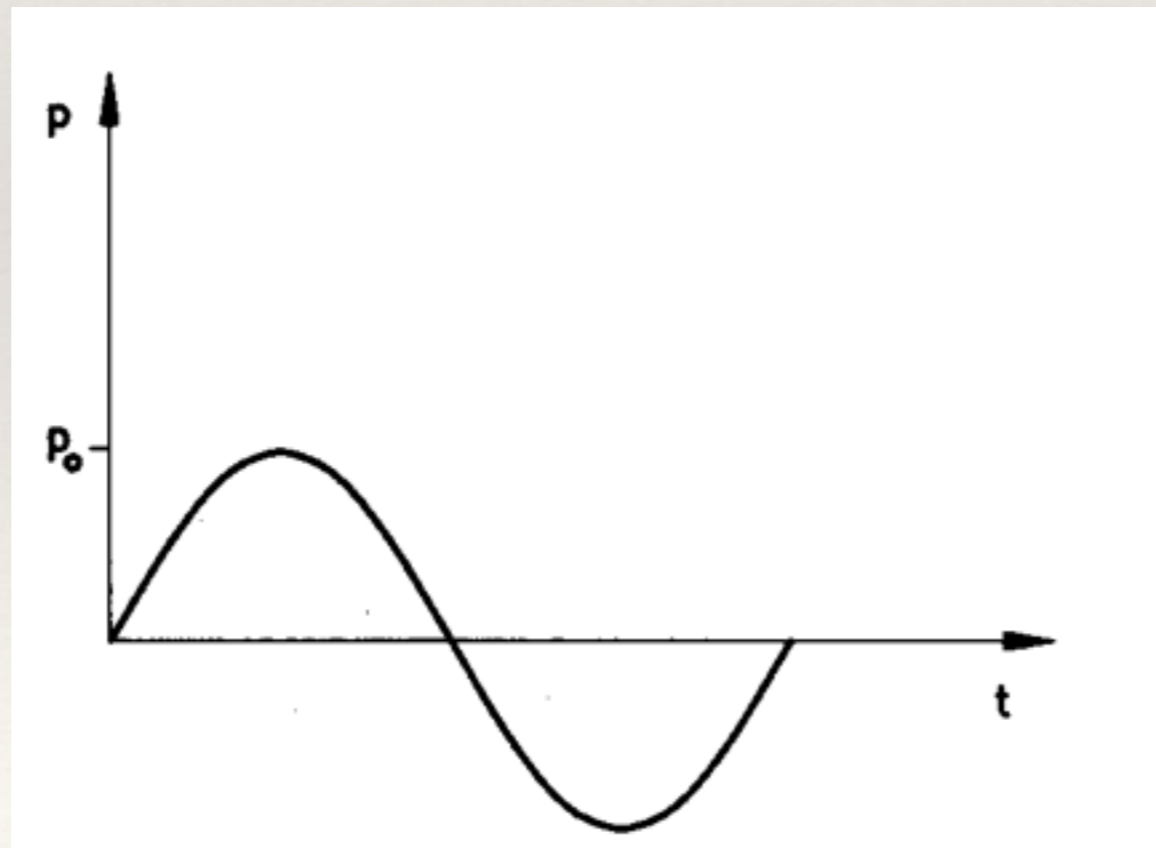
Un rumore ha in generale la caratteristica di essere una variazione di pressione non periodica, cioè che non si ripete con le stesse caratteristiche dopo un certo intervallo di tempo.

---

# Tono puro

---

È il tipo di oscillazione più semplice, caratterizzato da una determinata frequenza e rappresentato graficamente sia nello spazio che nel tempo da una sinusoidale.



---

# Teorema di Fourier

---

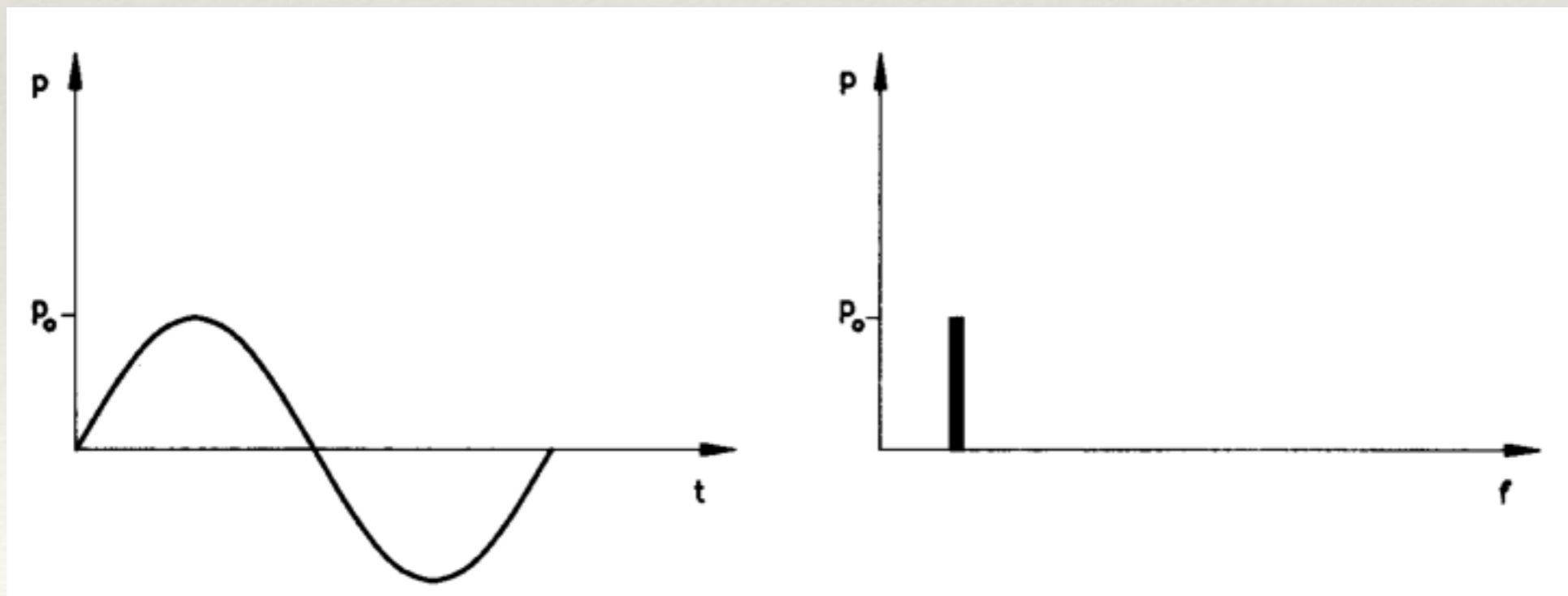
Si introduce il concetto di "spettro del suono" come una rappresentazione grafica in un istogramma dove in ascisse siano indicate le frequenze e in ordinate il livello di pressione acustica in dB.

---

# Teorema di Fourier

---

Se si considera, ad esempio, un suono costituito da un tono puro (una sinusoide perfetta), si osserverà, sullo spettro, una singola componente ad un certo livello e ad una frequenza pari a quella della sinusoide.



---

# Teorema di Fourier

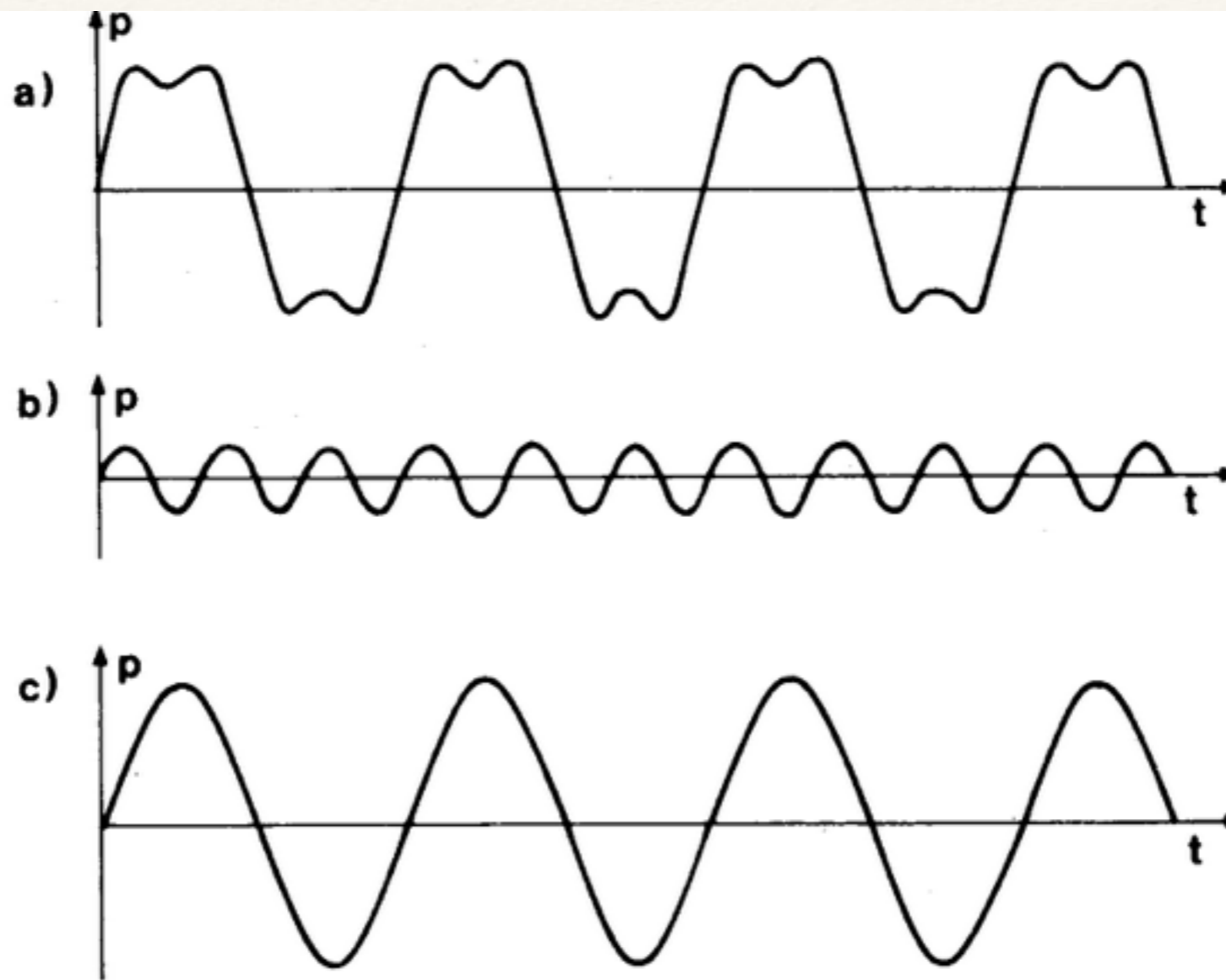
---

Generalmente un suono od un rumore sono caratterizzati da un insieme di frequenze.

Secondo un teorema dovuto al matematico Fourier, una oscillazione periodica complessa può essere considerata come somma finita o infinita di una serie di oscillazioni sinusoidali semplici, le cui frequenze sono multipli interi della più bassa, detta frequenza fondamentale.

L'insieme di tutte le frequenze così ottenute viene detto spettro acustico del suono in esame.

# Teorema di Fourier

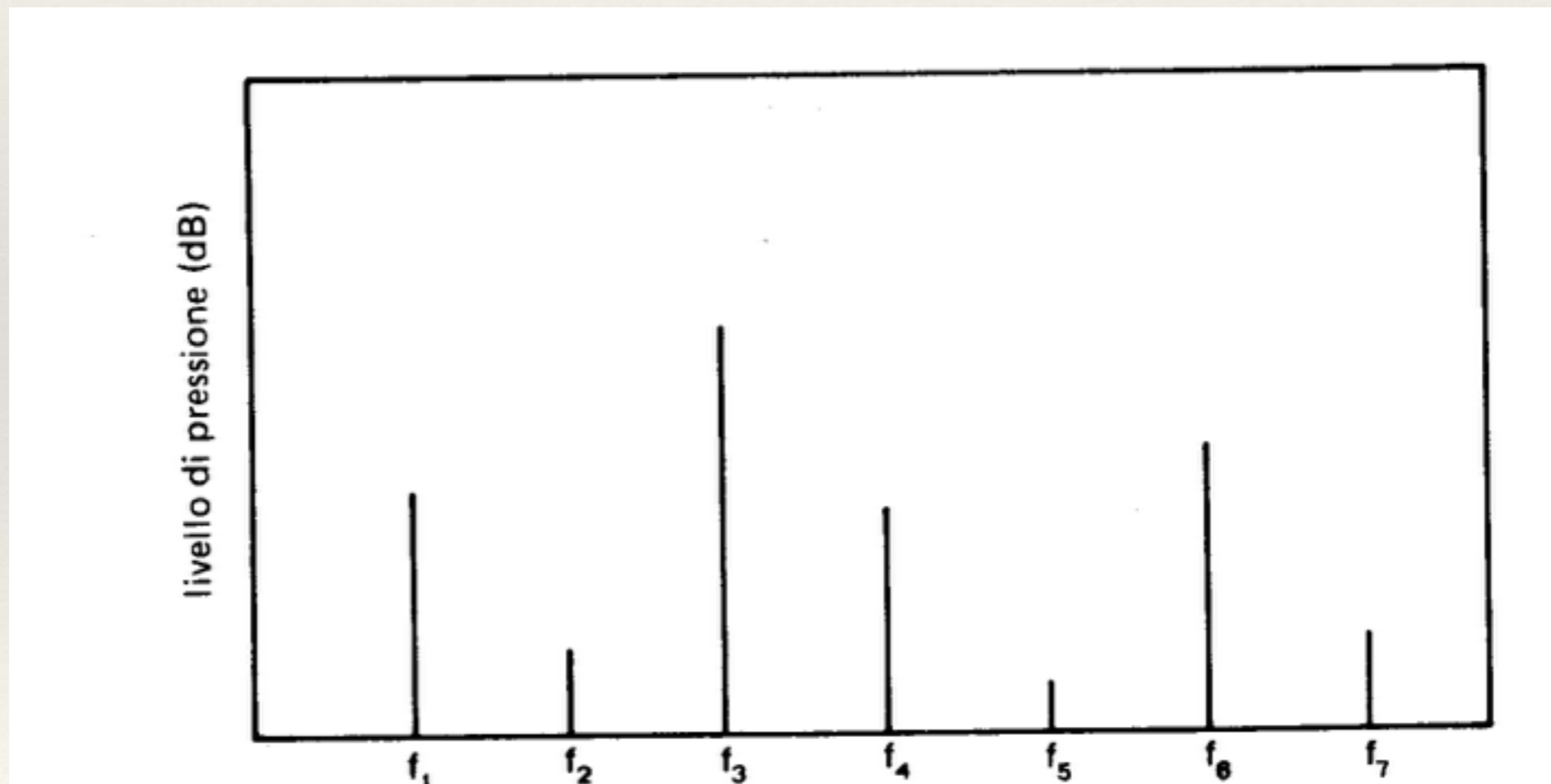


---

# Teorema di Fourier

---

Nel caso di un suono periodico lo spettro viene detto, a causa della sua forma caratteristica, spettro di righe.

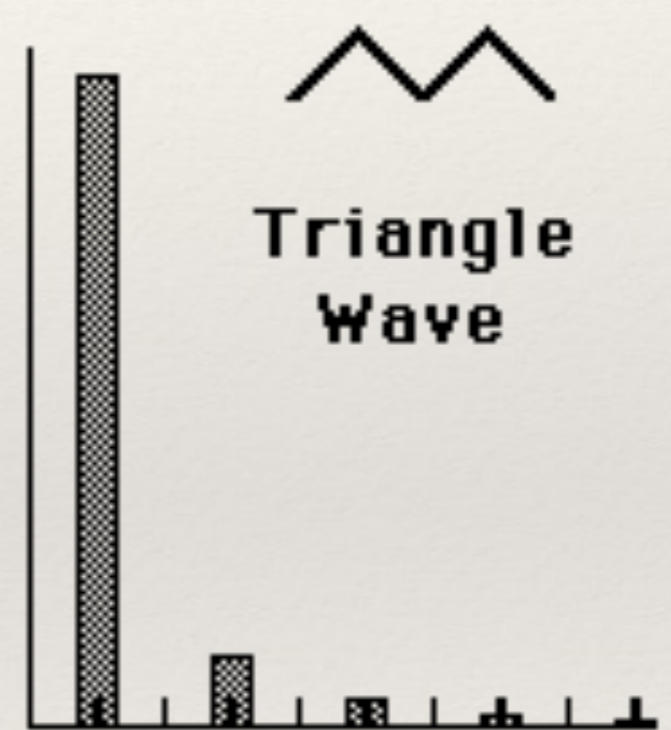
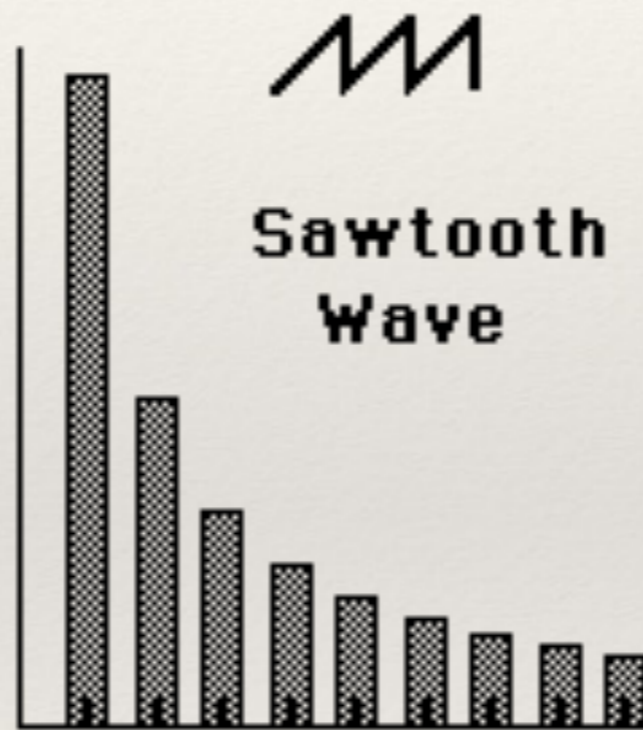
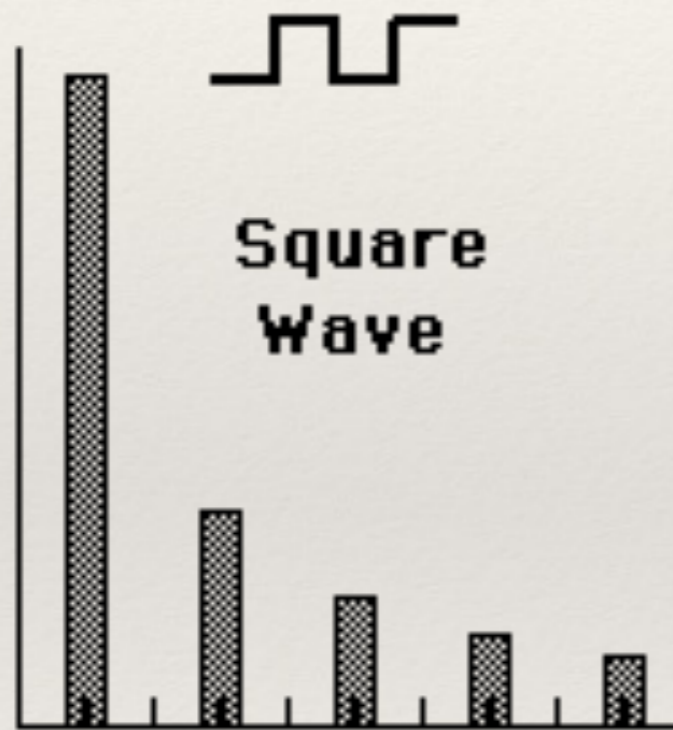




---

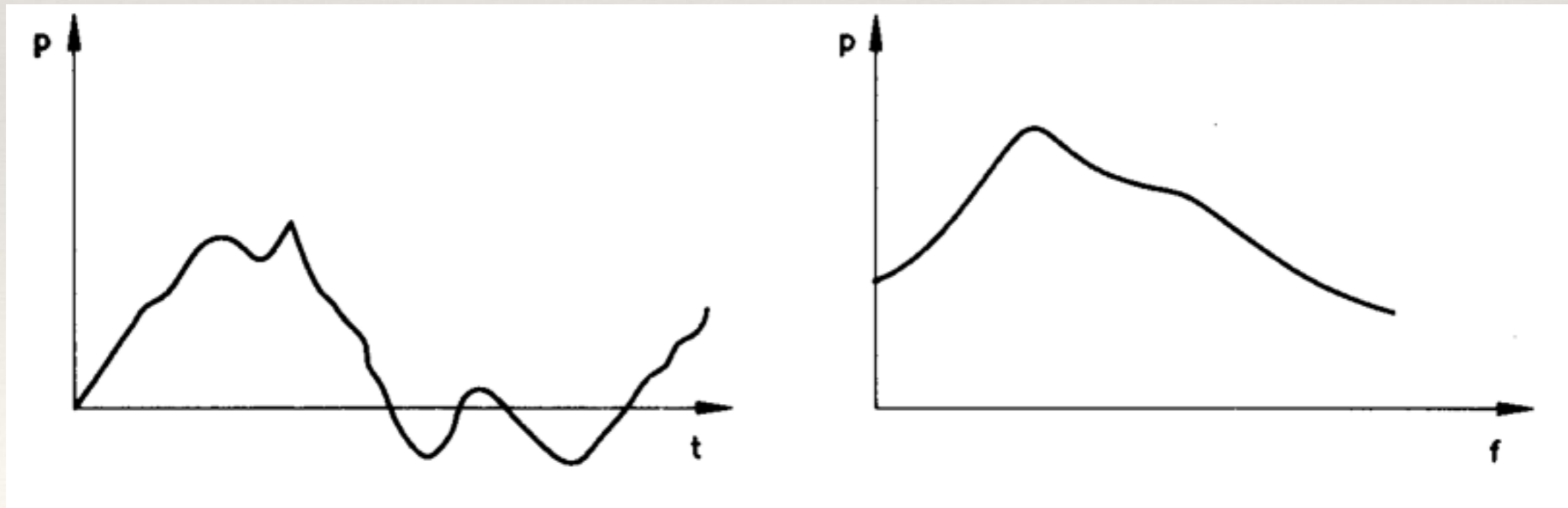
# Teorema di Fourier

---



# Teorema di Fourier

Nel caso di un suono non periodico l'oscillazione può essere scomposta in una somma infinita di toni puri, con frequenze non più multiple intere della più bassa, ma distribuite con continuità su tutta la gamma acustica: si parla in questo caso di spettro acustico continuo.



---

# Frequenza fondamentale, ipertoni ed armonici

---

In generale, il suono più grave in uno spettro qualsiasi viene detto frequenza fondamentale, mentre gli altri suoni vengono chiamati ipertoni: la fondamentale e gli ipertoni vengono chiamati parziali, inoltre se gli ipertoni risultano multipli interi della frequenza fondamentale, vengono definiti armonici.

---

# Modi di vibrazione

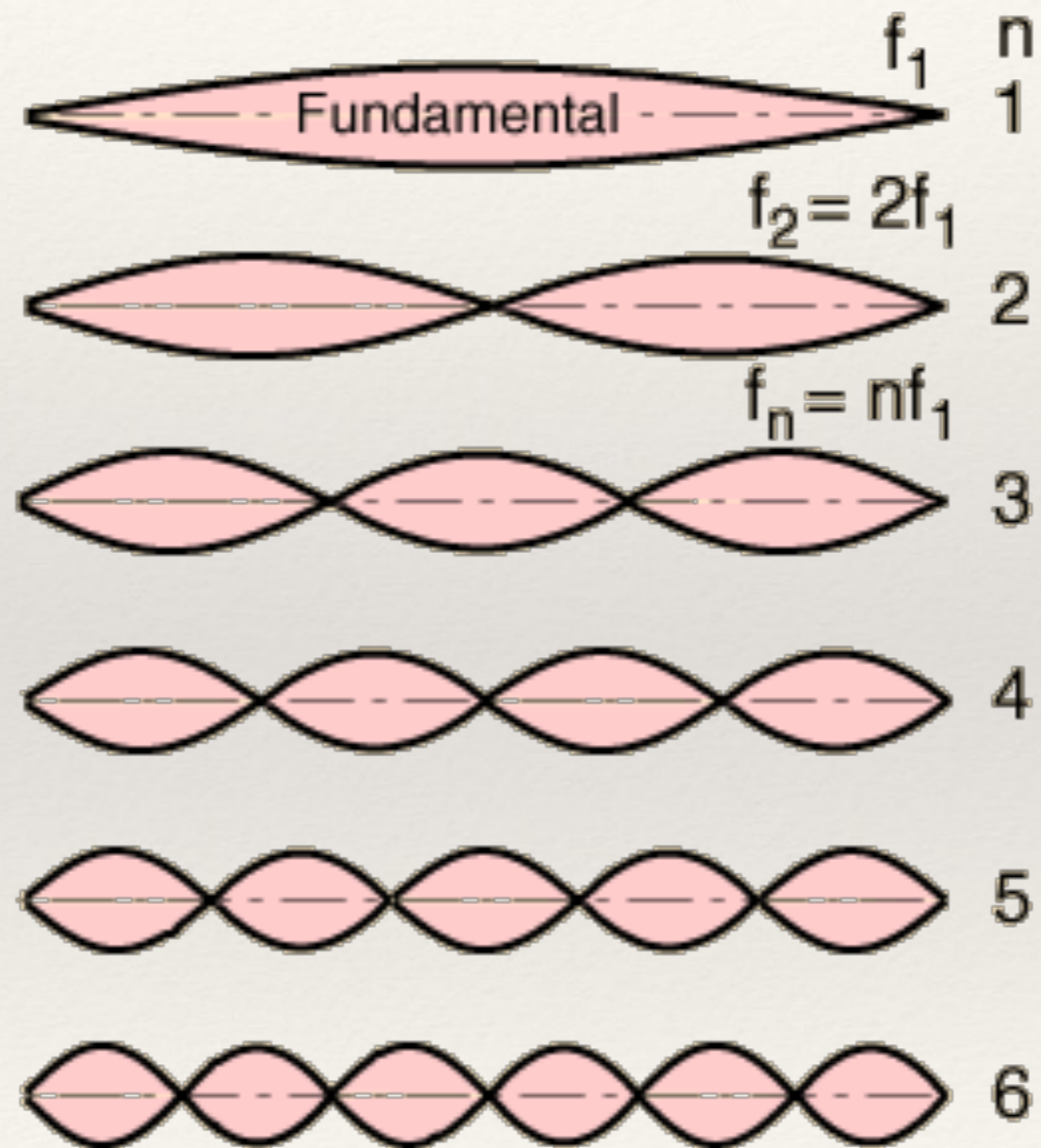
---

Ogni frequenza dello spettro generato da un corpo vibrante è associata ad una modalità differente di vibrazione del corpo stesso, detta modo di vibrazione.

