

- **Definizioni**
- **Le onde sonore**
- **Altezza timbro e intensità del suono**
- **Il riverbero**
- **Percezione di frequenze diverse**
- **Intervalli di frequenze**
- **Campo uditivo e curve isofoniche**
- **Generazione del suono**
- **Scale musicali e note**

# DEFINIZIONI

## SUONO

variazioni di pressione di un certo mezzo fisico che si percepiscono con l'apparato auditivo.

## MEZZO FISICO

prevalentemente aria, ma il suono si propaga anche in acqua e altri materiali.

## ONDE

le variazioni di pressione si propagano come **ONDE SFERICHE**.

Se  $S$  è la sorgente sonora troviamo che sulle superfici sferiche concentriche ad essa il suono ha le medesime caratteristiche, cioè il segnale generato da  $S$  si propaga alla stessa velocità in tutte le direzioni (in ipotesi di mezzo isotropo).

Qualora la sorgente si muova a velocità  $v$  troviamo che le onde generate in tempi successivi non sono più concentriche, ma "spostate" verso la direzione del moto. Quando la sorgente arriva alla velocità del suono essa si muove alla stessa velocità del rumore che genera e quindi sta sul bordo di queste sfere: tutta l'energia "sonora" generata nella direzione del moto si accumula in questo punto. (Esempio: il BOOM sonico di un aereo che supera la velocità del suono MACH1 @ 340m/s @ 1224km/h).

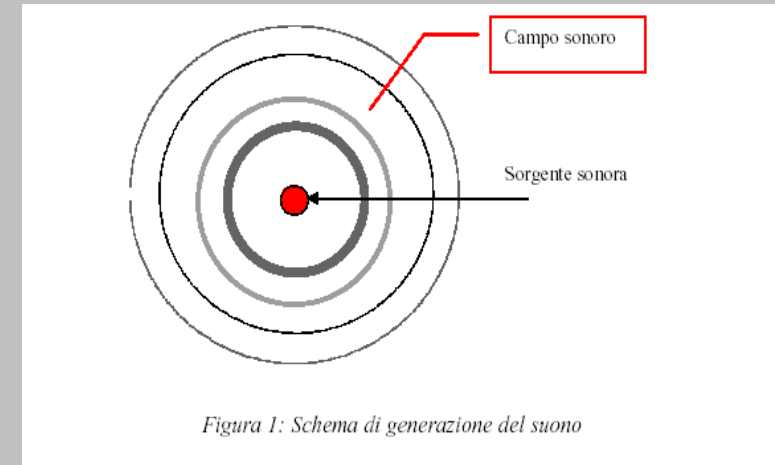
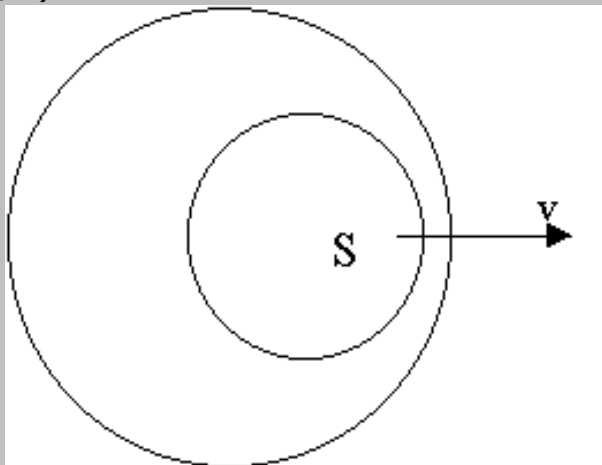
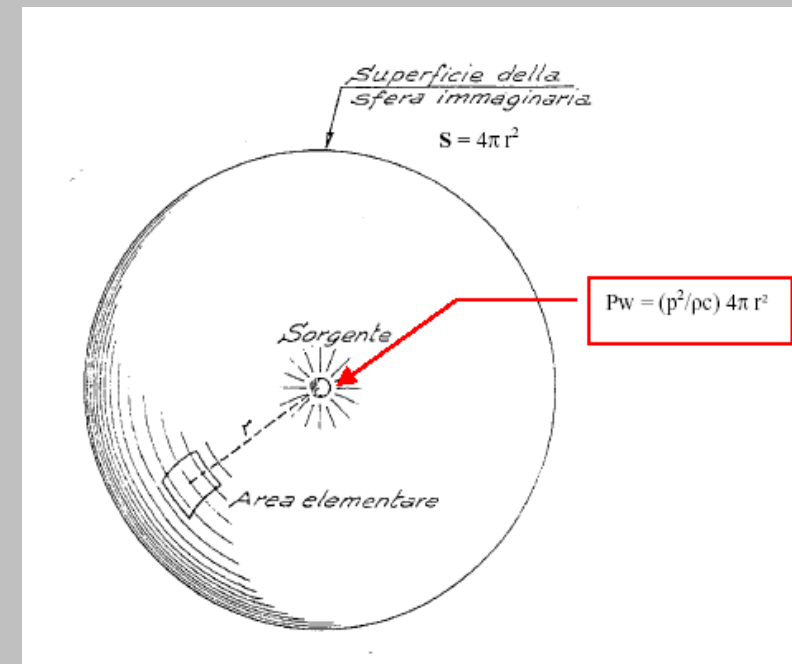


Figura 1: Schema di generazione del suono



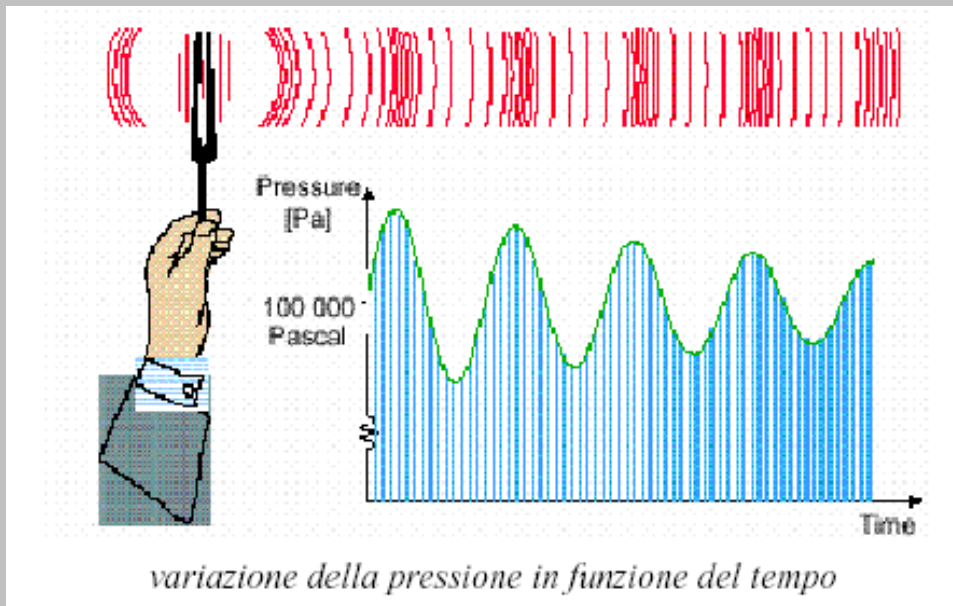
# DEFINIZIONI

L'onda trasporta con sé energia accumulata in parte sotto forma di **ENERGIA CINETICA** ed in parte sotto forma di energia elastica di compressione.

La sorgente produce un LAVORO sul mezzo con cui è a contatto (l'aria). Quindi la propagazione dell'onda corrisponde ad una propagazione di energia.

Considerando l'energia che attraversa una superficie sferica nell'unità di tempo troveremo la **POTENZA** erogata dalla sorgente.

L'**INTENSITÀ** di un onda è definita come  $POTENZA/SUPERFICIE=[W]/[m^2]$ .