Ciascun modo di vibrazione è caratterizzato da una precisa forma assunta dal corpo vibrante: più complessa risulta tale forma, più elevata risulta la frequenza di oscillazione associata.

La frequenza fondamentale risulta quindi associata alla modalità di vibrazione, o modo, dalla forma più semplice.

# Modi di vibrazione



---

# Nodi e ventri

---

In un determinato modo di vibrazione, i punti in cui il corpo vibrante non è soggetto ad oscillazione vengono detti nodi, mentre i punti in cui il corpo vibrante oscilla maggiormente vengono detti ventri.

In generale, all'aumentare della complessità della forma del modo, aumenta anche il numero di nodi e ventri.

---

# Pressione acustica e decibel

---

La pressione  $P$  è una grandezza fisica definita come il rapporto tra una forza  $F$  agente perpendicolarmente ad una superficie  $S$  e la superficie stessa.

$$P = \frac{F}{S}$$

La sua unità di misura è il pascal (Pa).

---

# Pressione acustica

---

L'orecchio umano non è in grado di percepire la pressione atmosferica ma le variazioni di pressione dovute ad una perturbazione rispetto al valore della pressione atmosferica stessa.

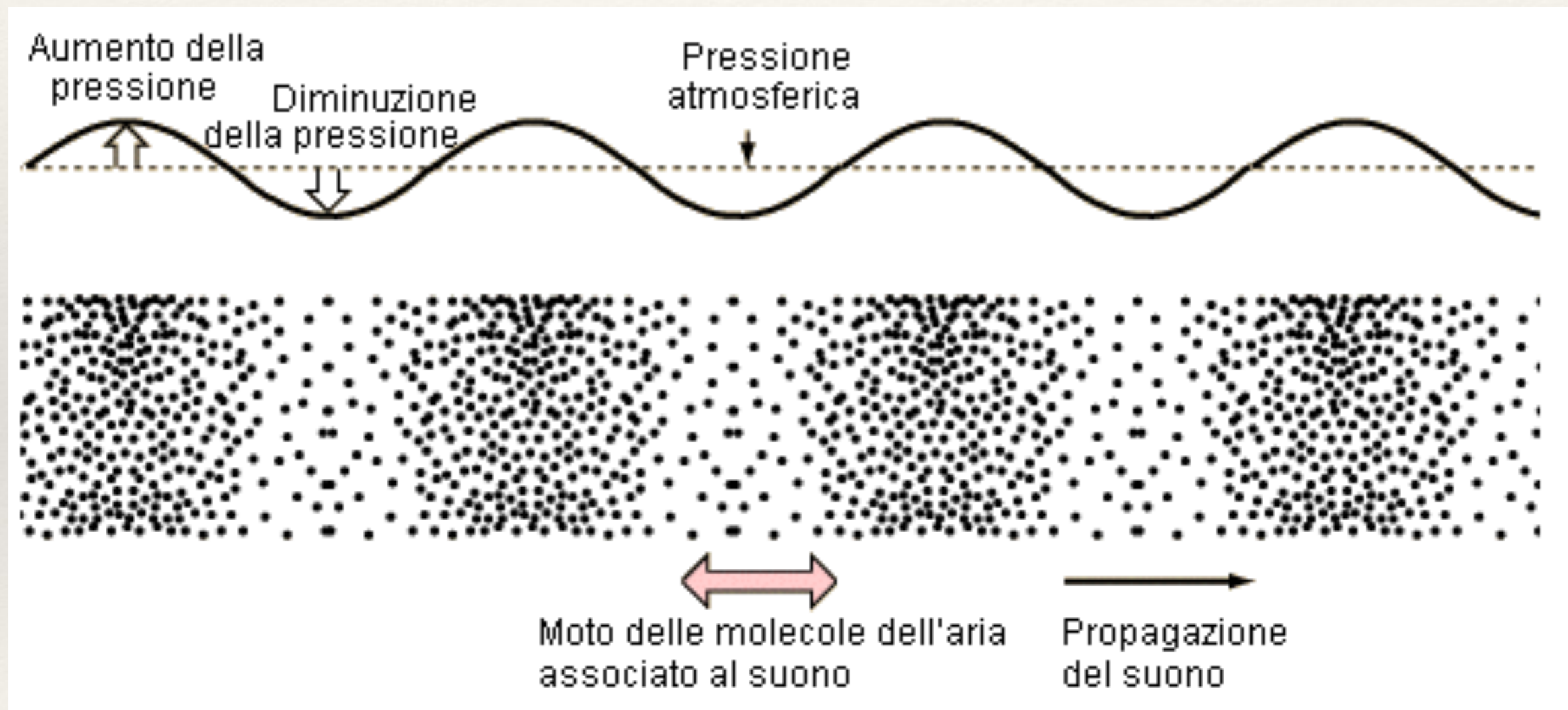
Detta  $P$  la pressione generata da un'onda e  $P_a$  la pressione atmosferica, la differenza:

$$\Delta P = P - P_a$$

viene denominata pressione acustica o pressione sonora.



# Pressione acustica



---

# Pressione efficace

---

Poiché la pressione acustica varia rapidamente nel tempo, per identificare il livello di pressione sonora di un determinato fenomeno sonoro si preferisce utilizzare il valore quadratico medio della pressione sonora o pressione efficace definito come:

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

dove T è il periodo del fenomeno sonoro.

---

# SPL

---

Il grado di sensibilità del nostro orecchio varia da valori di pressione compresi tra  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa (la soglia di udibilità, corrispondente all'oscillazione di un atomo!) e 20 Pa (soglia del dolore), per questo motivo una scala lineare delle pressioni risulta del tutto inadeguata

---

# SPL

---

Considerato anche il fatto che la risposta del nostro orecchio è di tipo logaritmico, si preferisce definire il livello di pressione sonora istantaneo o SPL (Sound Pressure Level) tramite la relazione:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p(t)}{p_0} \right)^2$$

dove  $p$  è il valore istantaneo della pressione sonora e  $p_0$  è una pressione di riferimento che si assume uguale a  $20 \mu\text{Pa} = 0.00002 \text{ Pa}$ ).

---

# SPL

---

La formula data identifica una scala di valori caratterizzata da un particolare indice numerico detto decibel (dB) rispetto ad un livello di riferimento corrispondente alla suddetta  $p_0$ . Si noti che l'unità logaritmica dB fornisce solo una misura del rapporto tra due valori della grandezza in esame e solo quando viene fissato un valore di riferimento diviene possibile risalire al valore della grandezza posta al numeratore di tale rapporto.

Per tale motivo la pressione di riferimento va sempre specificata con la dicitura "re.20  $\mu\text{Pa}$ " (dB riferiti a 20 micropascal).

---

# SPL

---

Si fa notare che ogni aumento della SPL di un dB rappresenta una variazione del 13% nel livello di pressione: occorre dunque un aumento di 6 dB per ottenere un raddoppio del livello di pressione, mentre una variazione di 20 dB corrisponde ad un aumento di un fattore 10 del valore di pressione.

---

# SPL

---

Il livello di pressione sonora relativo ad un determinato fenomeno sonoro si può esprimere mediante la pressione efficace tramite la relazione:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p_e}{p_0} \right)^2$$

dove  $p_e$  è il valore efficace della pressione sonora e  $p_0$  è la pressione di riferimento pari a  $20 \mu\text{Pa} = 0.00002 \text{ Pa}$ ).

---

# Somma di livelli sonori

---

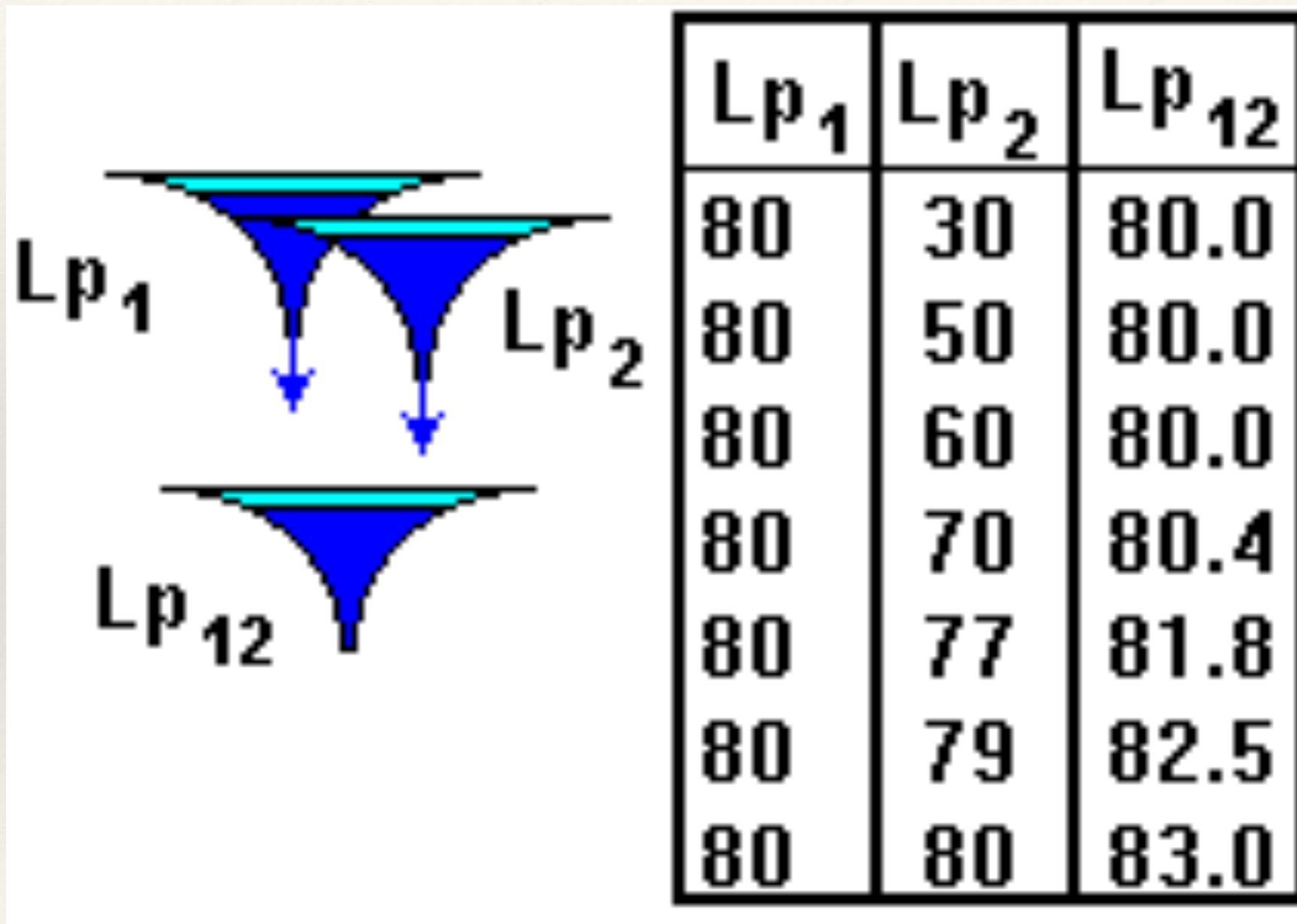
Poiché la scala dei decibel è una scala di tipo logaritmico e non lineare, non è possibile eseguire direttamente la somma di livelli di pressione sonora.

Si utilizza la seguente formula:

$$L_{tot} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}}$$



# Somma di livelli sonori



---

# Media di livelli sonori

---

Poiché la scala dei decibel è una scala di tipo logaritmico e non lineare, non è possibile eseguire direttamente la media di livelli di pressione sonora.

Si utilizza la seguente formula:

$$L_{medio} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}}}{N}$$

---

# Regola dei 3 dB

---

Utilizzando la formula precedente si ottiene che sommando due suoni della medesima intensità si ottiene un raddoppio della SPL: ad esempio, se ad una sorgente avente una SPL di 80 dB se ne aggiunge un'altra identica, il livello totale di SPL sarà di 83 dB e non di 160 dB.

Ciò viene generalizzato in una semplice regola detta “dei 3 dB”, molto utile nella soluzione di semplici casi pratici: ad ogni raddoppio della SPL corrisponde un aumento di 3 dB, viceversa ad ogni dimezzamento della SPL corrisponde una diminuzione di 3 dB.

Ciò rende ragione del perché nelle normative si utilizza spesso il valore di 3 dB.

---

# Regola dei 10 dB

---

Un'altra regola empirica permette di affermare che se la differenza tra due SPL è maggiore o uguale a 10 dB, i due suoni non si sommano ma prevale il maggiore.

---

# Caratteristiche intrinseche della sorgente sonora

---

Le caratteristiche acustiche della sorgente sonora sono:

- 🔊 Frequenza (spettro)
- 🔊 Potenza acustica
- 🔊 Intensità acustica
- 🔊 Direttività

---

# Frequenza

---

La sorgente sonora viene caratterizzata dalla sua frequenza di emissione.

Nel caso di un suono complesso risulta indispensabile l'analisi dello spettro della frequenza in bande di ampiezza relativa costante, fra le quali le più adoperate sono quelle di ottava e di terzo di ottava.

---

# Potenza acustica

---

La potenza acustica  $W$  irradiata da una sorgente è una grandezza scalare dipendente unicamente dalla sorgente stessa e definita come il rapporto tra l'energia  $E$  emessa in un certo intervallo di tempo  $t$  e l'intervallo di tempo stesso:

$$W = \frac{E}{t}$$

La sua unità di misura è il watt (W).

---

# Livello di potenza acustica

---

La potenza acustica  $W$  irradiata dalla sorgente viene espressa solitamente tramite il livello di potenza  $L_W$ , in dB:

$$L_W = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right)$$

dove  $W_0$  è il livello di riferimento pari a  $10^{-12}$  W.

Per scopi tecnici si è soliti fornire lo spettro della potenza acustica, fornito mediante i dati di una analisi per bande di ampiezza relativa costante, fra le quali le più adoperate sono le bande di ottava e quelle di terzo di ottava.



# Livelli di potenza acustica

**Typical sound power outputs (in WATTS) and equivalent sound power levels (in dB):**

|                          | Power     | Sound power level |
|--------------------------|-----------|-------------------|
| whisper                  | $10^{-9}$ | 30                |
| vacuum cleaner           | $10^{-6}$ | 60                |
| normal voice             | $10^{-5}$ | 70                |
| raised voice             | $10^{-3}$ | 90                |
| chain saw                | 1         | 120               |
| orchestra (75 musicians) | 10        | 130               |
| quadripole jet exhaust   | $10^4$    | 160               |

---

# Intensità acustica

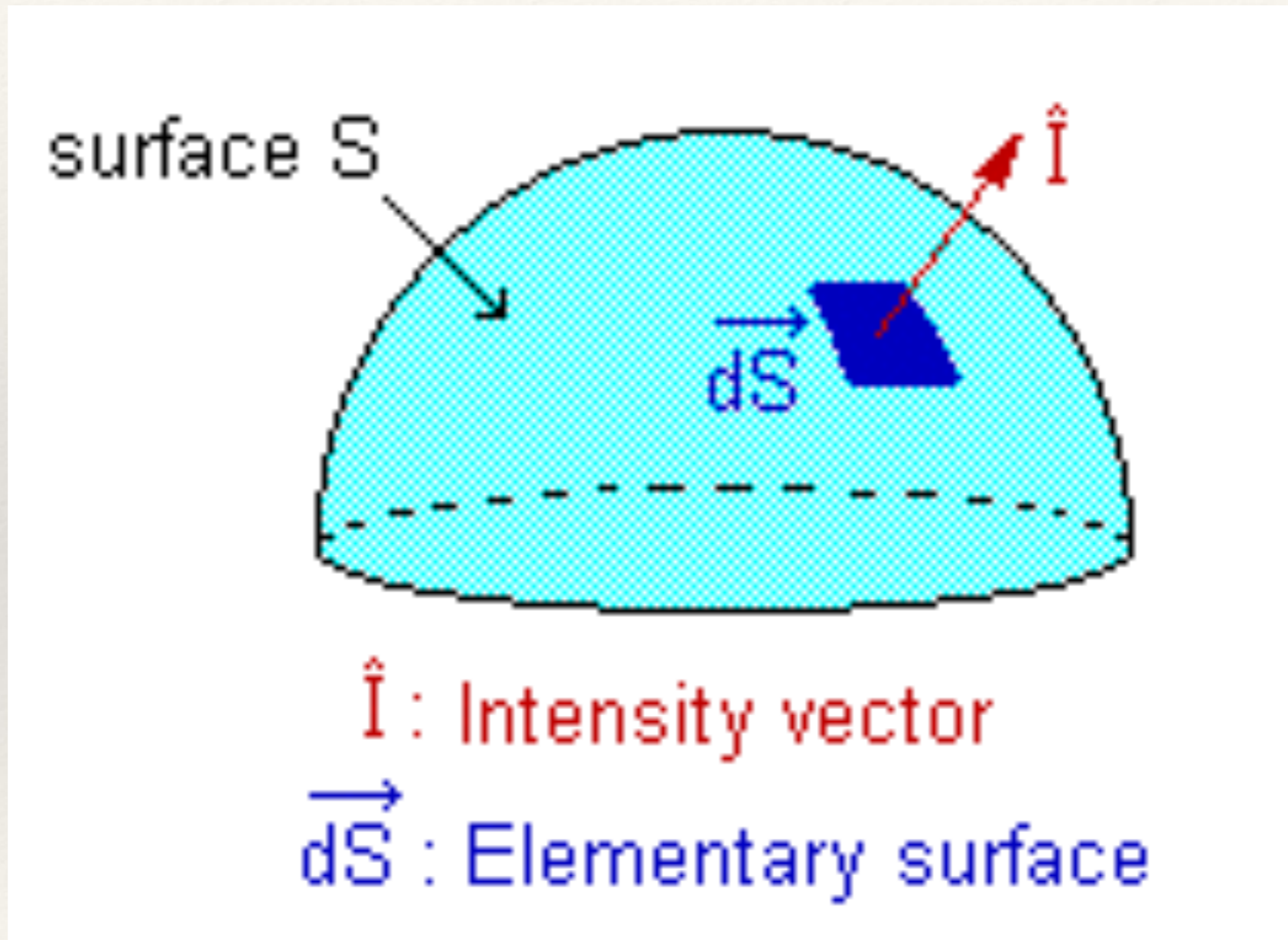
---

L'intensità acustica  $I$  irradiata da una sorgente è una grandezza vettoriale definita come il flusso di energia  $E$  emesso in un certo intervallo di tempo  $t$  attraverso una determinata superficie  $S$ :

$$I = \frac{E}{St} = \frac{W}{S}$$

La sua unità di misura è il  $W/m^2$ .

# Intensità acustica



---

# Livello di intensità acustica

---

L'intensità acustica  $I$  irradiata da una sorgente viene espressa solitamente tramite il livello di intensità  $L_I$ , in dB:

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

dove  $I_0$  è il livello di riferimento pari a  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>.

---

# Intensità sonora

---

Poiché vale:

$$W = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{F \Delta s}{\Delta t} = Fu$$

Dividendo per  $S$  si ha:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{Fu}{S} = pu$$

---

# Intensità sonora

---

L'intensità sonora  $I$  di un'onda piana è quindi data da:

$$I = pu$$

dove  $p$  è la pressione esercitata sul mezzo e  $u$  la velocità delle particelle.

Tale formula vale anche per onde sferiche nel caso in cui  $r \gg \lambda$ .

---

# Intensità sonora

---

Ricordando che:

$$u = \frac{p}{\rho c}$$

si ottiene:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

L'intensità e quindi l'energia di un'onda è proporzionale al quadrato della pressione.

Tale formula vale anche per onde sferiche nel caso in cui  $r \gg \lambda$ .

---

# Direttività

---

Il fattore di direttività  $Q$  è definito come:

$$Q = \frac{I_{\theta}}{I_{tot}}$$

dove  $I$  è l'intensità sonora emessa nella direzione  $\theta$  e  $I_{tot}$  l'intensità sonora che avrebbe il campo acustico in quel punto, se fosse omnidirezionale.



---

# Direttività

---

Poiché:

$$I = \frac{W}{S}$$

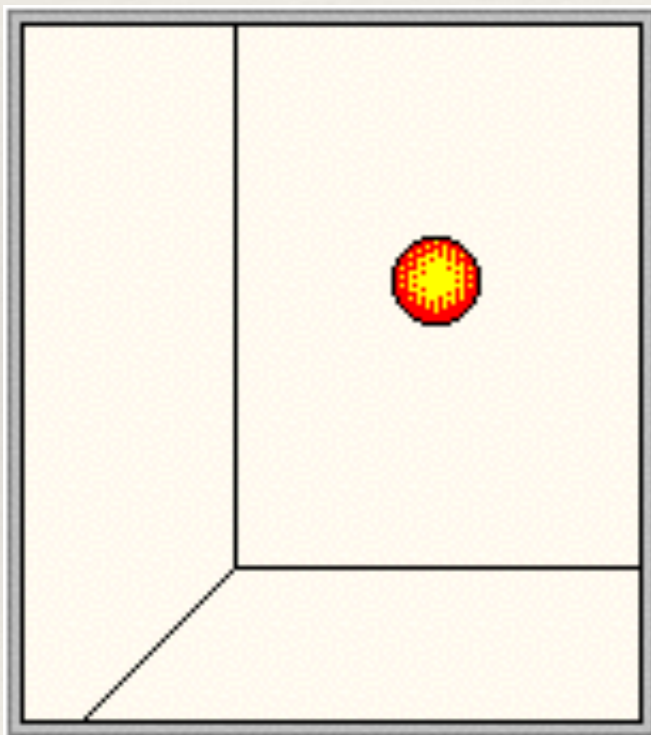
con  $W$  costante, si può anche scrivere:

$$Q = \frac{S_{tot}}{S} = \frac{4\pi r^2}{S}$$

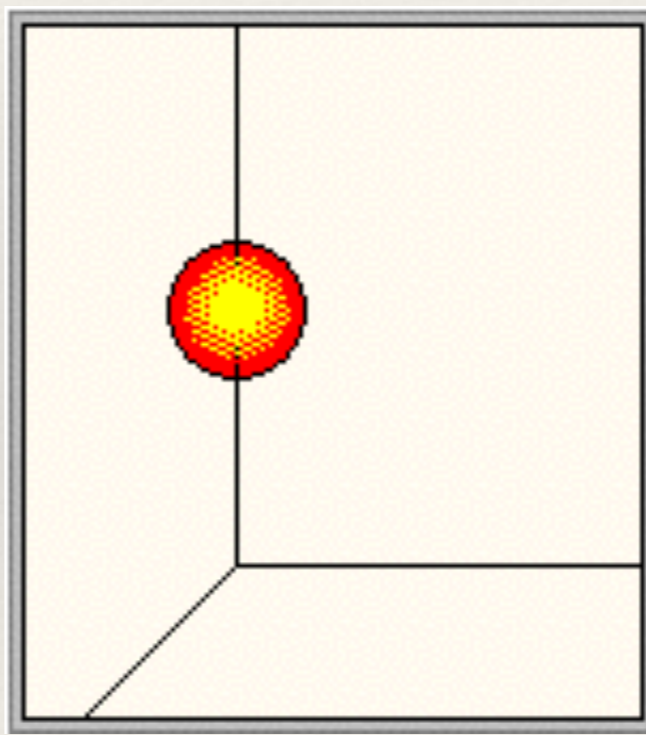
dove  $S$  è la superficie considerata.

# Direttività

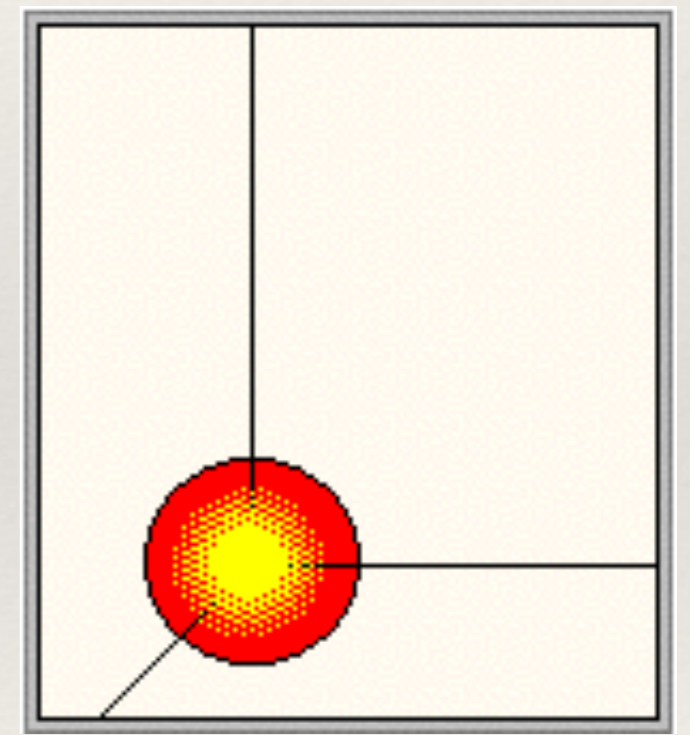
Q può assumere valori differenti a seconda del posizionamento della sorgente sonora: ad esempio se la sorgente viene posta su di un piano perfettamente riflettente Q assume il valore 2.



$$Q = 2 (+ 3 \text{ dB})$$



$$Q = 4 (+ 6 \text{ dB})$$



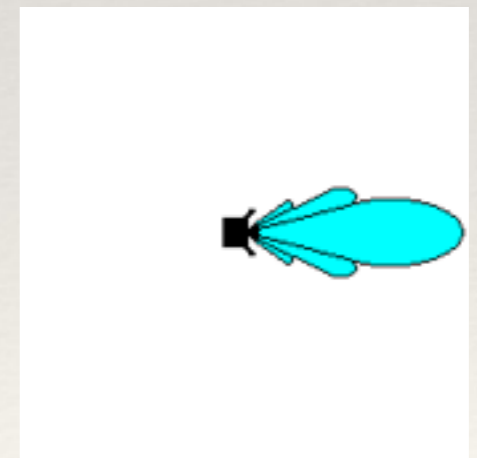
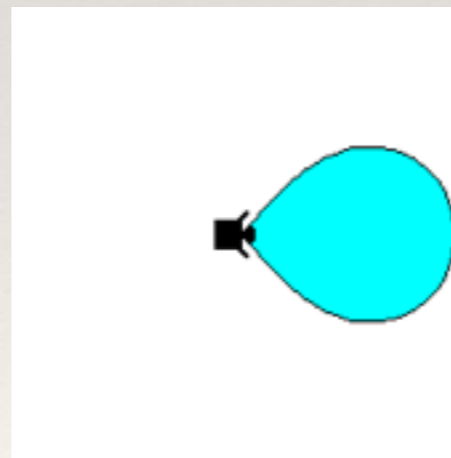
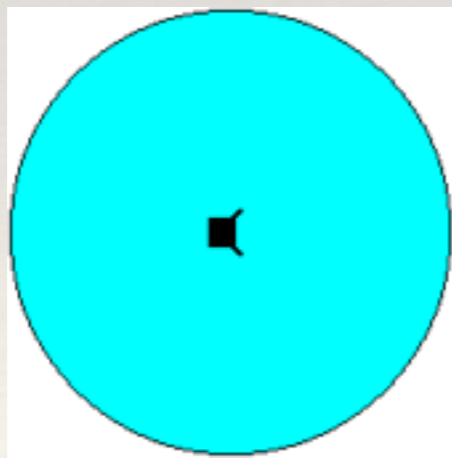
$$Q = 8 (+ 9 \text{ dB})$$

---

# Direttività

---

Le sorgenti che emettono alte frequenze sono più direzionali di quelle che emettono basse frequenze: è infatti più semplice evitare il fischio di una sirena spostandosi anche di poco rispetto alla sua direzione di propagazione che il rumore di un compressore o di un ventilatore.



---

# Caratteristiche della propagazione del suono

---

Come tutti i fenomeni ondulatori, anche il suono è soggetto alle leggi che regolano la propagazione delle onde.

---

# Assorbimento

---

La propagazione del suono avviene, nei casi reali, in un mezzo essenzialmente dissipativo ed è quindi accompagnata da una progressiva attenuazione dell'intensità dell'onda sonora, dovuta all'assorbimento, della quale è necessario tenere conto, specialmente nel caso di distanze molto grandi.

---

# Riflessione

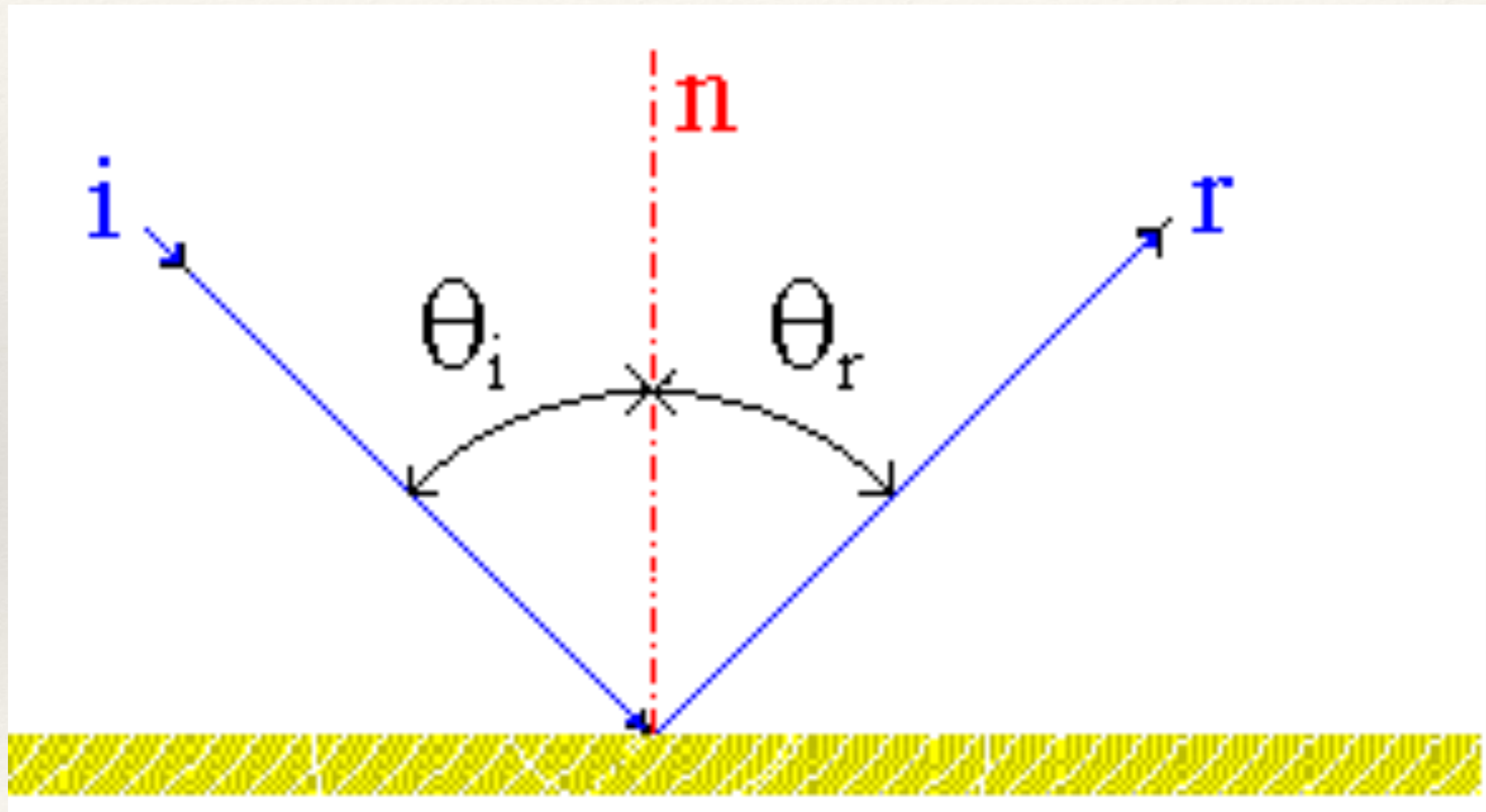
---

Quando un'onda incontra una superficie perfettamente riflettente viene riflessa secondo le seguenti leggi:

la direzione di propagazione, la direzione di riflessione e la perpendicolare alla superficie riflettente giacciono tutte nello stesso piano;

l'angolo formato dalla perpendicolare alla superficie di separazione e la direzione di incidenza (angolo di incidenza) è uguale all'angolo formato dalla stessa perpendicolare e la direzione di riflessione (angolo di riflessione).

# Riflessione



---

# Rifrazione

---

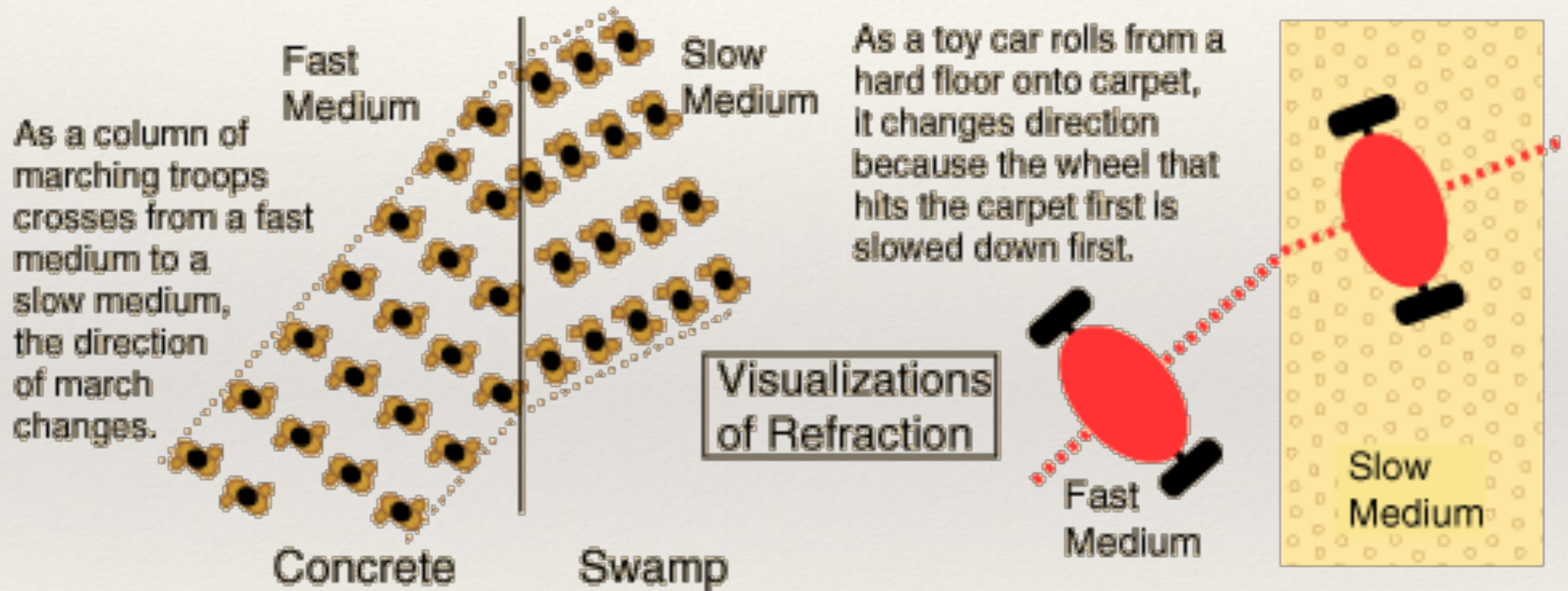
Quando un'onda incontra la superficie di separazione tra due mezzi aventi caratteristiche differenti subisce una variazione di direzione, detta rifrazione, regolata dalle seguenti leggi:

la direzione dell'onda incidente, dell'onda rifratta e la perpendicolare alla superficie di separazione giacciono nello stesso piano;

la direzione dell'onda rifratta si avvicina alla perpendicolare alla superficie di separazione se nel secondo mezzo l'onda si propaga meno velocemente che nel primo, viceversa la direzione dell'onda rifratta si allontana dalla perpendicolare alla superficie di separazione se nel secondo mezzo l'onda si propaga più velocemente che nel primo.



# Rifrazione



---

# Diffusione

---

Le semplici leggi geometriche che regolano la riflessione e la rifrazione sono valide soltanto nel caso che siano verificate due condizioni altrettanto semplici:

le dimensioni della superficie di separazione tra i due mezzi non devono essere confrontabili con la lunghezza d'onda del suono incidente;

le dimensioni delle eventuali scabrosità della superficie non devono essere confrontabili con la lunghezza d'onda del suono incidente.

---

# Diffrazione

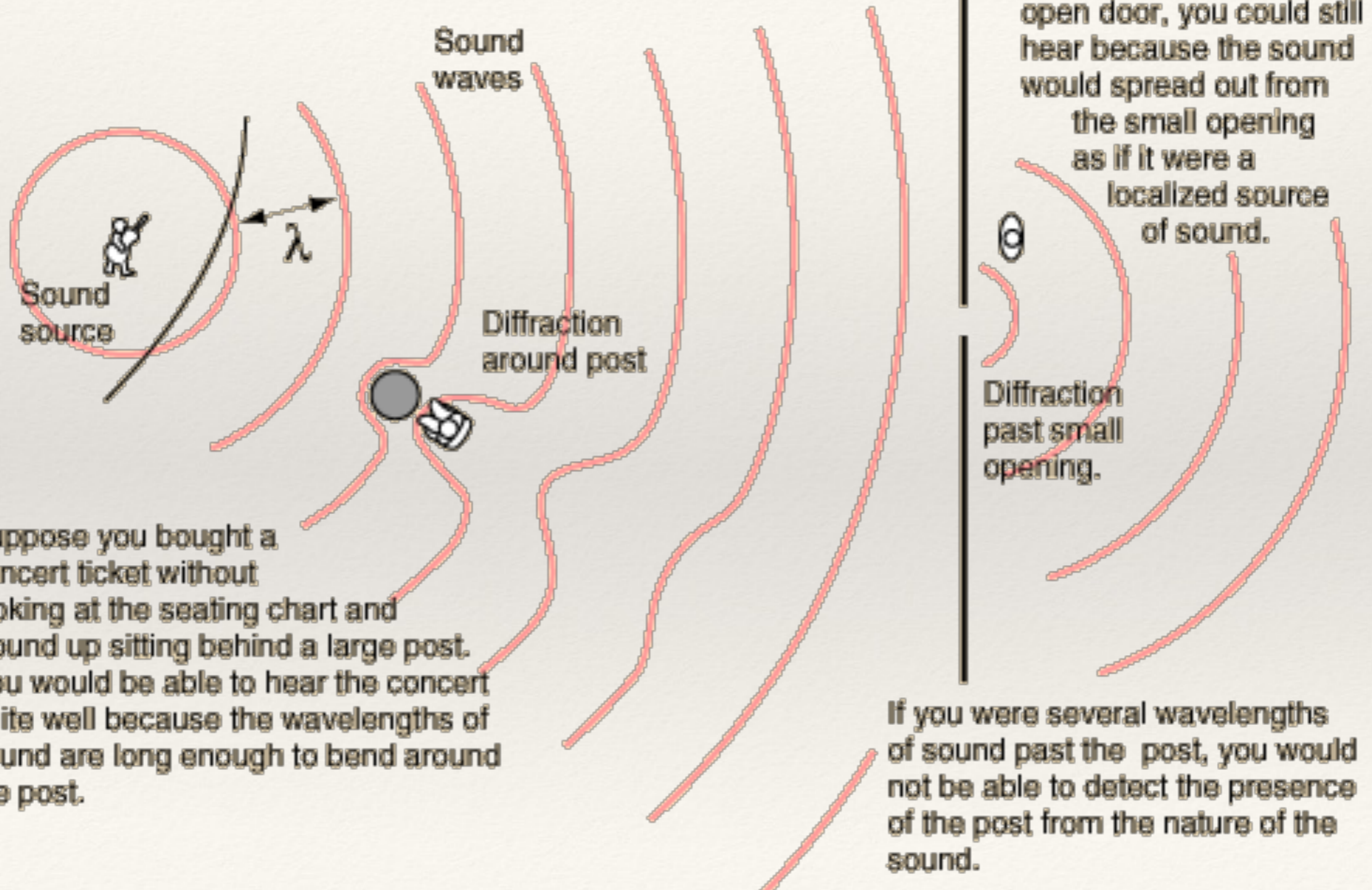
---

In presenza di un ostacolo alla propagazione di un'onda si possono avere due effetti dipendenti dal rapporto  $d/\lambda$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della perturbazione incidente e  $d$  è la dimensione lineare dell'ostacolo:

se  $d \gg \lambda$  si ha una zona di “ombra acustica”;

se  $d \ll \lambda$  l'onda si propaga al di là dell'ostacolo.

# Diffrazione



---

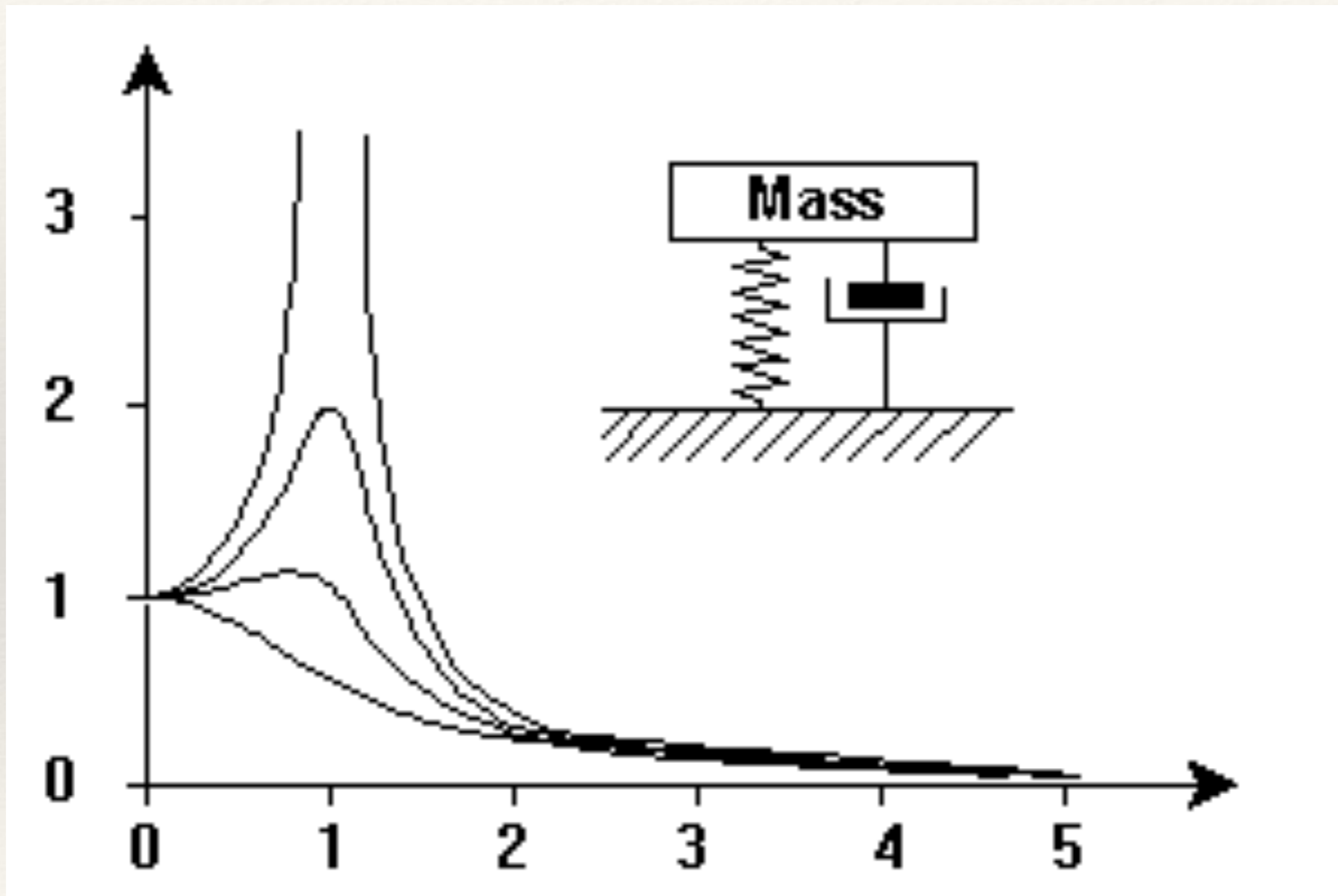
# Risonanza

---

Ogni corpo, se messo in vibrazione, oscilla a particolari frequenze dette frequenze proprie di oscillazione.

Se un onda avente frequenza pari ad una delle frequenze proprie del corpo va a colpire il corpo stesso ne provoca delle oscillazioni via via crescenti che raggiungono teoricamente una ampiezza infinita.

# Risonanza



---

# Analisi in frequenza

---

L'orecchio umano non è in grado di selezionare singolarmente ciascuna delle frequenze che compongono un suono, ma le percepisce a gruppi: ad esempio l'orecchio umano distingue bene tra 20 e 21 Hz ma non tra 1000 e 1001 Hz.

Per questo motivo nell'analisi di un suono si utilizzano dei particolari circuiti elettronici chiamati filtri.

---

# Filtri

---

In generale i filtri più utilizzati in elettronica sono:

- passa basso (elimina le frequenze superiori ad un certo valore),
- passa alto (elimina le frequenze inferiori ad un certo valore),
- passa banda (seleziona le frequenze comprese tra due valori),
- elimina banda (elimina le frequenze comprese tra due valori).



---

# Bande di analisi

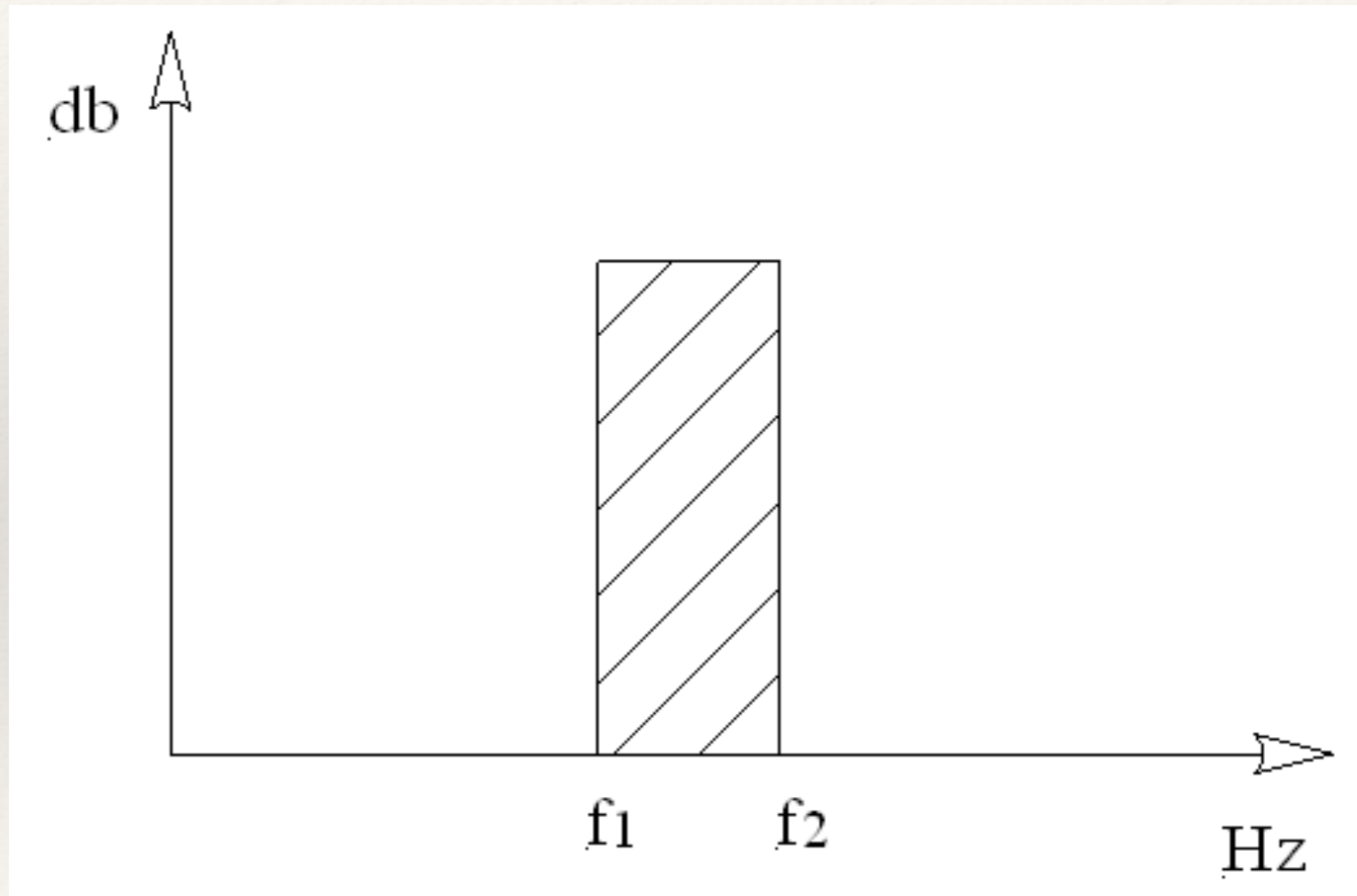
---

Nell'analisi di un segnale è interessante esaminare l'aspetto energetico del segnale stesso, ovvero quanta energia è contenuta in un certo intervallo di frequenze. Per questo motivo si è soliti misurare uno spettro e quindi farne l'analisi in frequenza, utilizzando dei filtri passa banda con una ampiezza finita. Tali filtri sono detti bande di analisi.