SORGENTE SONORA	LIVELLO
	dB
Limite di udibilità	0
Respiro	10
Bisbiglio	20
Rumore di fondo notturno in città	30
Ufficio silenzioso	50
Conversazione tra 2 persone a 1 m	55
Ristorante affollato	70
Traffico cittadino diurno	70-80
Martello pneumatico	90
Metropolitana	100
Complesso rock in locale chiuso	110
Soglia del dolore	120
Jet al decollo (a 50m.)	130
Galleria del vento	150
Decollo missile Saturno (a 50 m.)	190
Massimo rumore prodotto in laboratorio	210

# LE ONDE SONORE

Osservando l'onda, la sua evoluzione nel tempo è rappresentata dal primo grafico, punti successivi (cioè ad  $x$  crescenti) nello spazio presentano spostamenti diversi, mostrando come si muove l'onda di pressione; il mezzo non si muove ma oscilla;

l'onda presenta un andamento sinusoidale sia nello spazio che nel tempo.

Illustrazione 4: onde sinusoidali in funzione de tempo e deo spazio

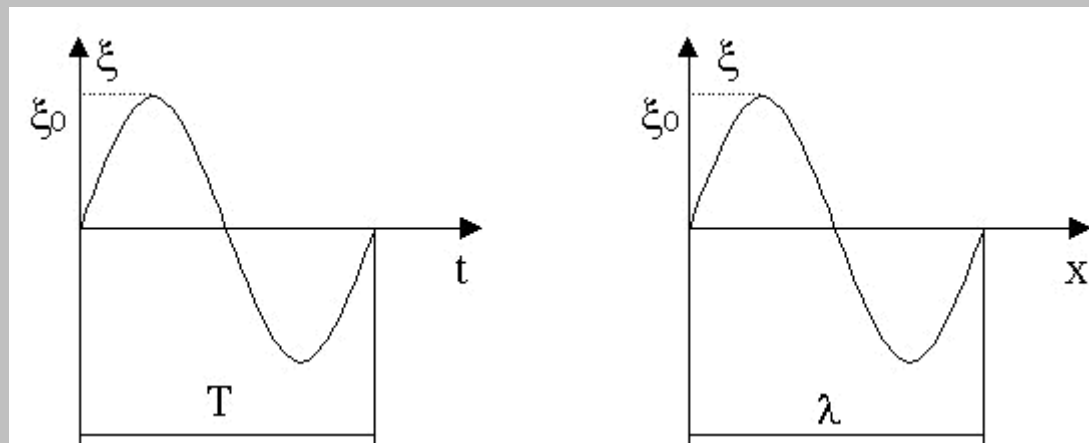
$T$  ([s]) è detto **PERIODO** dell'onda,  $f = 1/T$  ([Hz]=[s<sup>-1</sup>]) è la **FREQUENZA** mentre  $w$  è detta **PULSAZIONE**.

Osservando l'onda ad un certo istante  $t$  si troverà che gli spostamenti del mezzo nello spazio sono quelli rappresentati dal secondo grafico.

$l$  ([m]) è detta **LUNGHEZZA D'ONDA**.  $k = 2\pi / l$ , definito come **NUMERO D'ONDA**

L'onda si propaga nello spazio ad una certa velocità  $v = l/T$

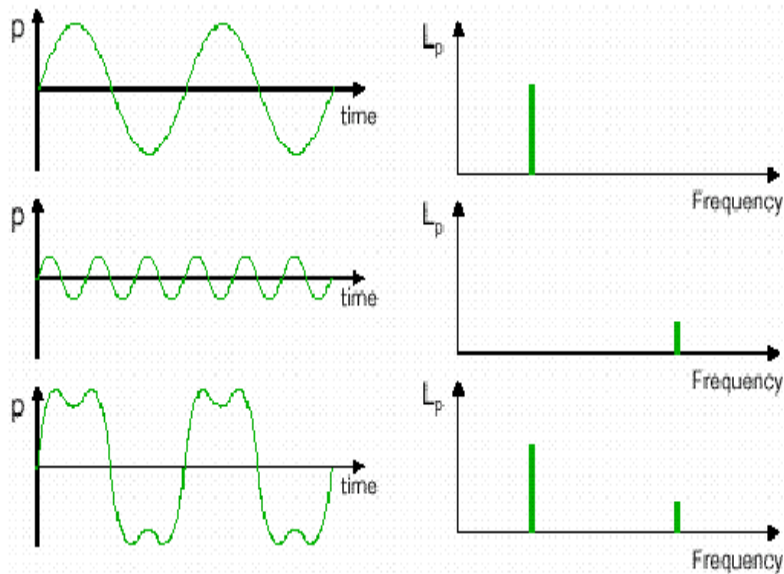
Qualora la sorgente sia in moto verso l'ascoltatore, rispetto ad esso la distanza temporale tra due massimi dell'onda risulta più piccola: **IL SUONO HA UNA FREQUENZA PIÙ ALTA**. Quindi un treno in movimento genererà, per l'ascoltatore che lo vede avvicinarsi, un suono che risulterà più acuto di quello che sente un ascoltatore solidale al treno stesso. Nella fase di allontanamento si avrà la sensazione opposta: **EFFETTO DOPPLER**.



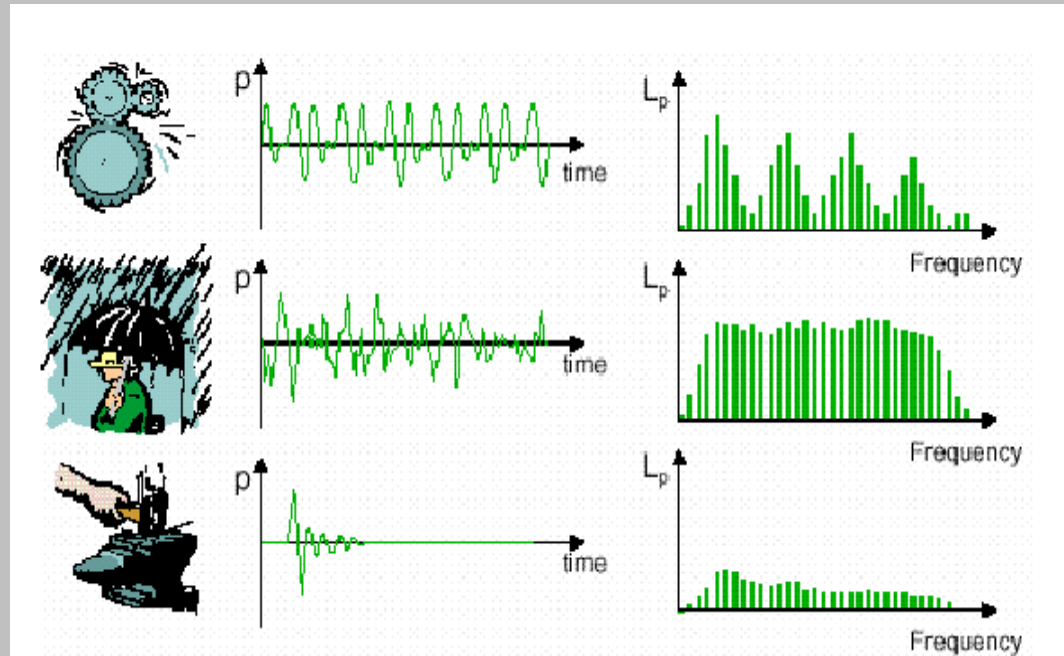
# ALTEZZA TIMBRO E INTENSITA' DEL SUONO

Sono le caratteristiche di un suono. Al crescere della frequenza di un suono cresce la nostra percezione di **ALTEZZA**, mentre al crescere della sua **INTENSITA'** abbiamo una percezione di aumento di volume.

Il teorema di scomposizione di Fourier dice che una grandezza **PERIODICA** può essere considerata come la somma di una serie di onde sinusoidali (suoni armonici). Il suono si può considerare, nelle maggior parte dei casi, come una grandezza "quasi-periodica", quindi si può scomporre nelle sue componenti sinusoidali. Le diverse frequenze che costituiscono un suono ne definiscono lo **SPETTRO**. In musica si parla di **TIMBRO**.