---

# Bande di analisi

---



---

# Bande di analisi

---

Il valore complessivo del livello di una banda è la somma energetica di tutte le componenti sinusoidali che hanno frequenze comprese tra gli estremi delle bande, chiamati  $f_1$  e  $f_2$ . Se si considera un rumore che ha energia a tutte le frequenze, cioè ha uno spettro continuo, qualunque banda si prenda, anche se piccola, si troverà sempre un po' di energia: si intuisce quindi che più larga è la banda maggiore sarà il livello energetico presente nella stessa.

Questo significa, parlando di analisi in frequenza, che i livelli assoluti non hanno molto senso se non si normalizza l'ampiezza della banda.

---

# Normalizzazione delle bande

---

Si hanno due metodi per la normalizzazione delle bande:  
bande di analisi costanti: apertura in frequenza fissata (intesa come intervallo di Hz) e costante su tutto lo spettro, ovvero:

$$f_2 - f_1 = k$$

bande di analisi a percentuale costante (utilizzato a livello I.S.O., a differenza del precedente): rapporto costante tra l'ampiezza delle bande stesse e la frequenza di centro banda, ovvero:

$$\frac{f_2 - f_1}{f_c} = k$$

---

# Bande a percentuale costante

---

Generalmente si preferisce utilizzare bande a percentuale costante.

I motivi di questa scelta sono fondamentalmente due: motivo fisiologico (il nostro sistema uditivo risponde in maniera più approssimata al concetto di apertura percentuale costante che non a quello ad apertura costante),

motivo musicale (questa scelta governa le scale musicali, con le cosiddette ottave).

---

# Ampiezza di banda

---

Si definisce ampiezza della banda  $\Delta f$  la differenza tra le due frequenze limite:

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

---

# Frequenza di centro banda

---

Si definisce frequenza di centro banda  $f_c$  la media geometrica delle due frequenze limite:

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2}$$

---

# Filtri a bande di ottava

---

Per l'analisi spettrale i filtri a banda percentuale costante più utilizzati sono quelli a bande di ottava e a bande di terzo di ottava.

Si definisce banda di ottava un insieme di frequenze delimitato inferiormente e superiormente da due frequenze  $f_1$  ed  $f_2$  tali che il loro rapporto  $f_2/f_1$  sia pari a 2: si può infatti verificare che due suoni a distanza di un'ottava hanno uno il doppio la frequenza dell'altro.



---

# Filtri a bande di ottava

---

Secondo la normativa internazionale IEC (International Electrotechnical Commission) n° 225 i valori delle frequenze centrali delle bande di ottava si ottengono moltiplicando e dividendo per 2 la frequenza base di 1000 Hz.

L'intero spettro udibile viene ad essere coperto da dieci bande di ottava.

---

# Filtri a bande di ottava

---

Si dimostra che, nelle bande di ottava, l'ampiezza della banda cresce proporzionalmente alla frequenza di centro banda  $f_c$  e che rimane costante il rapporto  $\Delta f / f_c$ : tale rapporto vale 0,707.

Le frequenze inferiori  $f_1$  e superiori  $f_2$  si calcolano mediante le relazioni:

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

---

# Filtri a bande di terzo di ottava

---

Poiché queste bande non sono in numero elevato, cercando di descrivere suoni o rumori non si riuscirebbe a dare la giusta precisione: si interviene allora con il concetto di suddivisione della banda.

Se si divide la banda di ottava in tre parti si ottengono bande ad  $1/3$  di ottava, in sei parti si avranno bande ad  $1/6$  di ottava e così via.

---

# Filtri a bande di terzo di ottava

---

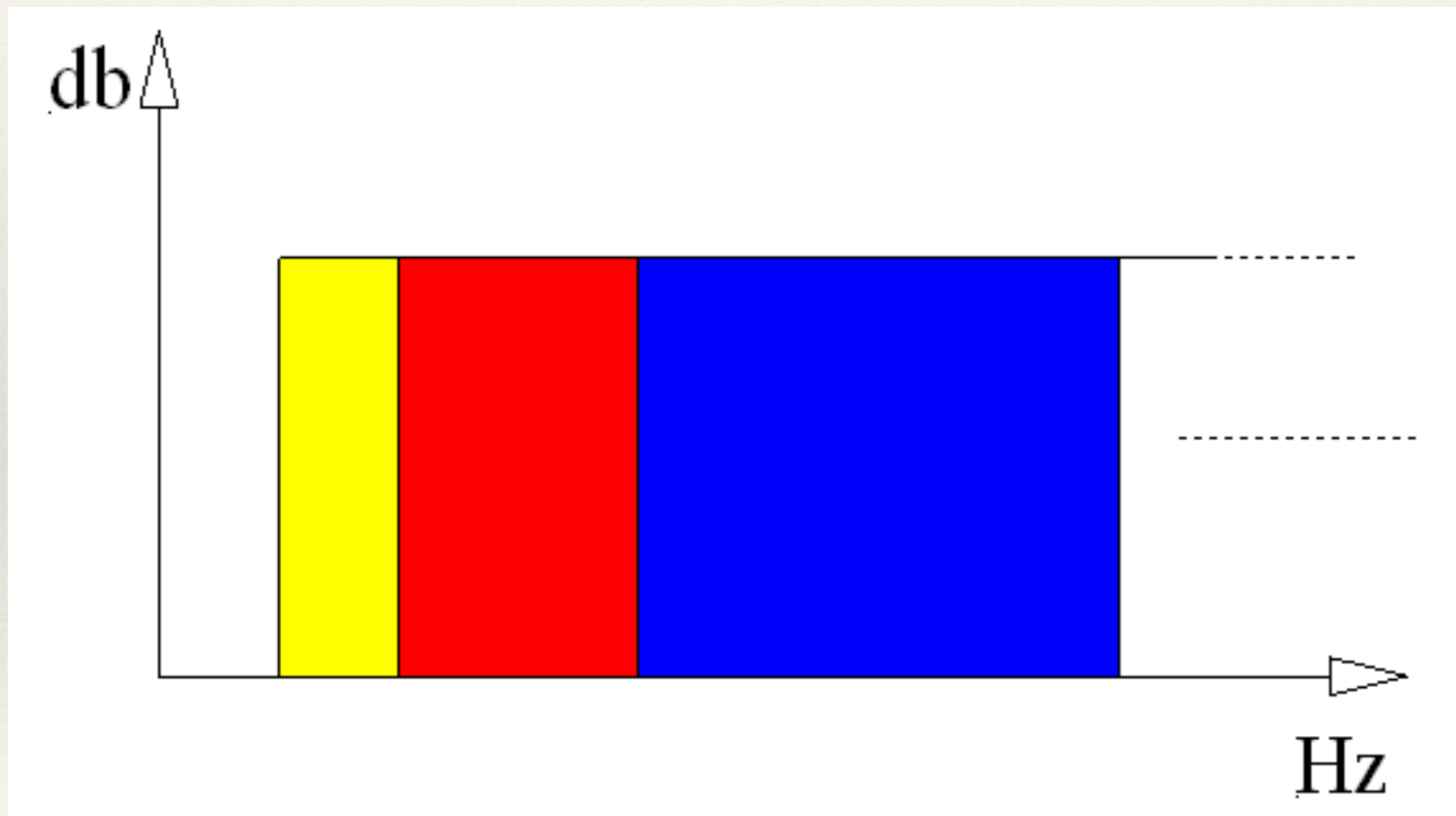
Si definisce banda ad  $1/3$  di ottava un insieme di frequenze delimitato inferiormente e superiormente da due frequenze  $f_1$  ed  $f_2$  tali che il loro rapporto  $f_1 / f_2$  sia pari a 1.26.

Ciascuna banda di ottava contiene ovviamente tre bande di terzo di ottava.

---

# Filtri a bande di terzo di ottava

---



---

# Filtri a bande di terzi di ottava

---

Secondo la normativa internazionale IEC (International Electrotechnical Commission) n° 225 i valori delle frequenze centrali delle bande di terzi di ottava si ottengono moltiplicando e dividendo per  $\sqrt[3]{2}$  la frequenza base di 1000 Hz.

L'intero spettro udibile viene ad essere coperto da trenta bande di terzi di ottava.

---

# Rapporti di frequenze

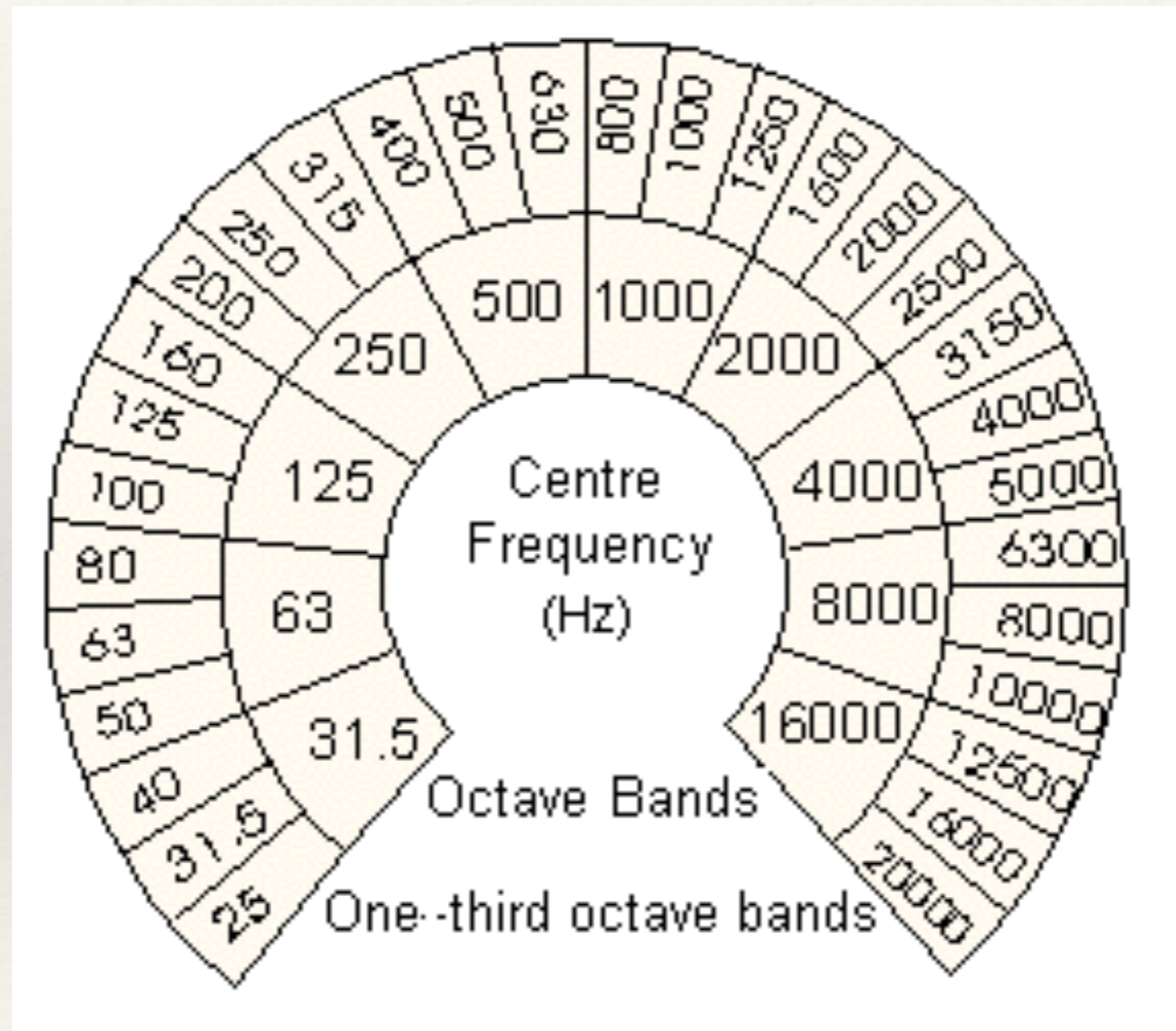
---

Si dimostra che, nelle bande di terzo di ottava, l'ampiezza della banda cresce proporzionalmente alla frequenza di centro banda  $f_c$  e che rimane costante il rapporto  $\Delta f / f_c$ : tale rapporto vale 0,236.

Le frequenze inferiori  $f_1$  e superiori  $f_2$  si calcolano mediante le relazioni:

$$f_1 = \frac{f_c}{\sqrt[6]{2}} \quad f_2 = f_c \sqrt[6]{2}$$

# Filtri a bande di ottava e di terzo di ottava





---

# Filtri a bande di ottava e di terzo di ottava

---

Il livello di un certo rumore a banda larga nella banda di ottava a 1000 Hz, sarà sempre maggiore del livello dello stesso rumore ed alla stessa frequenza nella banda ad  $1/3$  di ottava: risulta quindi chiaro che, assieme al livello di un rumore, bisogna sempre specificare la larghezza di banda per dare un senso alla misura.

---

# Analisi in frequenza

---

Lo scopo dell'analisi in frequenza è quello di definire il contenuto di un suono complesso, che contiene componenti a diverse frequenze, anche variabili istantaneamente.

Ricordando che il campo sonoro udibile umano va circa dai 20 Hz ai 20 kHz e che l'orecchio non percepisce tutte le frequenze allo stesso modo, si comprende come mai in molte applicazioni tecniche che vanno dalla registrazione e riproduzione della musica all'analisi del rumore prodotto da macchinari o ambienti, si è interessati a valutare non tanto il livello sonoro complessivo, cioè l'energia totale del suono, bensì la sua distribuzione alle varie frequenze.

---

# Analisi in frequenza

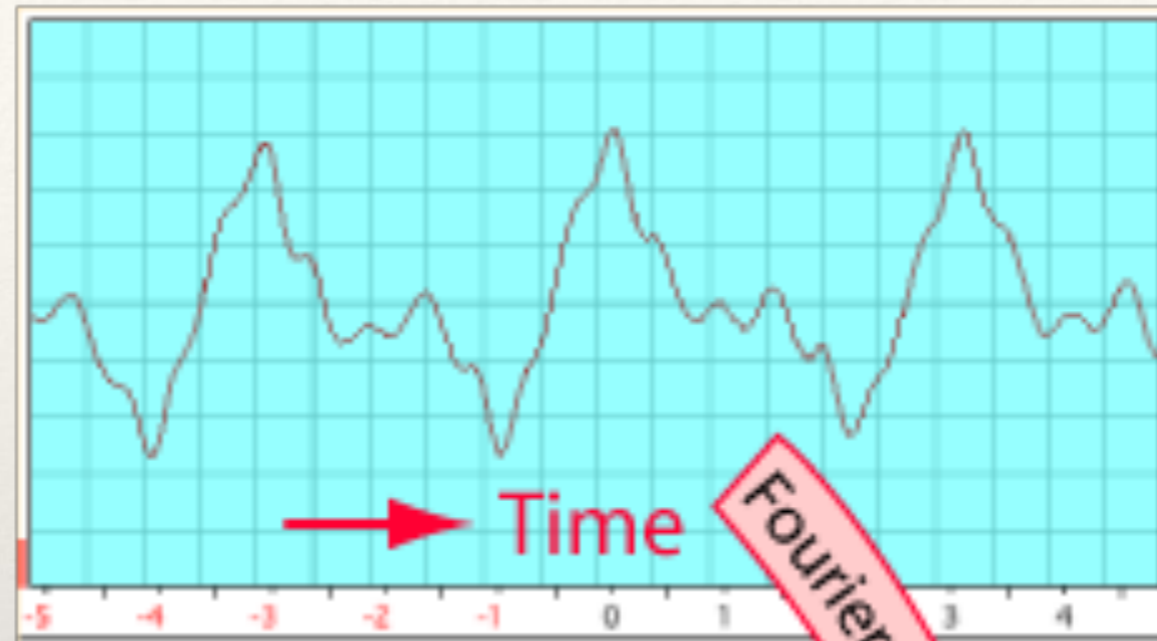
---

In natura non esistono solo toni puri, ma forme d'onda complesse: in un suono reale sono quindi sempre presenti sinusoidi discrete con opportune ampiezze, frequenze e fasi alle quali è sovrapposta una quota di rumore.

Effettuare l'analisi in frequenza significa partire da una rappresentazione del suono nel dominio del tempo, cioè dalla forma d'onda, ed arrivare a definire lo spettro: un procedimento analogo può essere svolto in ottica, dove la luce è scomposta nelle sue componenti cromatiche, ovvero onde a diversa frequenza.

# Analisi in frequenza

Harmonic content determines the waveform of the sound signal when displayed as a function of time.



Switching from a time to a frequency plot can make the harmonic content more evident.

The amplitudes of the individual harmonics can be determined by Fourier analysis and displayed as a function of frequency.



→ Frequency

---

# Il sistema uditivo dell'uomo

---

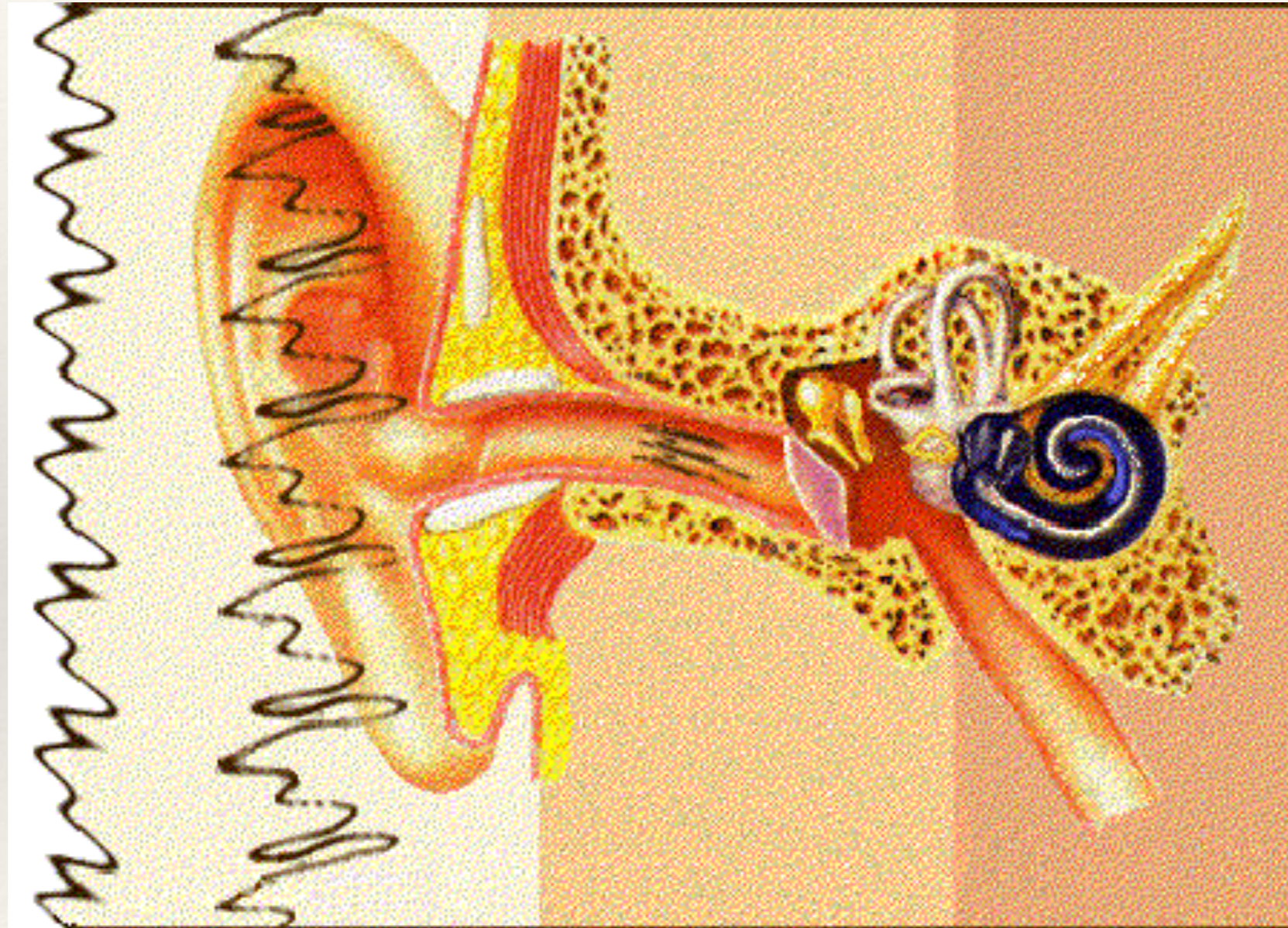
La perturbazione sonora che raggiunge il ricettore viene trasformata in sensazione tramite il complesso uditivo costituito da:

- 🎧 orecchio esterno,
- 🎧 orecchio medio,
- 🎧 orecchio interno,
- 🎧 fibre nervose deputate alla trasmissione al cervello dei segnali elettrochimici prodotti nell'orecchio interno.

---

# Il sistema uditivo dell'uomo

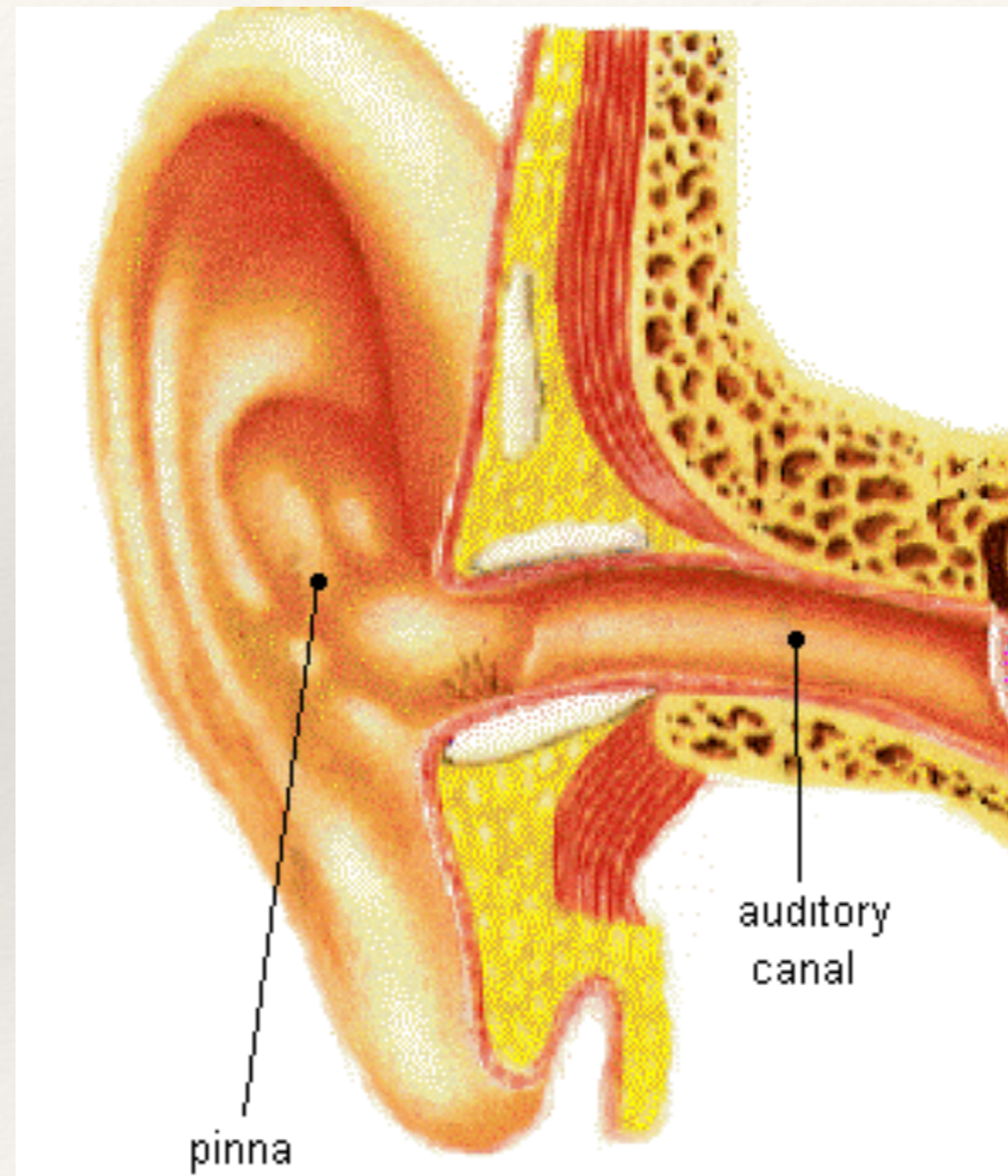
---



---

# Orecchio esterno

---



---

# Orecchio esterno

---

L'orecchio esterno comprende

- il padiglione auricolare,
- il condotto o meato uditivo.