*Suoni puri ed armonici*



*Suoni complessi o aperiodici.*

# IL RIVERBERO

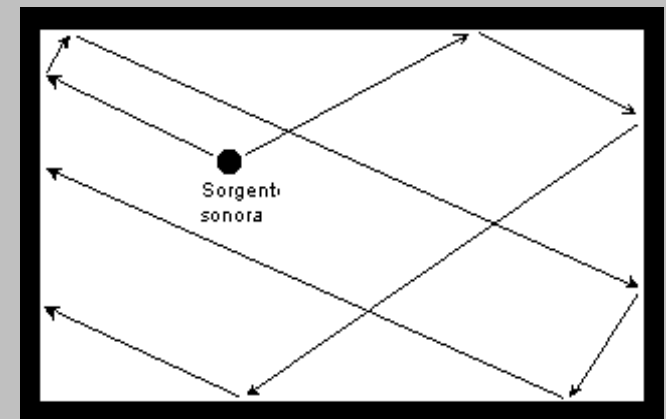
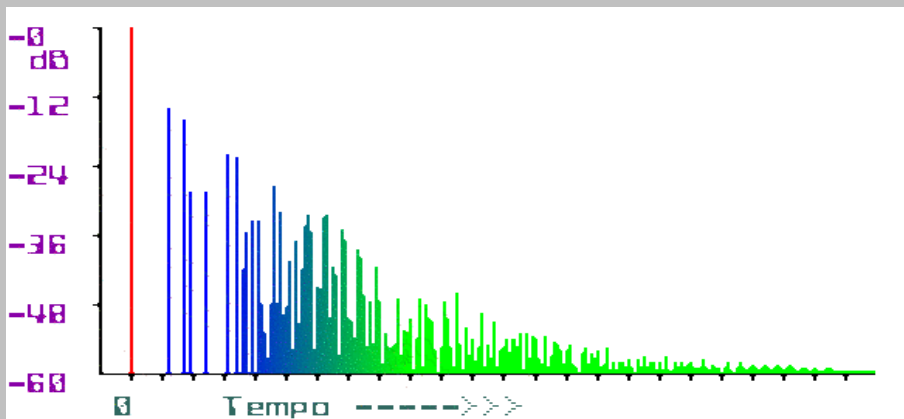
Il **riverbero** è un fenomeno acustico legato alla riflessione del suono da parte di un ostacolo posto davanti alla fonte sonora: per esempio, se in una stanza una sorgente sonora cessa di irradiare, il livello sonoro diminuisce tanto più lentamente quanto minore è l'assorbimento acustico delle pareti.

Il riverbero ha aspetti negativi, come il rischio di mascheramento delle sillabe del parlato o del fraseggio musicale, e positivi, come il rinforzo dell'intensità della sorgente. L'orecchio umano non riesce a distinguere due suoni se essi sono prodotti a meno di 1/10 di secondo di distanza uno dall'altro (fenomeno della persistenza).

Visto che la velocità del suono nell'aria a 20 °C è di circa 340 m/s, in uno spazio aperto si può parlare di riverbero quando l'ostacolo si trova a meno di 17 metri dalla fonte del suono. Fino a tale distanza, infatti, il percorso dell'onda sonora (dalla fonte all'ostacolo e ritorno) sarà inferiore a 34 metri e quindi il suono impiegherà meno di 1/10 di secondo per tornare al punto di partenza confondendosi nell'orecchio dell'ascoltatore con il suono originario.

Se l'ostacolo si trova a più di 17 metri di distanza dalla fonte, allora suono diretto e suono riflesso distante tra loro di più di 1/10 di secondo risultando quindi come due suoni distinti. In questo caso si parla di eco.

In uno spazio chiuso ampio come ad esempio una chiesa, a seguito di un suono secco si possono udire le innumerevoli riflessioni delle estese pareti che decrescono di intensità fino al silenzio. La riverberazione dipende dalla dimensione dell'ambiente e dalla natura delle pareti investite dal suono. Materiali diversi hanno coefficienti di assorbimento diversi. Inoltre, le riflessioni su pareti di tipo diverso hanno intensità diverse a frequenze diverse.



# PERCEZIONE DI FREQUENZE DIVERSE

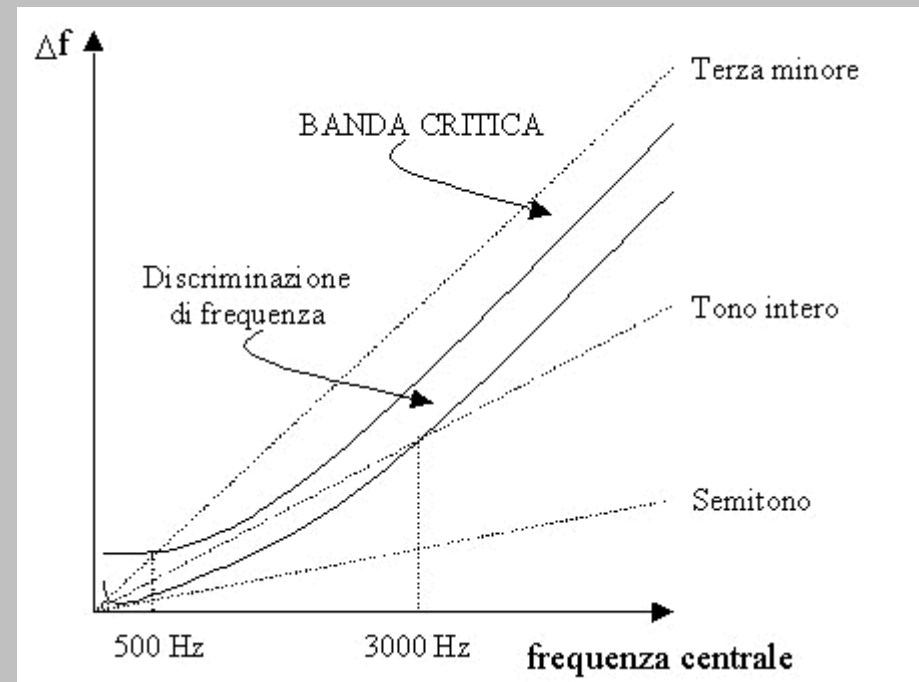
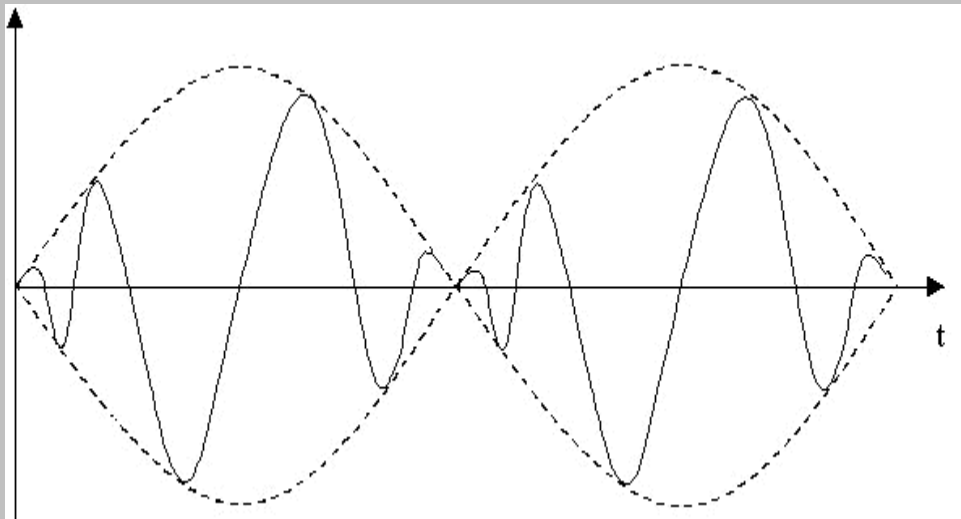
La modalità di percezione di due frequenze diverse dipende da un fattore **FISICO** e da un fattore **NEURALE**

Supponiamo di avere due suoni puri (mono-frequenziali)  $f_1$  ed  $f_2$ .

Se le due frequenze sono sufficientemente vicine si osserva un'onda di frequenza pari alla media delle due **MODULATA IN AMPIEZZA** da un'onda a frequenza più bassa: **fenomeno dei BATTIMENTI**. (esempio, accordando le corde di una chitarra).

Se le frequenze sono sufficientemente distanti, dal punto di vista fisiologico la presenza di due suoni produce due massimi di risonanza distinti lungo la **COCLEA**. La capacità di distinguere le due frequenze dipende quindi dalla "risoluzione" della coclea. Esiste un campo di valori di  $f_1$ , in un intorno sufficientemente piccolo di  $f_1$ , in cui si percepisce un solo suono, che è la media dei due; se la differenza tra  $f_1$  ed  $f_2$  sta al di fuori di questo intorno ma al di sotto della **BANDA CRITICA** si è in una zona in cui, prestando attenzione, si possono distinguere le due note; per frequenze  $f_1$  ed  $f_2$  al di fuori della **BANDA CRITICA** i due suoni si distinguono nettamente;

Le ampiezze della **BANDA CRITICA** e della zona di percezione mono-frequenziale crescono al crescere della frequenza di riferimento.