Può essere considerato come un trasduttore meccanico con la funzione principale di convogliare l'onda di pressione verso la membrana timpanica e di proteggerla da eventuali offese.

La particolare conformazione del padiglione auricolare favorisce la captazione dell'onda e la localizzazione della sorgente sonora.



---

# Meato uditivo

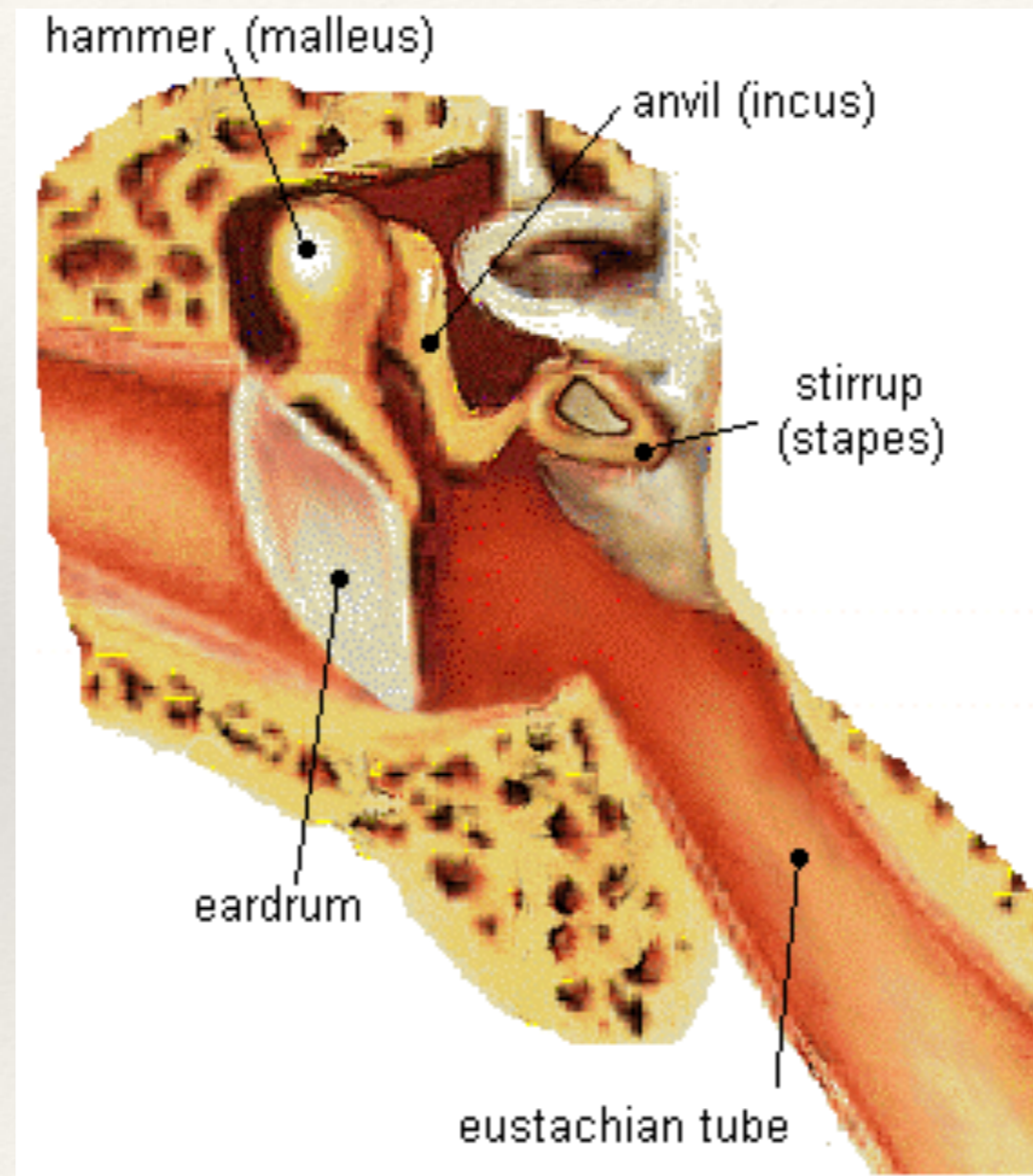
---

Il meato uditivo, grazie alle sue caratteristiche di risonanza, determina una parziale modifica del suono che lo percorre, amplificando in particolare le frequenze comprese tra i 2000 ed i 3000 Hz e rendendo di conseguenza l'orecchio maggiormente sensibile in questa regione, come testimoniato anche dalla forma delle isofoniche riportate nell'audiogramma normale.

Il condotto uditivo ha la forma di un tubo a sezione ellittica, della lunghezza di circa 2.5 cm nell'adulto e ha la funzione protettiva sia meccanica che termica nei riguardi della membrana timpanica.

Recenti studi situano la frequenza di risonanza del meato uditivo intorno ai 3400 Hz.

# Orecchio medio



---

# Orecchio medio

---

All'estremità interna del condotto uditivo inizia l'orecchio medio, comprendente:

- 🔊 timpano,
- 🔊 membrana elastica a forma di cono piatto che chiude il condotto,
- 🔊 catena degli ossicini (martello, incudine e staffa),
- 🔊 due piccoli muscoli denominati stapedio e tensor timpani.

L'orecchio medio è in comunicazione con la faringe e quindi con l'esterno dalla tromba di Eustachio, che ha l'importante compito mantenere la pressione sulla faccia della membrana del timpano uguale a quella esterna, consentendo all'aria di entrare ed uscire liberamente dal cavo del timpano.

Se tale passaggio viene inibito, come spesso succede in occasione di un raffreddore, all'interno del cavo del timpano si crea una modesta depressione, sufficiente tuttavia ad alterare in maniera sensibile le capacità vibratorie del timpano, con conseguente senso di orecchio chiuso e riduzione delle capacità uditive.

---

# Timpano

---

Dal punto di vista fisico la membrana del timpano è una struttura molto sofisticata, in quanto è in grado di comportarsi come una membrana aperiodica ovvero in grado di vibrare ugualmente bene per uno spettro molto ampio di frequenze e smorzata cioè con la capacità di smettere di vibrare non appena è cessato lo stimolo sonoro.

Le caratteristiche meccaniche della membrana del timpano possono essere in parte modificate dalla contrazione dello stapedio e del tensor timpani: il primo determina un irrigidimento della membrana del timpano, aumentandone la tensione, mentre il secondo riduce le possibilità vibratorie della catena degli ossicini.

---

# Impedenze dell'orecchio

---

Le vibrazioni del timpano, provocate dall'onda sonora che percorre il condotto uditivo, sono trasmesse ed amplificate dalla catena meccanica degli ossicini, fino a giungere alla finestra ovale, la quale rappresenta l'elemento di separazione tra l'orecchio medio e l'orecchio interno.

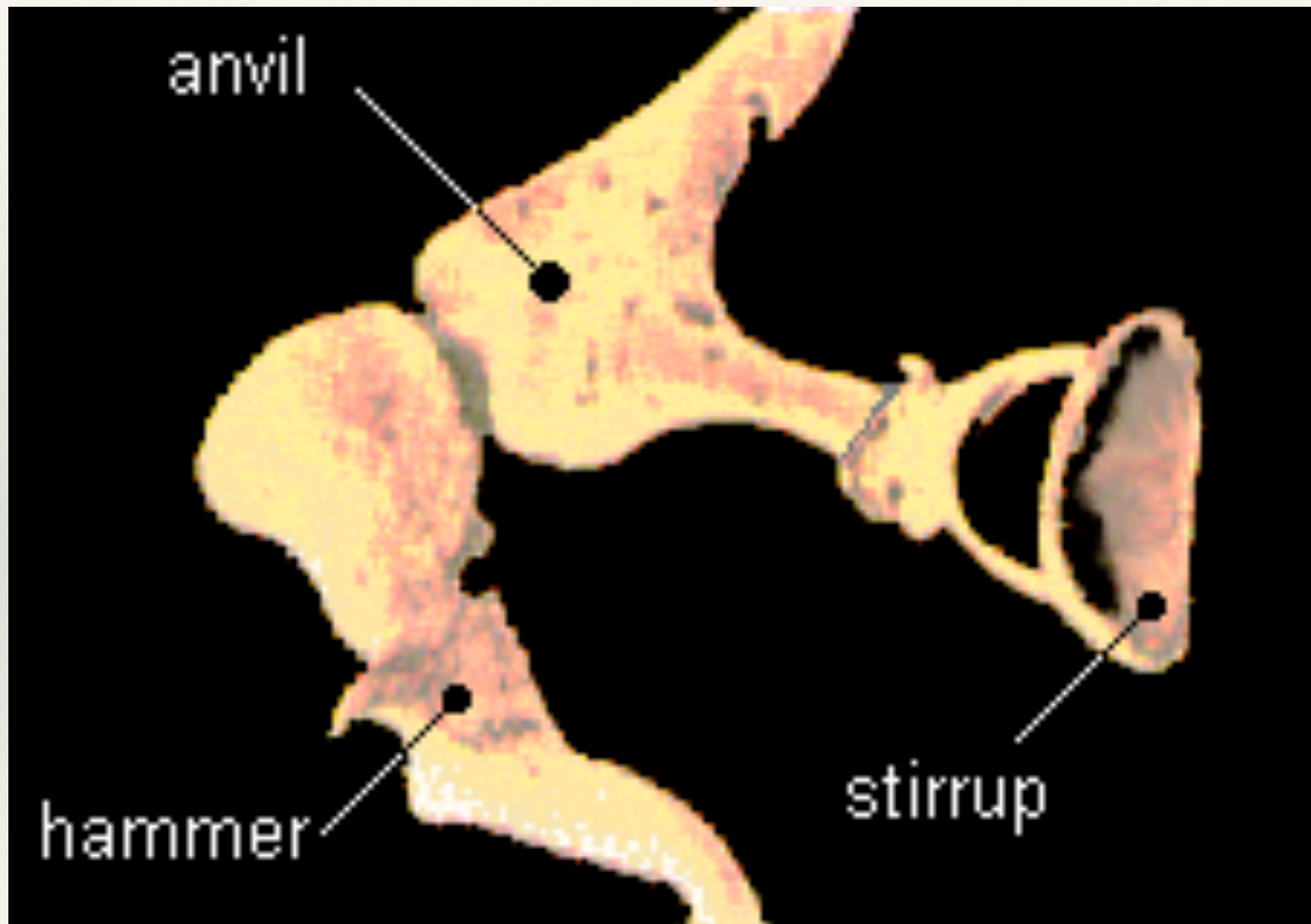
Dal punto di vista funzionale, l'orecchio medio si comporta come un adattatore di impedenza.

In termini pratici l'impedenza acustica di un sistema è la capacità di quel sistema di entrare in vibrazione e trasmettere l'impulso sonoro.

---

# Catena degli ossicini

---



---

# Impedenze dell'orecchio

---

Il trasferimento ottimale di energia da un mezzo ad un altro si ottiene soltanto quando le loro impedenze sono simili o quando tra i due esiste un adattatore di impedenza, come appunto l'orecchio medio, che ha la funzione di trasmettere le vibrazioni sonore dall'aria ai liquidi presenti all'interno dell'orecchio interno senza che durante detta trasmissione venga persa energia.

Il sistema uditivo è in grado di modificare l'impedenza dell'orecchio medio soprattutto attraverso la contrazione del muscolo stapedio, che determina un irrigidimento della catena degli ossicini.

Tale contrazione detta riflesso stapediale, viene attivata da uno stimolo sonoro piuttosto intenso, indicativamente attorno agli 85 dB, ed è crociata, nel senso che uno stimolo inviato ad uno dei due orecchi attiva il riflesso in ambedue gli orecchi.

---

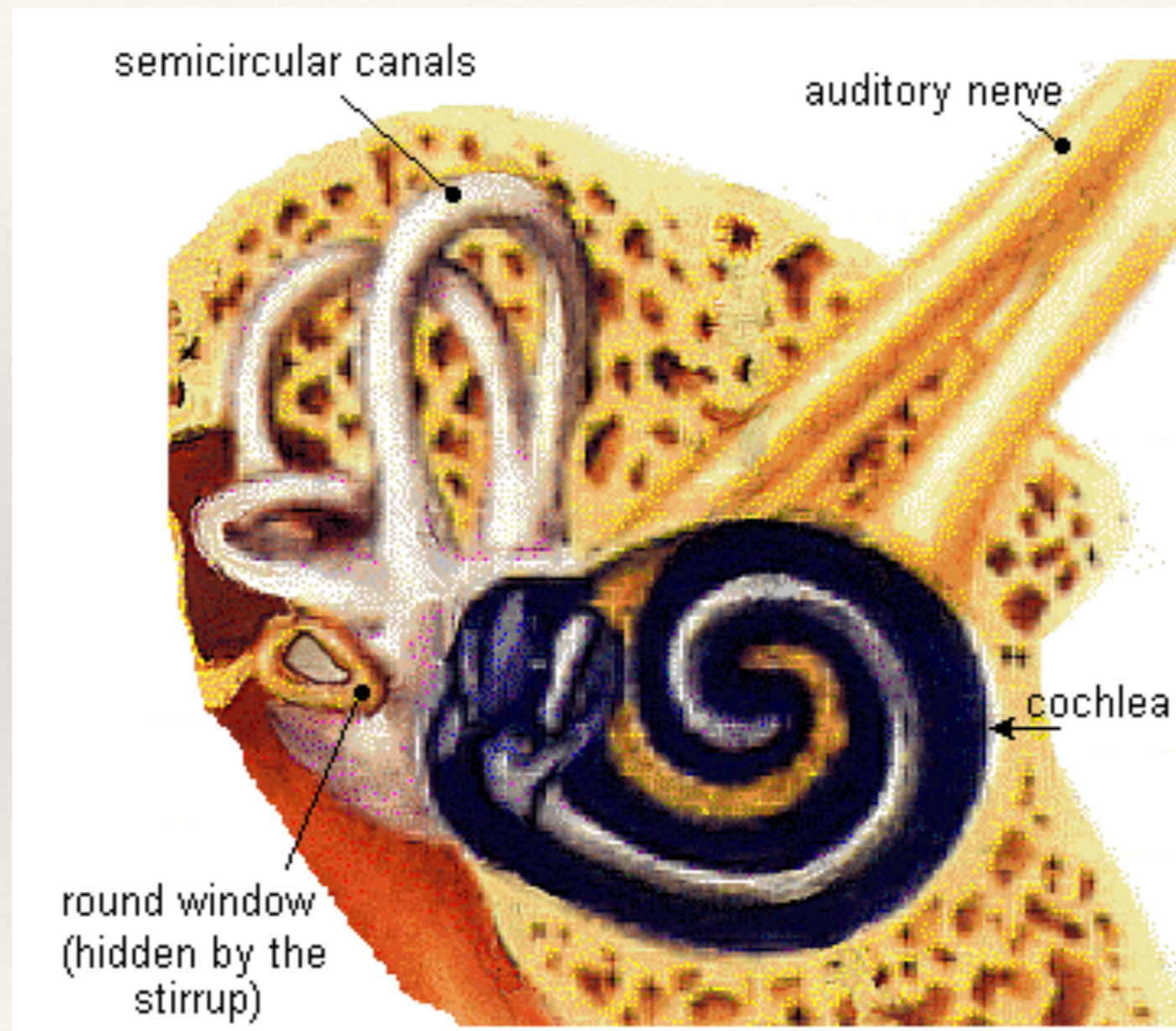
# Riflesso stapediale

---

Contrariamente a quanto sostenuto da molti, il riflesso stapediale ha solo in parte una funzione di protezione delle strutture nervose contenute nell'orecchio, in quanto la riduzione della trasmissione dei suoni vale solo per frequenze inferiori a 1 kHz e perché il riflesso non è istantaneo, ma richiede un certo tempo per essere attivato (circa 10 ms), mentre il suono raggiunge l'orecchio interno già dopo 5 - 6 ms. La sua funzione principale è invece quella di modificare le capacità vibratorie dell'orecchio medio, affinché vengano percepiti in maniera ottimale i suoni di frequenza medio-bassa, migliorando così la possibilità di percepire il parlato.



# Orecchio interno



---

# Orecchio interno

---

L'orecchio interno può essere considerato la parte essenziale dell'apparato uditivo in quanto in esso avvengono i più importanti processi di trasformazione del fenomeno fisico oggettivo, ovvero dell'onda sonora, in percezione sensoriale soggettiva elaborata dal cervello.

La struttura dell'orecchio interno è costituita principalmente dalla coclea e collegata al cervello mediante il nervo acustico e dai canali semicircolari preposti al senso dell'equilibrio.

---

# Coclea

---

La coclea, che deriva il suo nome dalla forma simile a quella di un guscio di lumaca, può essere schematizzata come un tubo attorcigliato su se stesso, lungo circa 35 mm, in cui si riconoscono 3 giri e  $\frac{3}{4}$ .

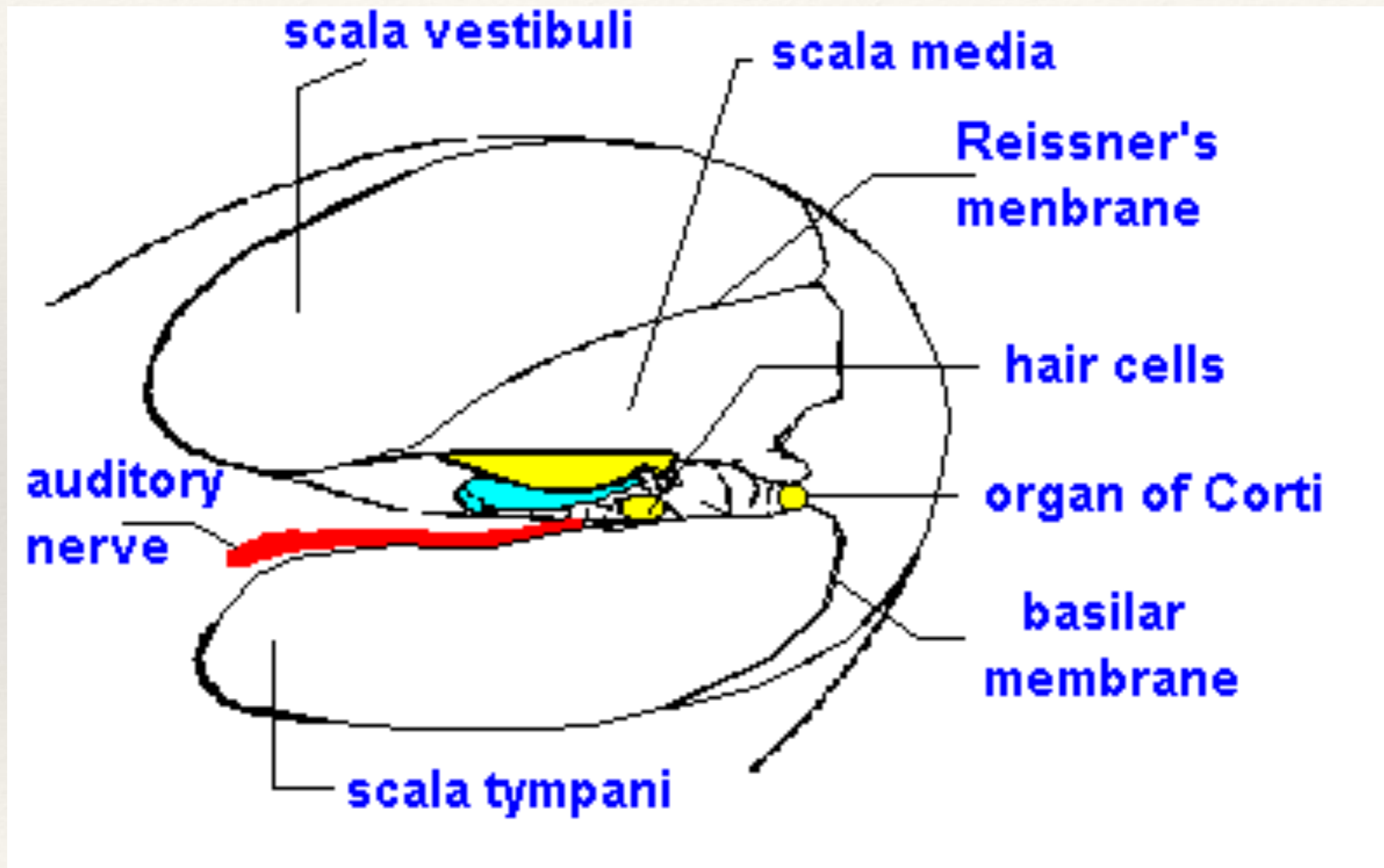
La coclea è suddivisa in tre parti da sottili lamine in parte membranose.

I due canali più esterni sono detti scala vestibolare, comunicante mediante la finestra ovale con l'orecchio medio e la scala timpanica comunicante tramite la finestra rotonda con l'orecchio medio.

Questi due canali riempiti di un liquido detto perilinfa comunicano tra di loro alle estremità opposte alla finestra ovale e rotonda mediante una piccola apertura detta elicotrema.

Il terzo canale detto scala cocleare o scala media perché collocato tra i due precedenti è costituito dalla membrana basilare, dalla membrana vestibolare o di Reissner e da una parete esterna ossea ed è anch'esso riempito da un liquido detto endolinfa.

# Coclea



# Coclea



---

# Organo del Corti

---

Nel canale cocleare si trova l'organo del Corti, posizionato lungo tutta la membrana basilare e costituito da cellule di sostegno e da cellule sensoriali, dotate ad una estremità di formazioni filamentose rigide dette stereociglia, da cui il nome di cellule ciliate.

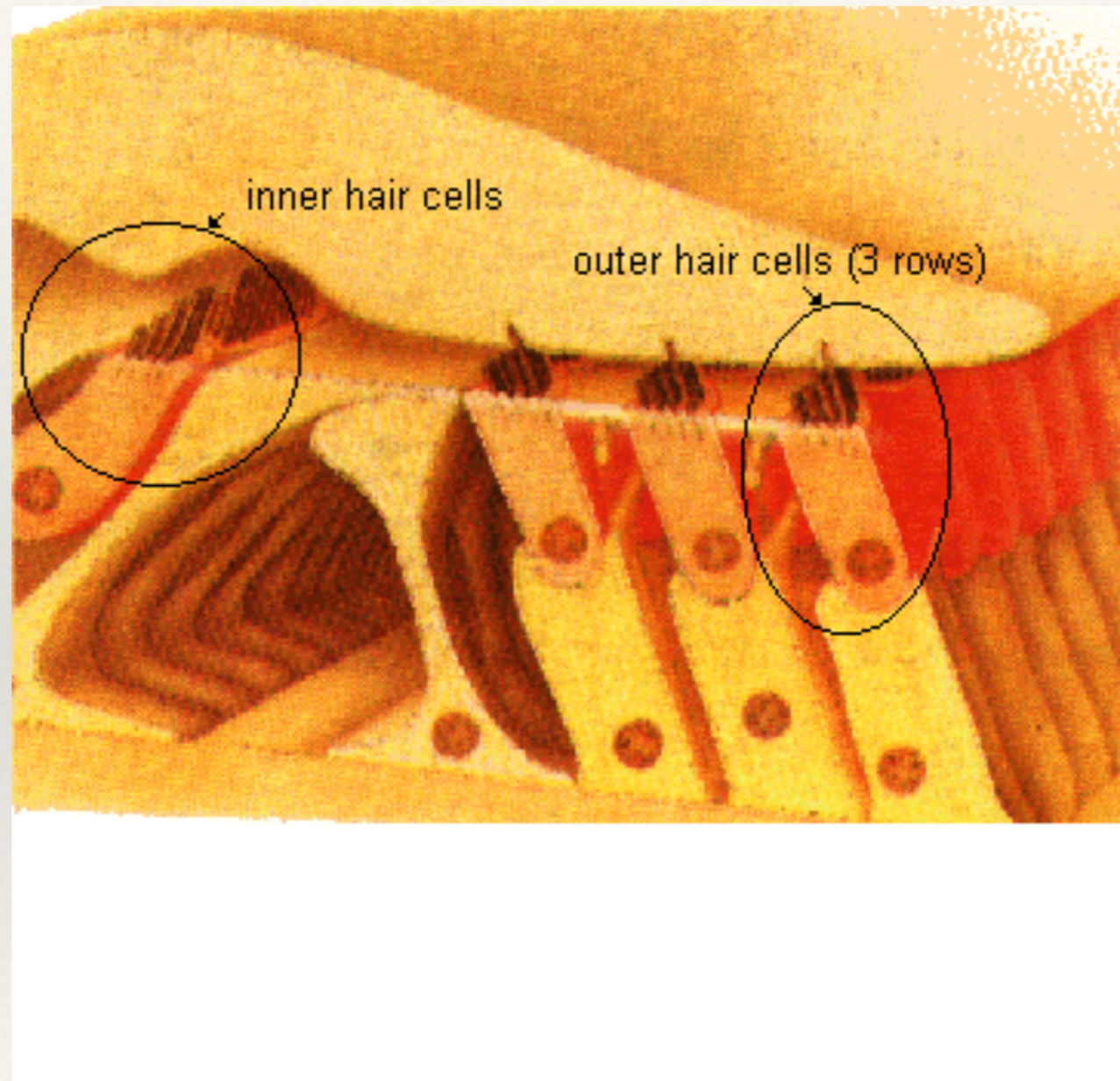
Tali cellule sono in numero di 24000 e sono disposte in quattro file, tre esterne ed una interna rispetto ad una piccola cavità a sezione triangolare detta galleria di Corti.

Sovrapposta all'organo di Corti si trova la membrana tectoria, nella cui superficie inferiore sono incluse la totalità delle stereociglia delle cellule ciliate esterne ed una parte di quelle interne.

---

# Organo del Corti

---



---

# Meccanismo uditivo

---

Il meccanismo uditivo può essere semplificato nel seguente modo: le vibrazioni indotte sul sistema meccanico dell'orecchio medio dalla perturbazione di pressione caratterizzante un certo fenomeno sonoro, determinano una pressione sulla finestra ovale con conseguente flusso di perilinfa che interessa la rampa vestibolare e quella timpanica collegate tramite l'elicotrema. Tale flusso, grazie alla reazione elastica della membrana che chiude la finestra rotonda, assume andamento oscillatorio. La frequenza di questo meccanismo oscillatorio determina il numero di impulsi sulle cellule ciliate poste sulla membrana basilare.



---

# Meccanismo uditivo

---

Poiché la membrana basilare presenta spessore e quindi massa crescente dall'estremità in prossimità delle finestre fino all'estremità in prossimità dell'elicotrema, la frequenza del moto oscillatorio della perilinfa produce diversi spostamenti su punti diversamente posizionati sulla membrana con conseguente eccitazione di gruppi diversi di cellule ciliate.

In particolare le alte frequenze andranno ad eccitare le cellule più vicine alle finestre e le basse quelle prossime all'elicotrema.

Attraverso un procedimento di ricomposizione delle frequenze, il cervello elaborerà la sensazione del timbro.

L'intensità del suono verrà invece determinata dal numero di ciglia in movimento

---

# Il ricettore

---

Nello studio degli effetti del rumore sull'udito umano, è necessario conoscere almeno le principali caratteristiche della sensazione uditiva.

Il primo passo da compiere si riferisce al caso più semplice, cioè la descrizione della percezione dei toni puri.

---

# Intensità soggettiva

---

I toni puri sono caratterizzati dall'orecchio umano mediante due parametri: l'altezza e l'intensità che verrà d'ora in poi denominata intensità soggettiva.

---

# Audiogramma normale

---

Il comportamento dell'udito umano nei confronti dei toni puri, con riferimento all'intensità soggettiva, è raggruppato in un diagramma denominato audiogramma normale: in tale grafico sono rappresentati i risultati statistici di osservazioni sperimentali compiute su un gran numero di individui sani, aventi cioè un udito normale esente da difetti di origine patologica o traumatica, volte a determinare la sensibilità dell'udito ai suoni puri aventi differenti valori di frequenza e di pressione acustica

Il procedimento utilizzato per costruire l'audiogramma normale consiste di vari passi.

---

# Soglia di percezione

---

Come prima operazione si genera un tono puro avente la frequenza di 1000 Hz e ne si fa variare lentamente con continuità la pressione acustica: il valore minimo di tale pressione acustica capace di generare una sensazione uditiva in un dato soggetto viene definito soglia di percezione per quel soggetto a quella data frequenza.

Ripetendo la stessa esperienza su un gran numero di ascoltatori aventi udito normale e mediando i risultati ottenuti, si perviene alla determinazione della soglia normale di udibilità per quella frequenza.

Ripetendo l'operazione per una gamma abbastanza ampia di frequenze e rappresentando i risultati in un diagramma avente in ascisse le frequenze e in ordinate il livello di pressione sonora (rif.  $20 \mu\text{Pa}$ ), si ottiene una curva detta curva di soglia, che rappresenta il limite inferiore dell'audiogramma normale.

---

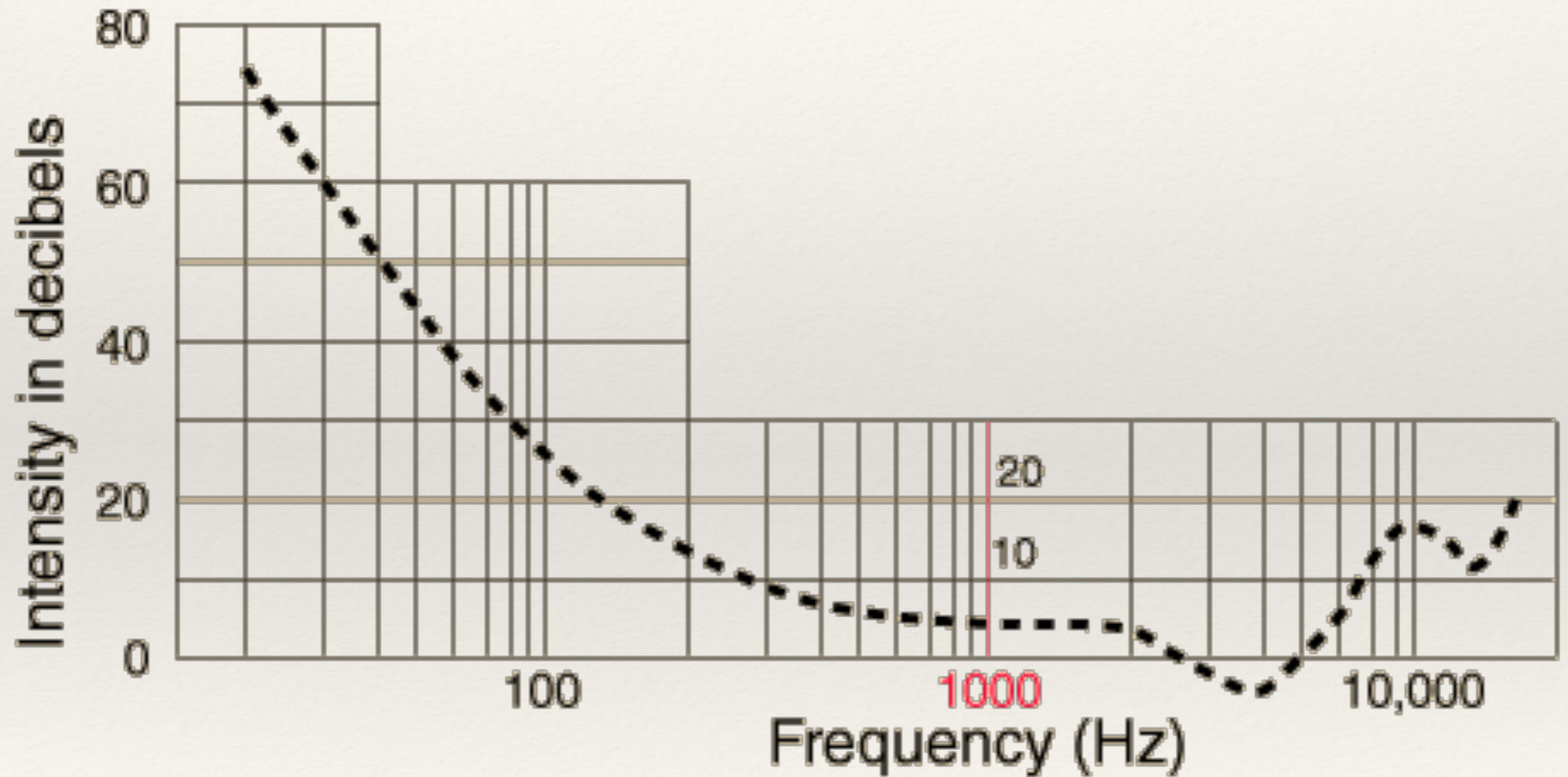
# Soglia di percezione

---

Si può notare come il valore di soglia varia con la frequenza e, in particolare, è superiore alle alte e alle basse frequenze: ciò significa che l'orecchio umano è meno sensibile alle alte e alle basse frequenze e cioè sono necessari livelli di pressione sonora più elevati per percepire un tono puro di alta o bassa frequenza.

Si noti come intorno al valore di 1000 Hz, la soglia normale di udibilità corrisponde al valore di riferimento della pressione acustica di  $20 \mu\text{Pa}$ : è questo il motivo per cui tale valore è stato scelto come riferimento per il livello zero di pressione acustica.

# Soglia di percezione



---

# Curve isofoniche

---

Fissati i limiti di sensibilità dell'orecchio umano alle varie frequenze, occorre stabilire un mezzo atto a paragonare le intensità oggettive in tutto il campo di udibilità e, in particolare, a stabilire quando due suoni sono considerati equivalenti o quando uno genera una sensazione più intensa di un altro. Si procede come segue: fissato come riferimento il consueto tono puro di 1000 Hz, si procede ad una serie di confronti tra detto suono campione e una serie di toni puri distribuiti su tutta la gamma acustica mantenendo fisso il livello di pressione sonora del tono di riferimento e variando quello degli altri toni puri fino a trovare la condizione di pari intensità soggettiva.



---

# Curve isofoniche

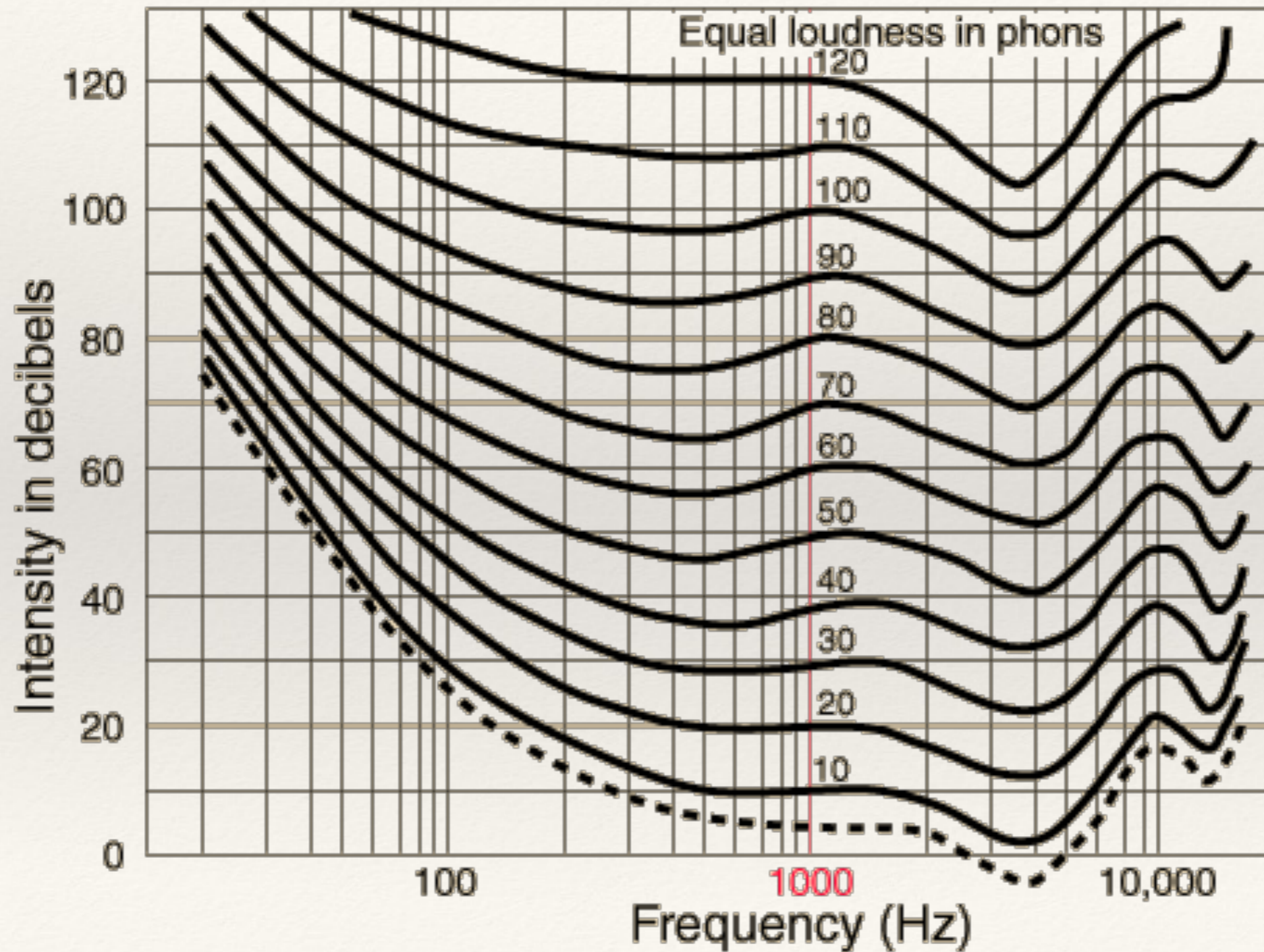
---

Si traccia una curva che raggruppa tutti i punti dell'audiogramma aventi la stessa intensità soggettiva, curva che viene denominata isofonica.

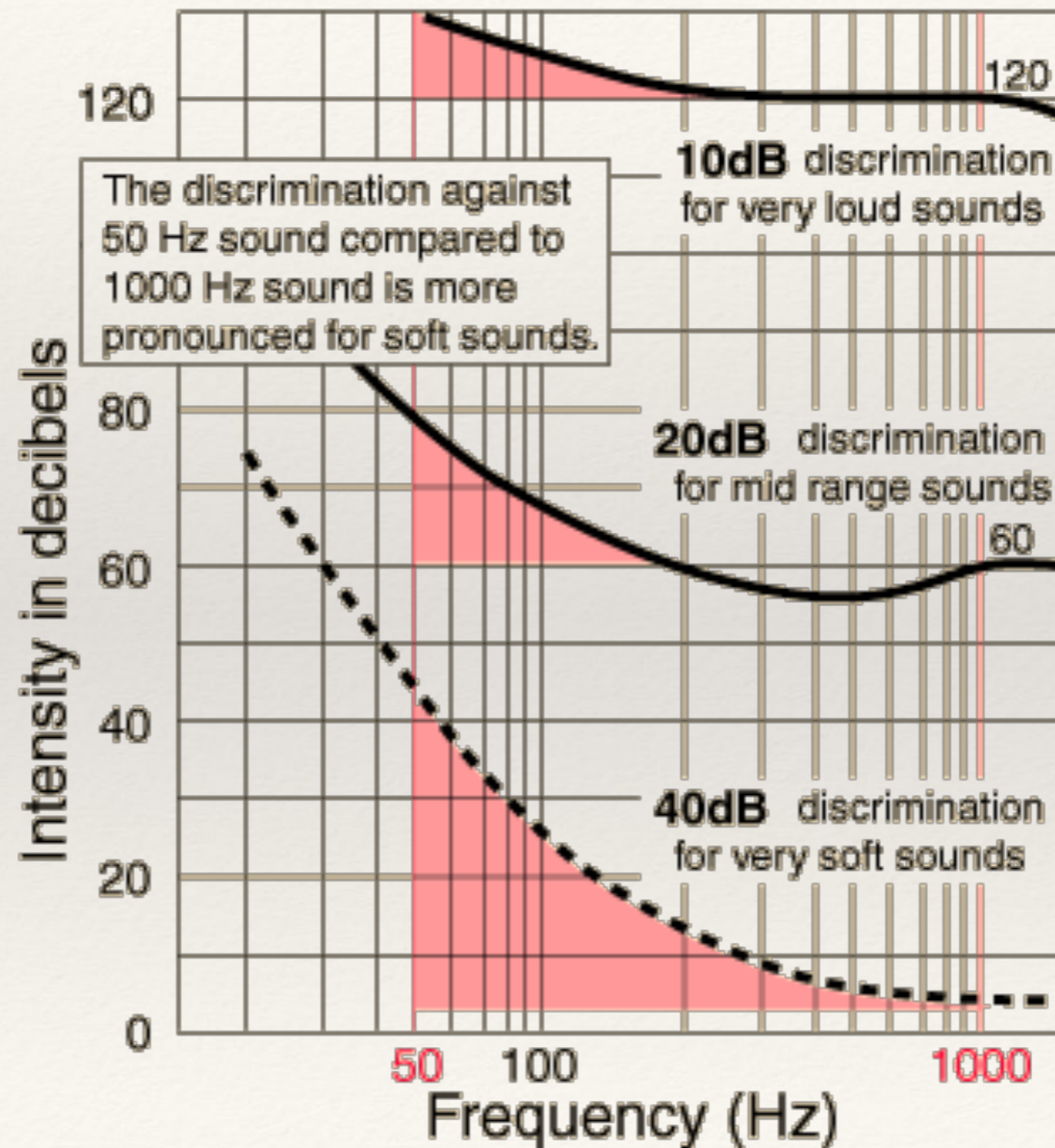
Ripetendo tale procedimento per diversi valori del livello di pressione del tono puro di riferimento si tracciano una serie di curve isofoniche, il cui insieme costituisce l'audiogramma cercato.

Dal diagramma riportato, si deduce che passando da una isofonica a quella situata superiormente nell'audiogramma, l'intensità soggettiva cresce: d'altro canto, dato il modo con cui sono state ottenute, l'intensità soggettiva è la stessa per tutti i punti situati sulla stessa isofonica.

# Audiogramma normale



# Curve isofoniche



---

# Soglie del disturbo, del dolore, del danno uditivo

---

Se, tenendo fissa la frequenza, si aumenta il valore della pressione acustica sopra quello di soglia, si osserva un graduale aumento dell'intensità soggettiva.

Se tale incremento viene spinto fino a valori sufficientemente elevati di pressione acustica, la sensazione diviene dapprima fastidiosa, poi addirittura dolorosa e, per valori della pressione acustica ancor più grandi, si perviene ad un danno uditivo.

---

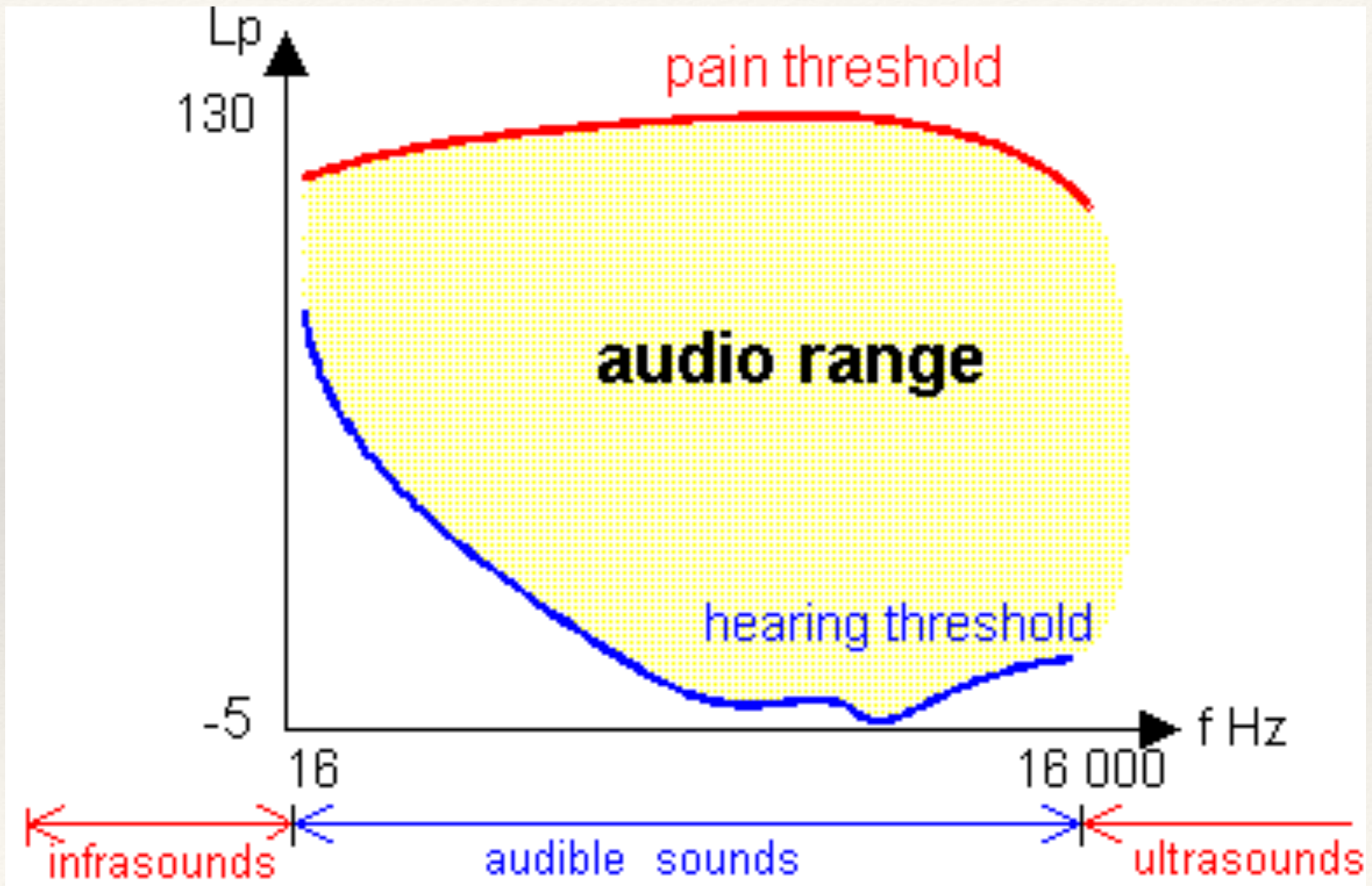
# Soglie del disturbo, del dolore, del danno uditivo

---

I valori di pressione acustica corrispondenti all'insorgenza dei tre fenomeni precedentemente descritti identificano quelle che vengono definite soglia del disturbo, soglia del dolore e soglia del danno uditivo, quest'ultima non determinabile sperimentalmente per ovvii motivi...

Si comprende quindi che l'audiogramma normale è delimitato non solo inferiormente dalla soglia normale di udibilità, ma anche superiormente dalla soglia del dolore, sebbene il limite superiore non sia definibile con estrema precisione.

# Soglie del disturbo, del dolore, del danno uditivo



---

# Danni uditivi

---

L'esposizione prolungata a rumore di elevata intensità può produrre una diminuzione delle capacità uditive a causa delle lesioni distruttive subite dalle cellule ciliate dell'organo del Corti.

Inizialmente le cellule lese sono quelle preposte alla percezione dei segnali attorno ai 4000 - 6000 Hz.

Successivamente il deficit uditivo attorno a queste frequenze si aggrava e si estende gradatamente alle frequenze inferiori (2000 e poi 100 e 500 Hz).

Va osservato che la diminuzione delle capacità uditive nell'intervallo tra i 500 ed i 2000 Hz, caratteristico della voce umana, comporta difficoltà di comprensione delle comunicazioni verbali, inclusa la normale conversazione.

Le lesioni uditive sono irreversibili e, nella maggior parte dei casi, si stabilizzano una volta terminata l'esposizione al rumore.

---

# Innalzamento della soglia uditiva

---

L'esposizione di un soggetto normoudente ad un rumore di una certa intensità provoca l'innalzamento della soglia uditiva del soggetto in esame.

Il fenomeno viene calcolato come la differenza in dB tra la soglia uditiva in condizioni di riposo acustico e quella dopo la stimolazione sonora.



---

# TTS

---

Essendo tale innalzamento transitorio si parla di spostamento temporaneo della soglia uditiva o Temporary Threshold Shift (TTS).

Si distinguono 4 tipi di TTS:

- TTS brevissimo
- TTS breve
- TTS<sub>2</sub> o fatica uditiva fisiologica
- TTS<sub>16</sub> o TTS prolungata o fatica uditiva patologica

---

# TTS brevissimo

---

dura circa 0.5 s dal termine della stimolazione,  
è detto anche mascheramento residuo ed è dovuto al fatto  
che alcuni neuroni delle vie uditive permangono in  
periodo di refrattarietà,  
la sua entità non dipende né dall'intensità, né dalla durata,  
né dal tipo dello stimolo acustico che lo ha prodotto.

---

# TTS breve

---

dura 1 o 2 minuti,

è provocato da toni puri di bassa intensità (30-80dB),

è massimo per la frequenza analoga a quella del tono stimolante,

non dipende né dalla durata né dall'intensità dello stimolo,

non compare per toni puri inferiori a 500 Hz.