# INTERVALLI DI FREQUENZE

**SEMITONO:** un suono monofrequenziale avente frequenza  $f_2$  si dice essere un semitono sopra ad un suono a frequenza  $f_1$  se  $f_2 = 16/15 f_1$

**TONO:**  $f_3 = 9/8 f_1$

**TERZA MINORE:**  $f_4 = 6/5 f_1$

**CONSONANZA:** due note che "suonano bene assieme" ed è un fenomeno SOGGETTIVO e legato all'ascolto

**DISSONANZA:** note che "non suonano bene assieme".

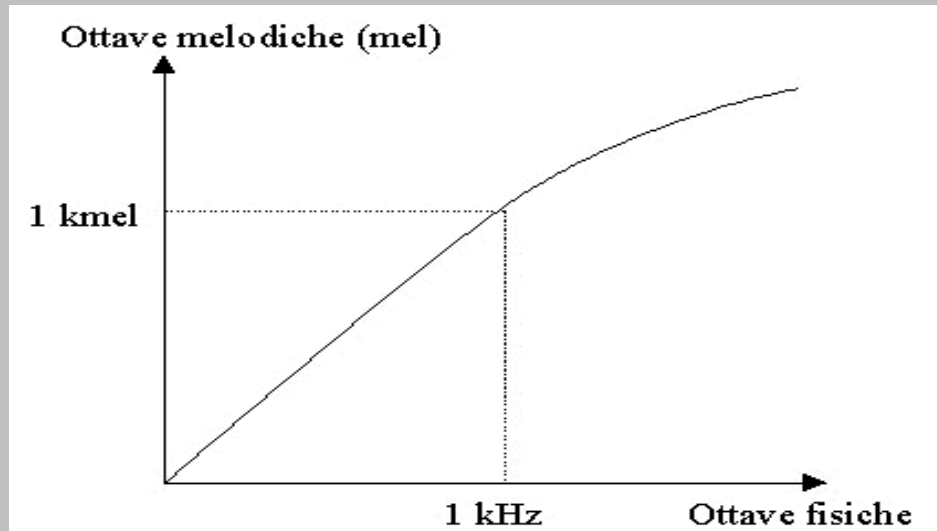
Gli intervalli di un tono e di un semitono cadono al di sotto della banda critica. Questo è uno dei motivi per cui ascoltando due note aventi uno di questi due intervalli percepiamo una **DISSONANZA**.

L'intervallo di terza minore, invece, cade al di sotto della banda critica solo per frequenze al di sotto dei 500 Hz ed è, infatti, consuetudine dei musicisti non utilizzare questo intervallo per frequenze basse.

**OTTAVA:**  $f_2 = 2 f_1$ ; con questa definizione di ottava si costruiscono varie **SCALE**.

Se due note sono distanti una o più ottave, "si percepisce" la stessa nota ma si riconosce che una delle due ha un'altezza maggiore. Un aumento di un'ottava "percepita" (quindi melodica) corrisponde al raddoppio di frequenza. Così il LA a 440 Hz utilizzato per accordare gli strumenti musicali avrà una nota un'ottava sopra a 880 Hz ed una nota un'ottava sotto a 220 Hz. (IN REALTÀ non è proprio così: per frequenze superiori ad 1 kHz si ha la percezione uditiva di una nota un'ottava superiore per incrementi di frequenza superiori al raddoppio).

Noi percepiamo quello a cui siamo abituati. Infatti il cervello, dove il suono viene elaborato, viene addestrato all'ascolto.