---

# TTS2

---

si misura a 2 minuti dalla fine della esposizione al rumore;

dura 16 ore;

l'entità, a parità di stimolazione acustica, varia da un soggetto ad un altro a causa della diversa suscettibilità individuale al rumore;

l'entità della TTS2 è correlata linearmente con l'intensità del suono e con il logaritmo del tempo di esposizione;

a parità di intensità e di durata i toni a frequenza più elevata producono una più marcata TTS2;

la TTS2 raggiunge il massimo valore dopo 2 ore di esposizione al rumore, quindi si mantiene costante;

il ritorno alle condizioni di udito normale (recupero) ha un andamento proporzionale al logaritmo del tempo per cui la maggior parte della TTS2 si recupera nelle prime 2 o 3 ore;

il tempo necessario per un recupero completo dipende dall'entità della TTS2.

---

# TTS16

---

permane anche 16 ore dopo la cessazione della  
stimolazione sonora;

il suo recupero ha un andamento lineare rispetto al tempo.

---

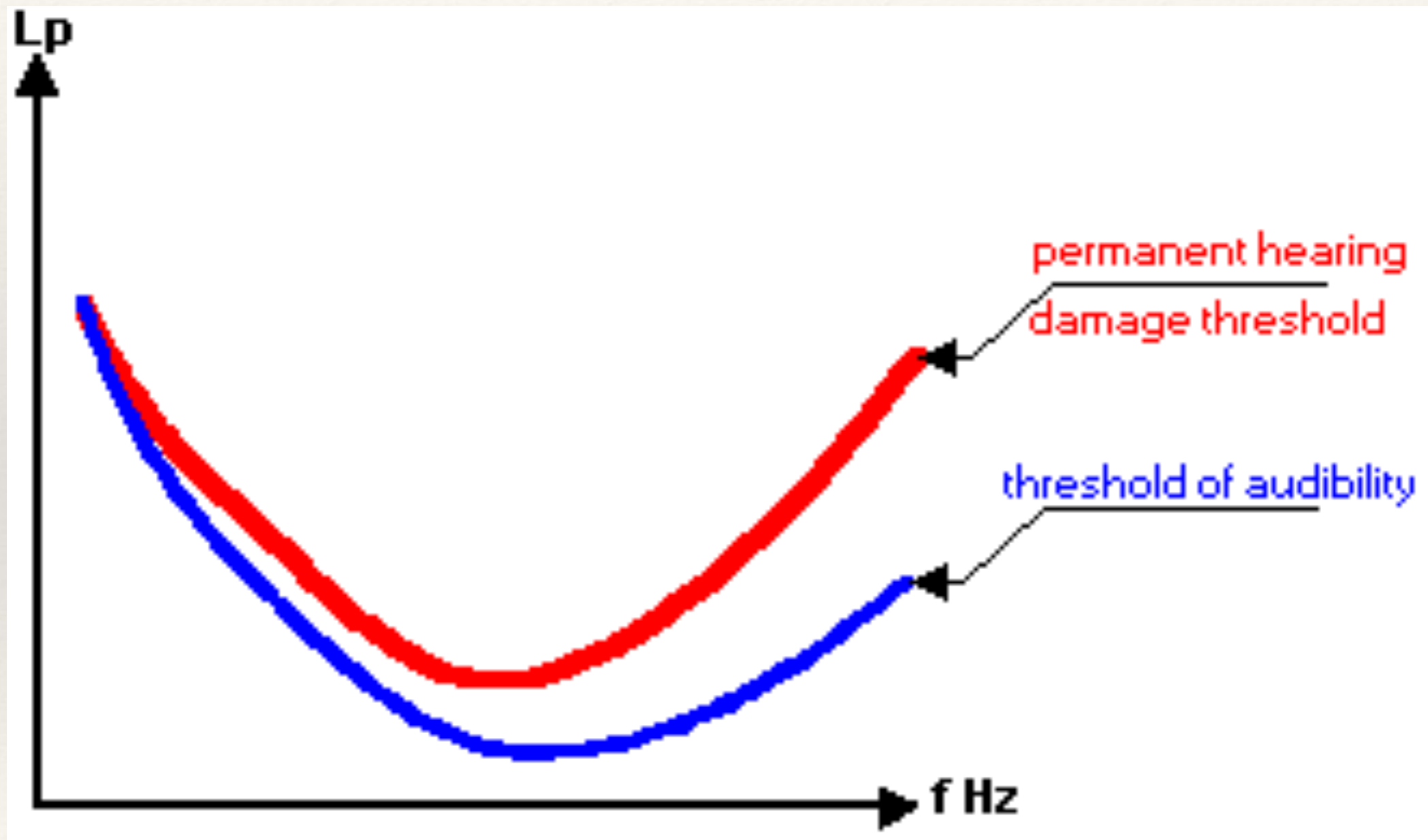
# PTS

---

La TTS breve la TTS2 e la TTS16 sono verosimilmente tutti l'espressione più o meno marcata di uno stato di esaurimento funzionale che si instaura a livello dei recettori acustici periferici a causa di un apporto energetico insufficiente rispetto all'entità della stimolazione.

Se l'esaurimento funzionale si mantiene entro certi limiti, alla cessazione dello stimolo è possibile un completo recupero e un ritorno alle condizioni di base, se però tale esaurimento è eccessivo, per cui il tempo necessario al recupero diventa molto lungo e l'esposizione al rumore si ripete giornalmente, non vi è più la possibilità di un recupero completo, per cui lentamente la TTS si trasforma in un danno irreversibile, in uno spostamento permanente della soglia uditiva o Permanent Threshold Shift, ovvero in una ipoacusia da rumore.

# PTS



---

# Tempi di recupero

---

Allo stato attuale è possibile affermare che se tra una esposizione al rumore e la seguente non vi è un tempo sufficiente per un completo recupero delle capacità uditive, è certo che a lungo andare si instaurerà un danno uditivo irreversibile.

Tenuto conto che in generale l'esposizione al rumore per motivi di lavoro dura mediamente 8 ore e che a queste seguono 16 ore di riposo, è stato stabilito che se al termine di tale periodo permane una TTS, questa deve essere considerata patologica, in quanto costituisce un presupposto per l'instaurarsi di un danno permanente.



---

# Tempi di recupero

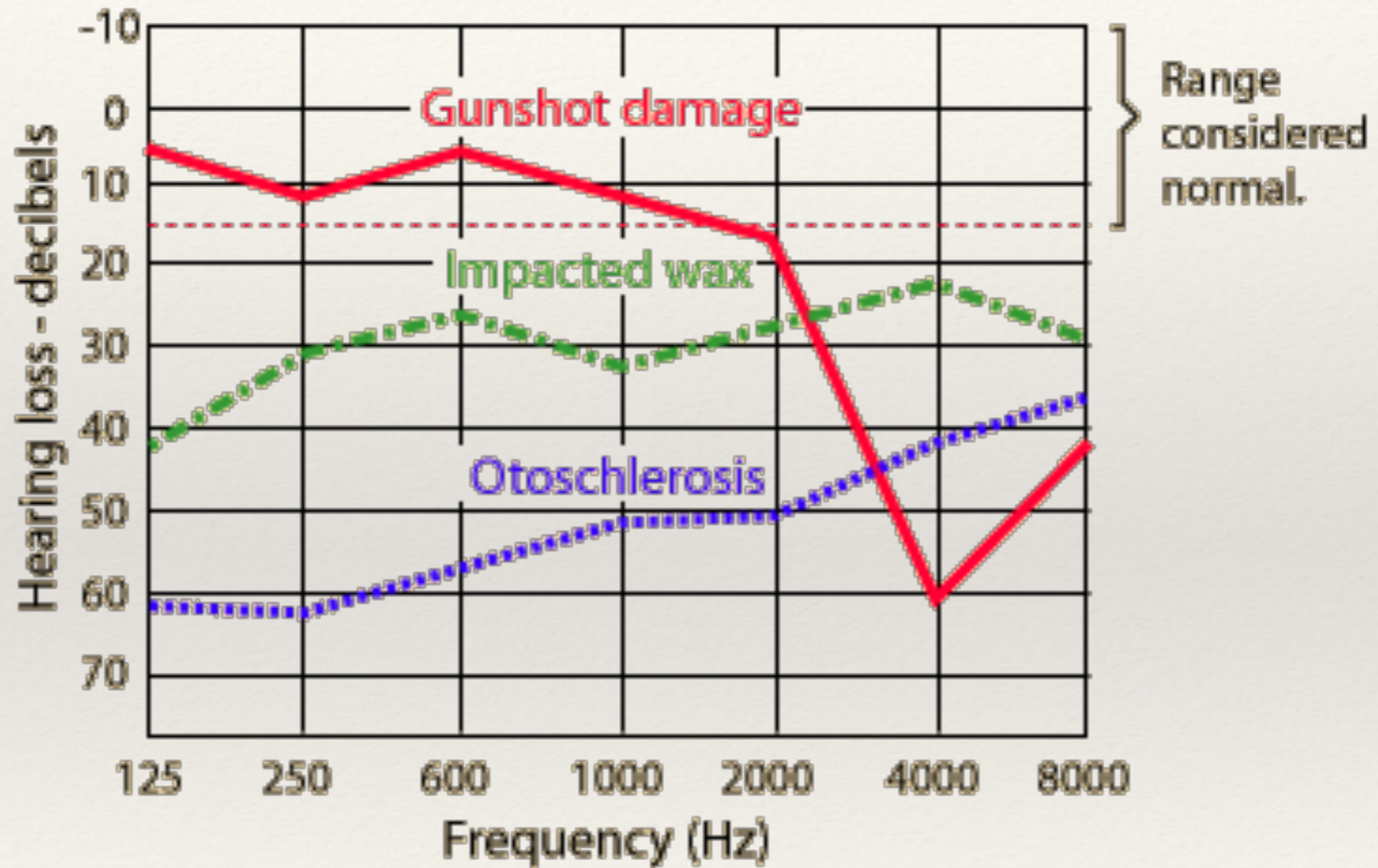
---

Un rumore di 70 dB(A) può essere considerato non dannoso in quanto non provoca alcuna TTS2.

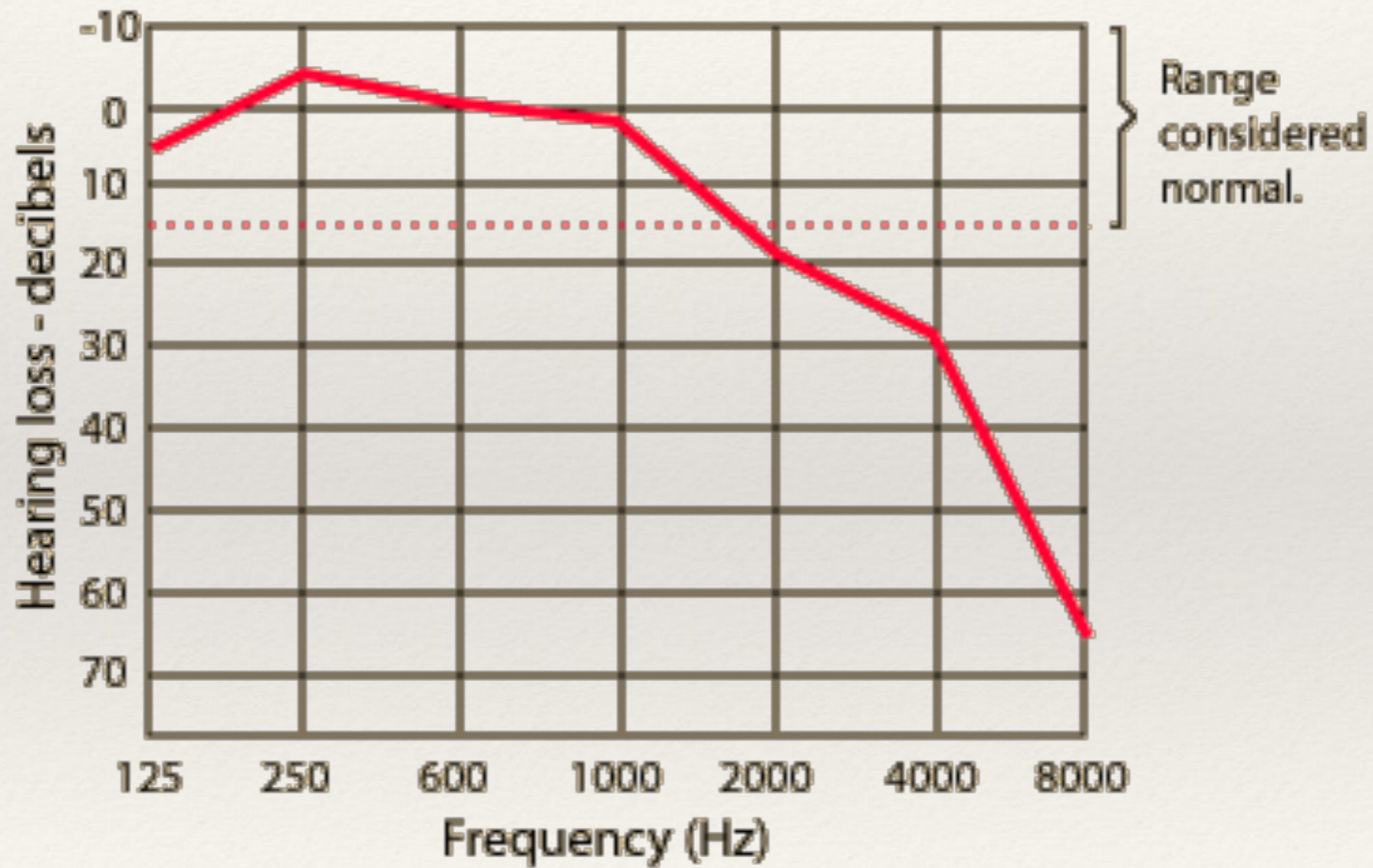
Una TTS2 misurata dopo un turno lavorativo di 8 ore durante le quali il lavoratore è stato esposto ad un rumore costante, se non supera i 25 dB dovrebbe scomparire in 16 ore senza provocare quindi una conseguente PTS.

Una TTS2 di 20 dB misurata alla fine di un turno lavorativo di 8 ore costituisce la sicurezza per tutti, mentre una TTS2 di 30 dB costituisce una sicurezza per la maggior parte dei soggetti.

# Spostamento della soglia



# Presbiacusia



---

# Danni extrauditivi

---

Le conseguenze del rumore non si limitano al campo uditivo: il rumore può infatti produrre effetti denominati extrauditivi su:

sistema cardiocircolatorio (vasocostrizione periferica);

funzione respiratoria (rallentamento della frequenza e aumento della profondità del respiro);

sistema gastro enterico (variazioni della motilità e della secrezione);

funzione visiva (riduzione dell'acuità);

sistema endocrino (effetti sull'asse diencefalo-ipofisario).

---

# Danni extrauditivi

---

Il rumore può inoltre produrre effetti di tipo neuropsichico (alterazioni elettroencefalografiche, disturbi della concentrazione, riduzione del rendimento) già a partire da livelli di pressione sonora di 40 dB.

Si può osservare che nella maggior parte dei soggetti gli effetti extrauditivi si manifestano a partire da livelli di pressione sonora di circa 70 dB(A): tale valore può risultare più basso qualora i soggetti svolgano un'attività che richiede concentrazione mentale.

Disturbi della percezione del parlato si riscontrano nel caso la voce debba superare di 12 dB il rumore circostante.

---

# Relazioni tra ambiente e pressione sonora

---

La potenza di una sorgente sonora dipende solo dalle caratteristiche della sorgente stessa e non dal tipo di ambiente in cui la sorgente è inserita.

Si pensi ad esempio alla stessa sorgente inserita in ambienti differenti: la potenza emessa sarà sempre la medesima, mentre i valori di pressione sonora misurati nelle diverse situazioni dipenderanno dalle caratteristiche di assorbimento delle pareti, dalla geometria dell'ambiente, dalla presenza di scabrosità nelle superfici, etc.

Le caratteristiche dell'ambiente vanno quindi a modificare solamente il valore della pressione sonora: ovviamente detto valore dipenderà anche dalla distanza del ricevitore dalla sorgente.

---

# Tipi di sorgente

---

Si possono distinguere vari tipi di sorgente, le principali sono:

Sorgenti puntiformi

Sorgenti lineari

---

# Sorgenti puntiformi

---

Sono sorgenti assimilabili ad una sfera pulsante che emette onde sonore in tutte le direzioni.

Il fronte d'onda generato è di tipo sferico se la sorgente è libera nello spazio o emisferico se la sorgente è appoggiata su un piano riflettente.

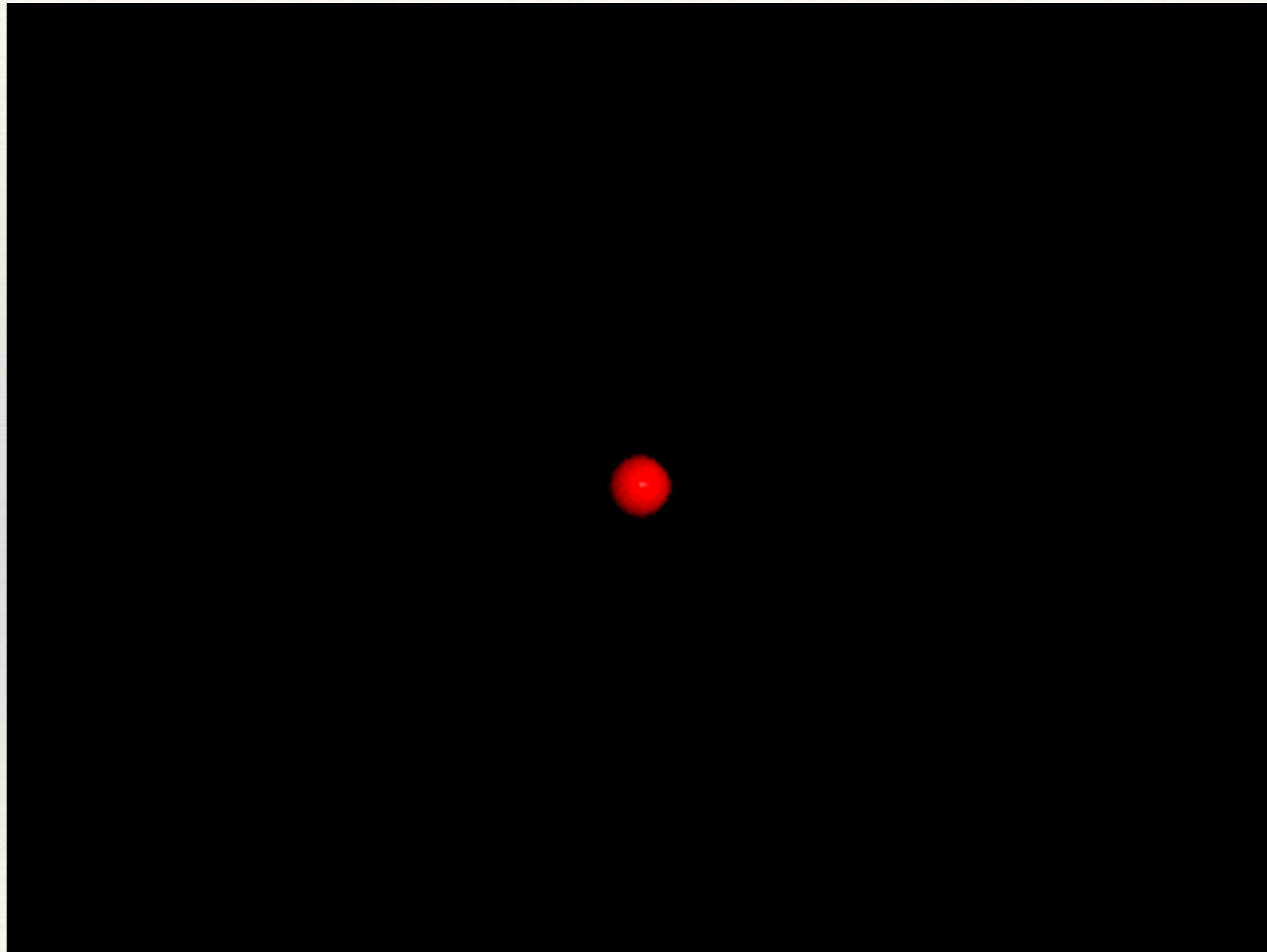
Possono essere considerate puntiformi tutte le sorgenti poste ad una distanza molto maggiore della lunghezza d'onda considerata.



---

# Sorgenti puntiformi

---



---

# Sorgenti lineari

---

Sono sorgenti assimilabili ad un cilindro pulsante che emette onde sonore in tutte le direzioni.

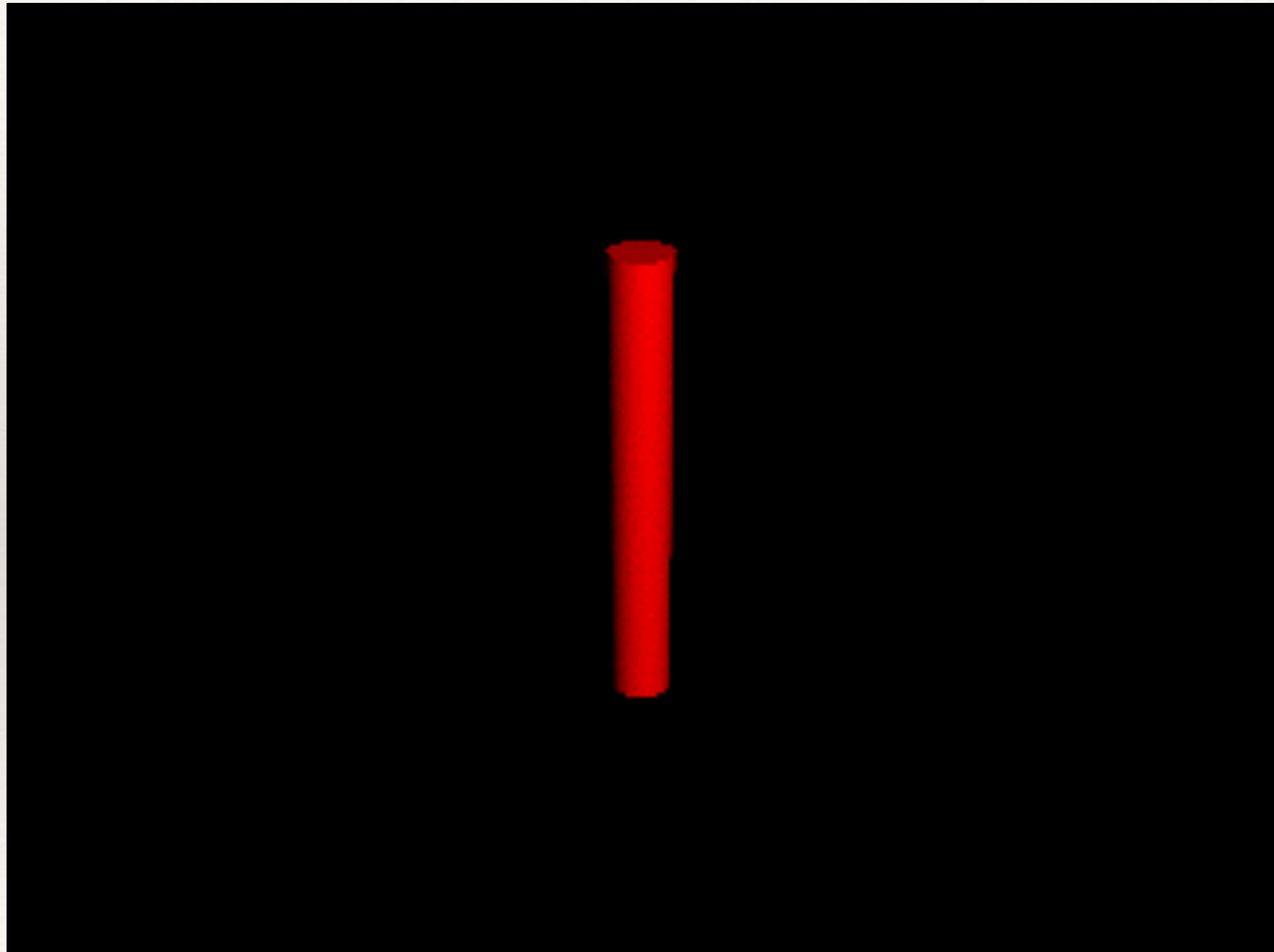
Il fronte d'onda generato è di tipo cilindrico se la sorgente è libera nello spazio o emicilindrico se la sorgente è appoggiata su un piano riflettente.

Possono essere considerate lineari le sorgenti da traffico stradale o ferroviario.

---

# Sorgenti lineari

---



---

# Campo acustico

---

Una descrizione adeguata dei fenomeni sonori richiede la conoscenza dei valori che in ogni istante assumono le grandezze acustiche e, in particolare la pressione acustica nei vari punti del mezzo considerato: è necessaria quindi la conoscenza dettagliata di quello che viene definito campo acustico.

---

# Descrizione del campo acustico

---

Le grandezze utili per definire il campo acustico sono:

Pressione sonora (già definita)

Intensità acustica (già definita)

Densità di energia

---

# Densità di energia

---

La densità di energia  $D$  è una grandezza scalare che rappresenta l'energia  $E$  associata alle onde che si propagano in un mezzo localizzata in un determinato volume  $V$ :

$$D = \frac{E}{V}$$

Si misura in  $\text{J}/\text{m}^3$ .

---

# Campi acustici

---

I principali tipi di campo acustico sono:

In ambiente esterno:

➔ **Campo libero**

In ambiente interno:

Campo riverberante

Campo semiriverberante

---

# Campo libero

---

Quando sono presenti le sole onde irradiate dalla sorgente sonora si è in presenza di quello che viene definito campo libero.

Si tratta di una situazione limite, mai perfettamente realizzabile: anche all'aperto, infatti, esiste sempre una qualche superficie riflettente (si pensi al suolo, ad esempio) che rinvia una parte dell'energia sonora incidente, dando origine ad onde riflesse che vanno ad interferire con le onde dirette.



---

# Campo a simmetria sferica

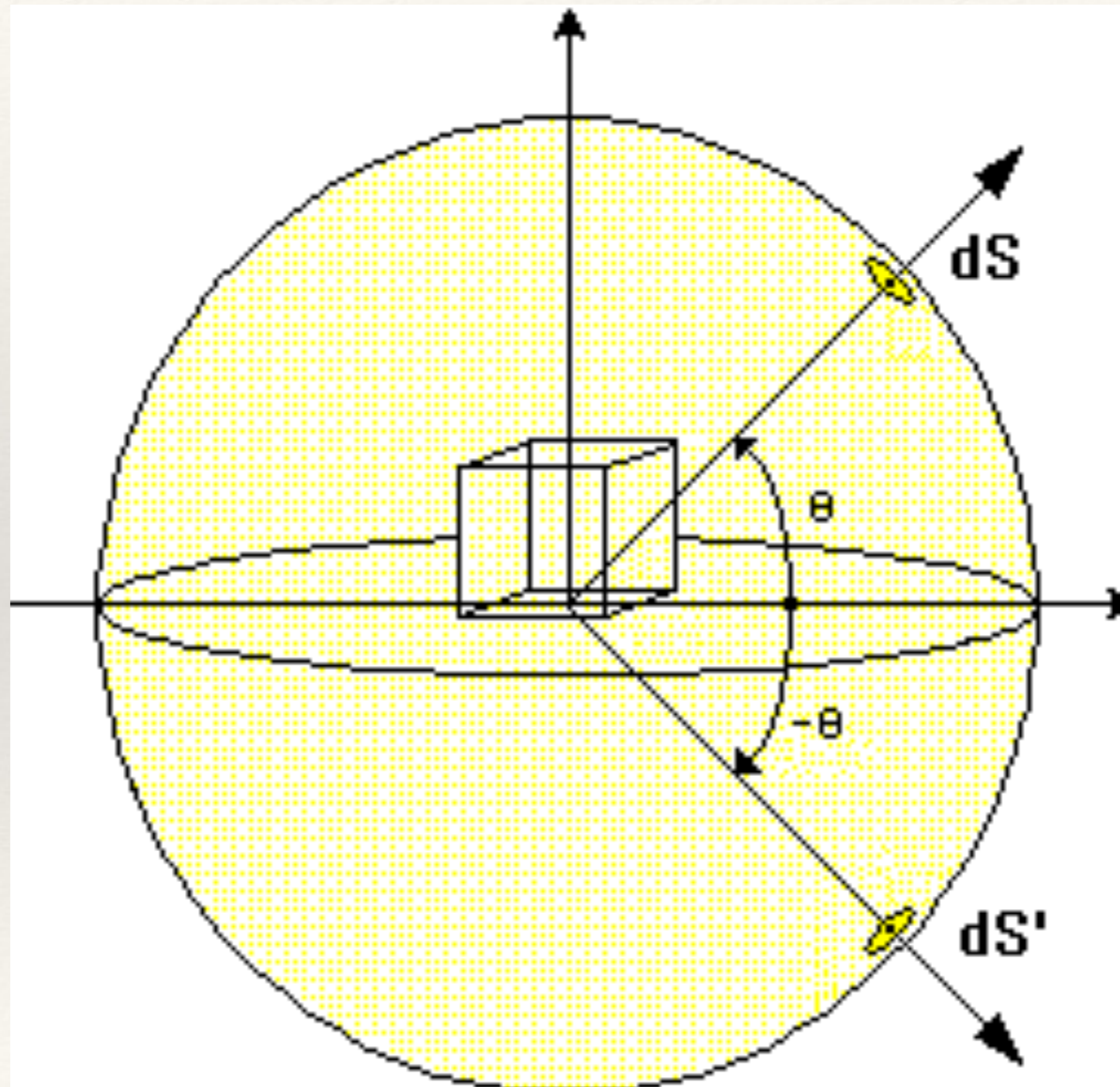
---

I livelli di pressione sonora per una sorgente puntiforme e propagazione sferica, possono essere valutati in condizioni di campo libero, ovvero in ambiente esterno e in assenza di ostacoli o superfici assorbenti, secondo la relazione:

$$L_p = L_w + 10 \log Q - 11 - 20 \log r$$

dove  $L_p$  è il livello di pressione sonora in dB,  $L_w$  il livello di potenza sonora in dB,  $Q$  il fattore di direttività ed  $r$  la distanza dalla sorgente in m.

# Campo a simmetria sferica



---

# Campo a simmetria emisferica

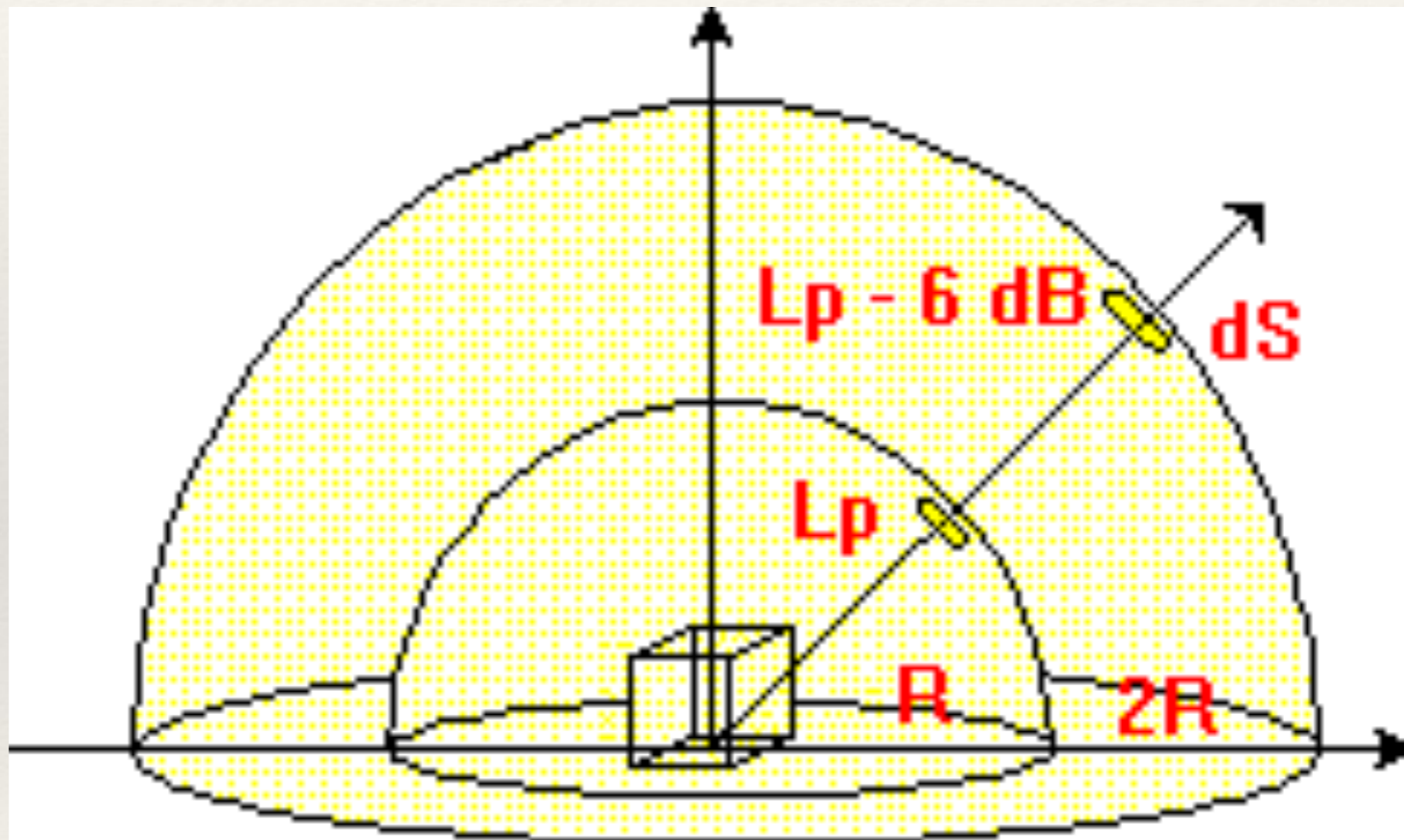
---

I livelli di pressione sonora per una sorgente puntiforme e propagazione emisferica, possono essere valutati in condizioni di campo libero, ovvero in ambiente esterno e in assenza di ostacoli o superfici assorbenti, secondo la relazione:

$$L_p = L_w - 10 \log Q - 8 - 20 \log r$$

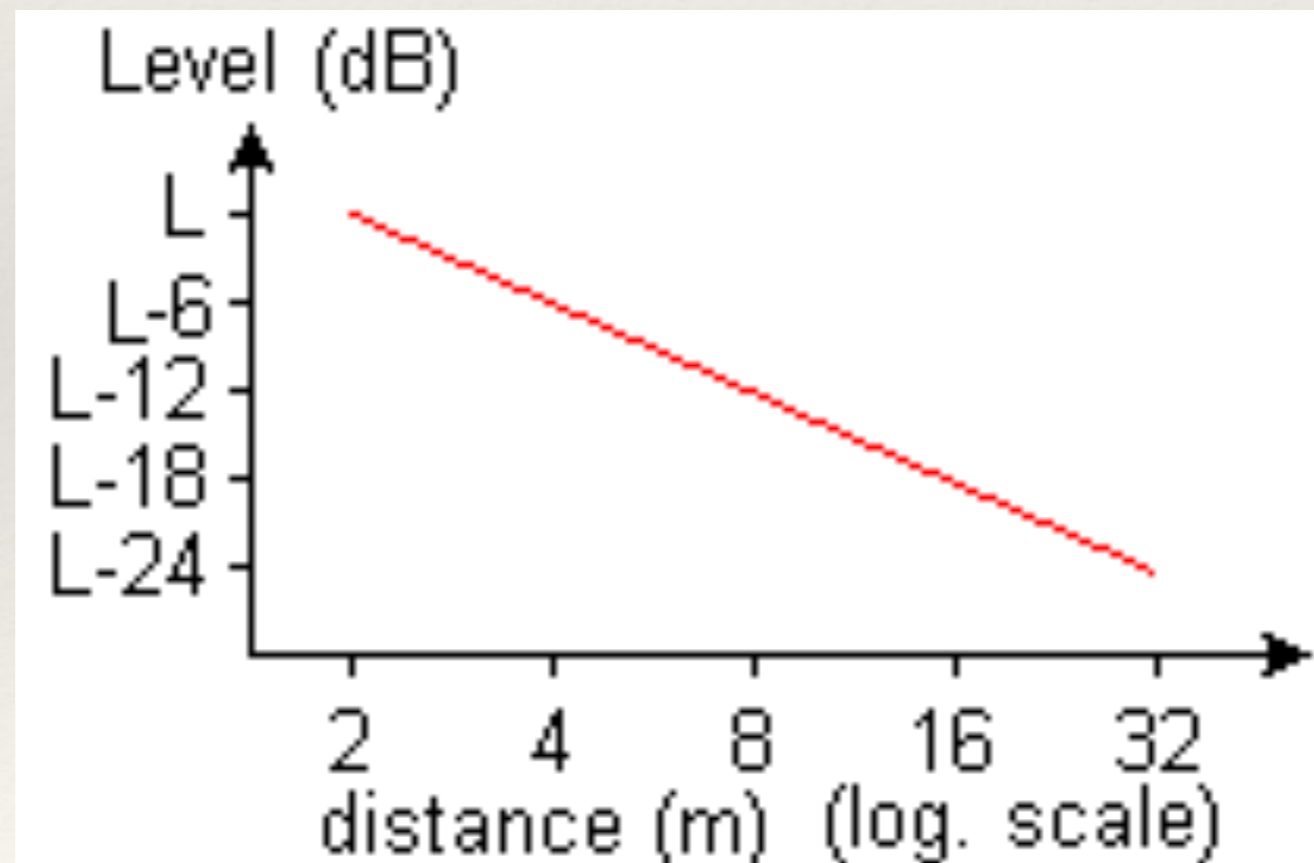
dove  $L_p$  è il livello di pressione sonora in dB,  $L_w$  il livello di potenza sonora in dB,  $Q$  il fattore di direttività ed  $r$  la distanza dalla sorgente in m.

# Campo a simmetria emisferica

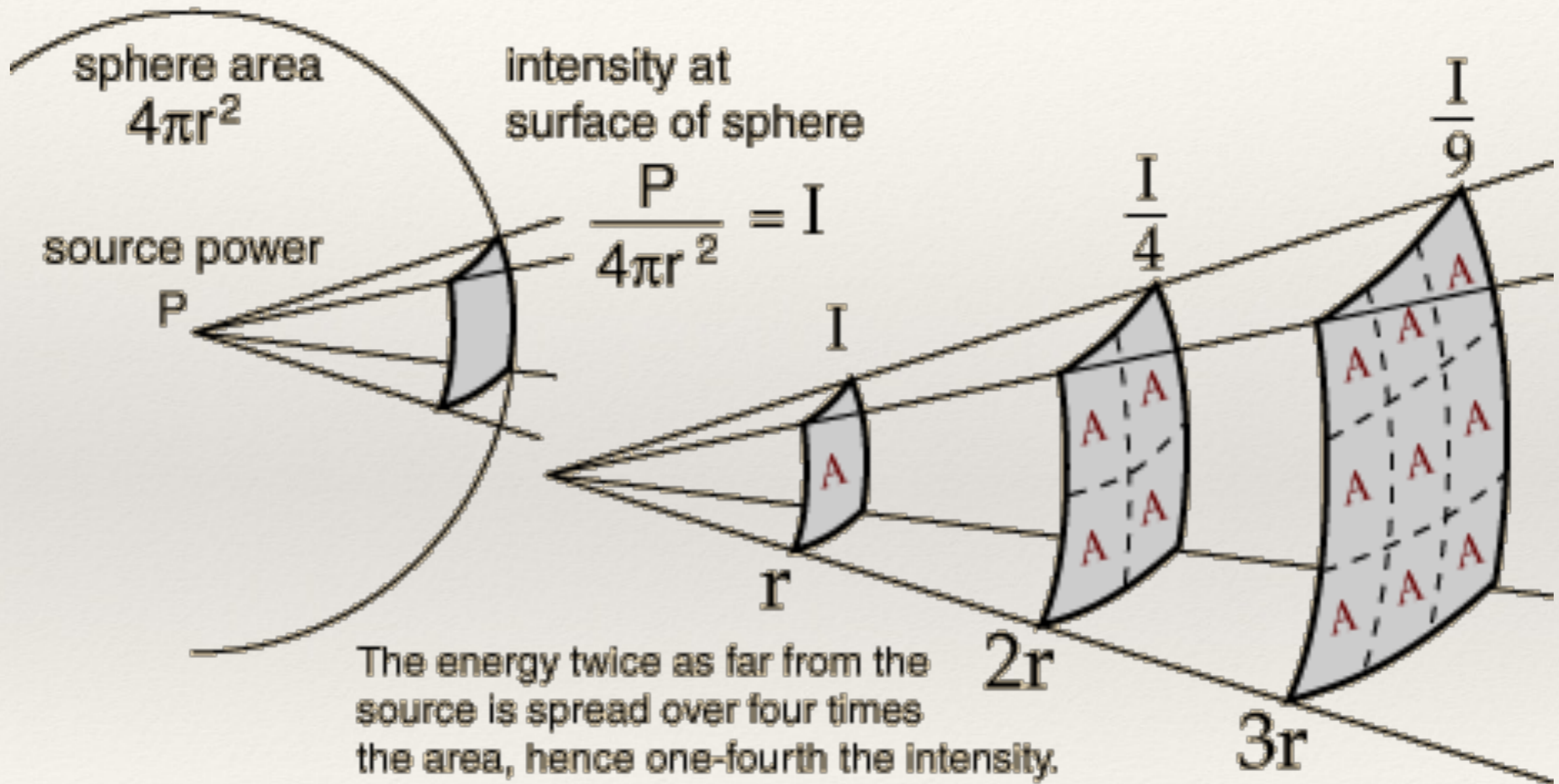


# Decadimento con la distanza

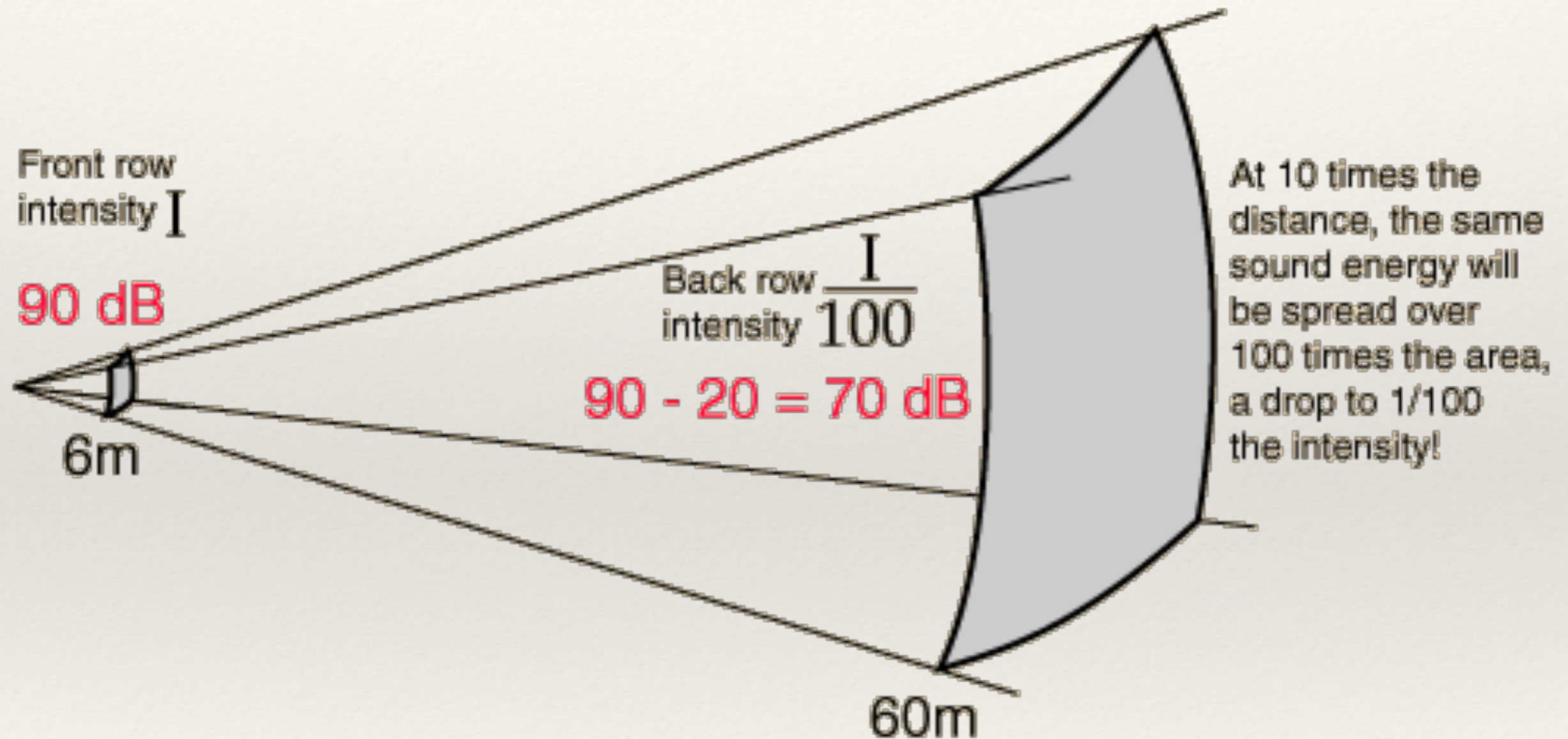
Nel caso di propagazione sferica o emisferica si ha un decadimento del livello di pressione sonora di 6 dB con il raddoppio della distanza.



# Decadimento con la distanza



# Decadimento con la distanza



---

# Campo a simmetria cilindrica

---

I livelli di pressione sonora per una sorgente lineare e propagazione cilindrica possono essere valutati in condizioni di campo libero, ovvero in ambiente esterno e in assenza di ostacoli o superfici assorbenti secondo la relazione:

$$L_p = L_w - 8 - 10 \log r$$

dove  $L_p$  è il livello di pressione sonora in dB,  $L_w$  il livello di potenza sonora in dB ed  $r$  la distanza dalla sorgente in m.



---

# Campo a simmetria emicilindrica

---

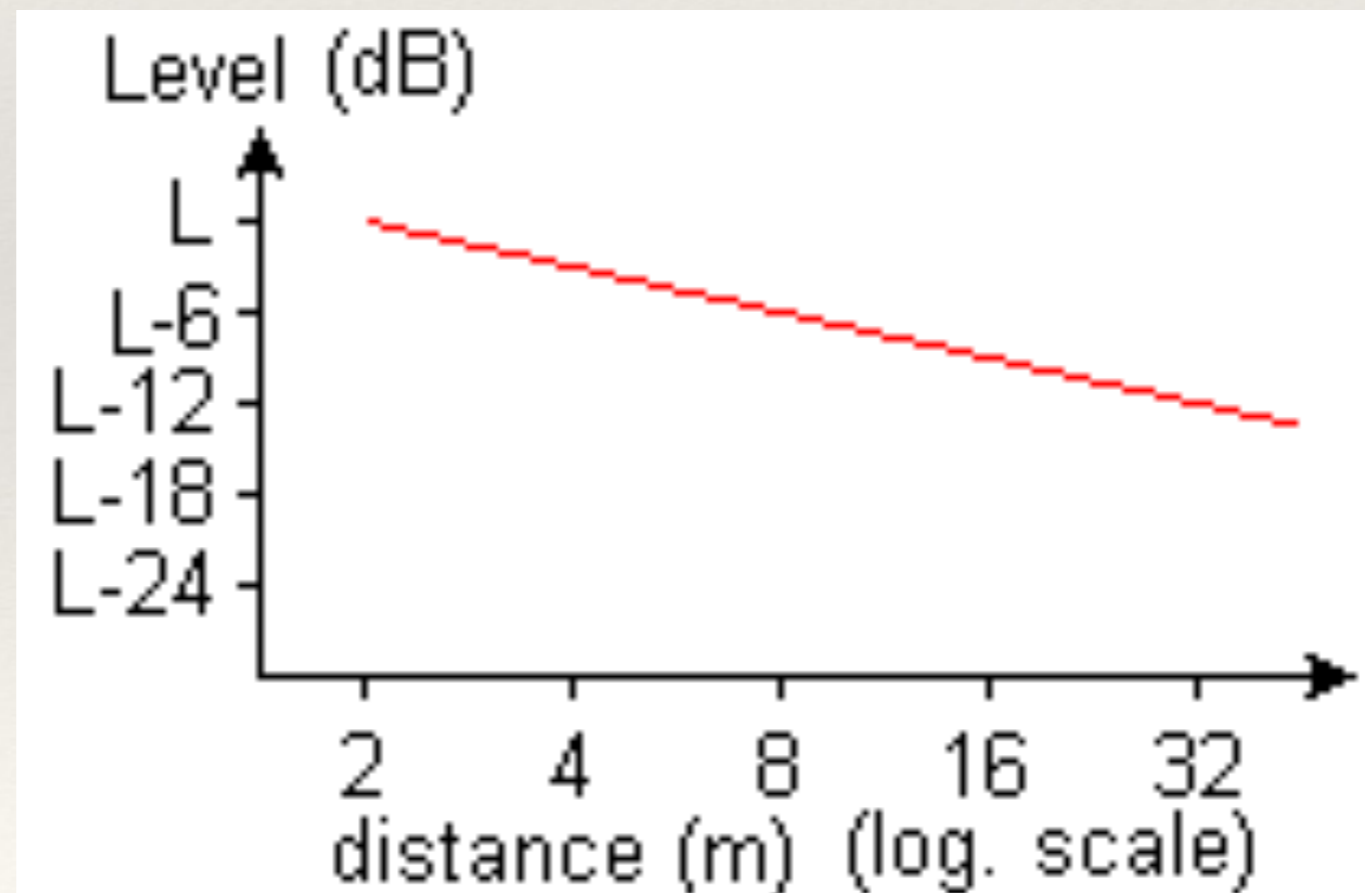
I livelli di pressione sonora per una sorgente lineare e propagazione emicilindrica possono essere valutati in condizioni di campo libero, ovvero in ambiente esterno e in assenza di ostacoli o superfici assorbenti secondo la relazione:

$$L_p = L_w - 5 - 10 \log r$$

dove  $L_p$  è il livello di pressione sonora in dB,  $L_w$  il livello di potenza sonora in dB ed  $r$  la distanza dalla sorgente in m.

# Decadimento con la distanza

Nel caso di propagazione cilindrica si ha un decadimento del livello di pressione sonora di 3 dB con il raddoppio della distanza.



---

Fine

---