# CAMPO UEDITIVO E CURVE ISOFONICHE

L'intensità di riferimento è la soglia di udibilità a 1000 Hz. (  $I_0 = 10^{-12}$  [W]/[m<sup>2</sup>] )

Il rapporto  $I/I_0$  indica un valore puramente numerico che si potrà utilizzare per indicare un valore di intensità relativo che sia più significativo di quello assoluto. Il campo di variabilità di questo rapporto è molto grande, quindi si definisce una nuova unità di misura (il **DECIBEL dB** =  $10 \log I/I_0$  )

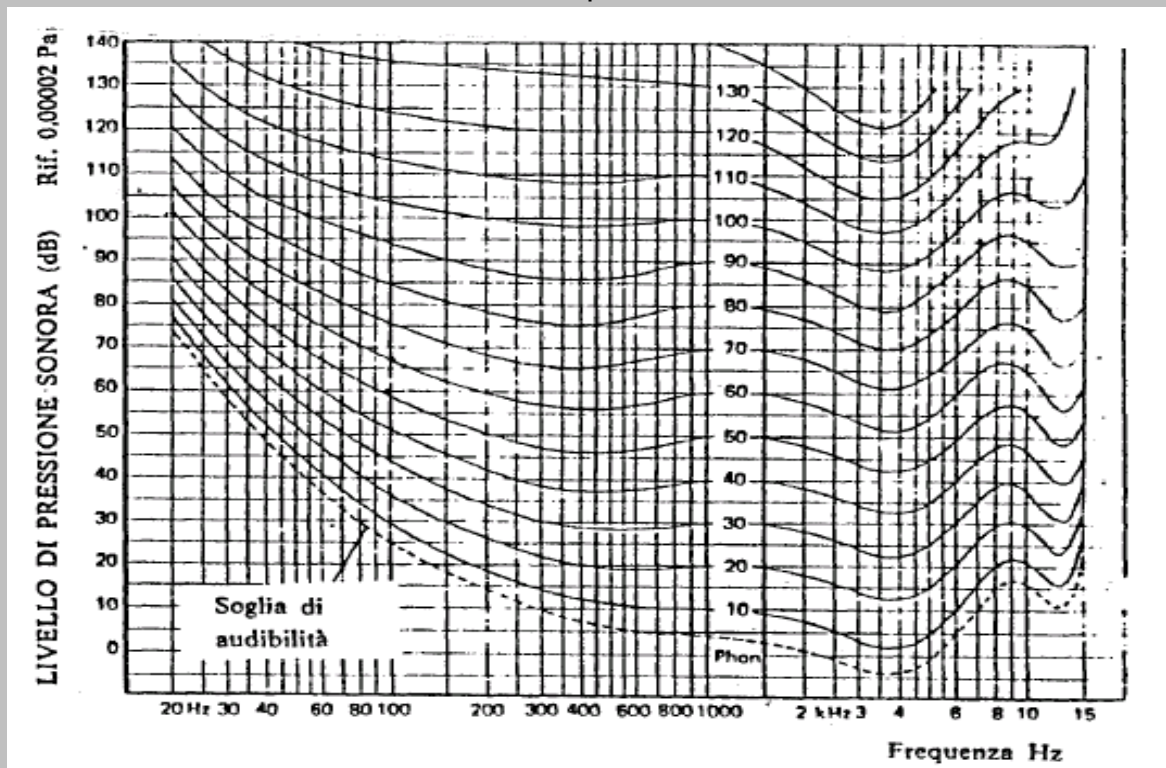
Notare che la soglia del dolore è a 120 dB cioè ad una  $I$  mille miliardi ( $10^{12}$ ) di volte più grande di  $I_0$ !

Poiché la percezione dell'intensità del suono varia con la frequenza, si usano le cosiddette **CURVE ISOFONICHE**

In corrispondenza del punto di maggior sensibilità (3 kHz) si trova il limite inferiore di percezione di ampiezza del timpano

Queste curve definiscono il **LIVELLO DI LOUDNESS** (che si esprime in **phon**). Quando ci si muove lungo una di queste curve l'ascoltatore medio percepisce una sonorità (un volume) costante, nonostante il valore assoluto di intensità vari di molti ordini di grandezza.

Tali curve sono tracciate in modo tale che a 1000 Hz il valore di phon ed il valore di intensità assoluta coincidano.



# GENERAZIONE DEL SUONO

La generazione di suono più interessante (e più semplice) è quella degli strumenti musicali a **CORDE VIBRANTI**. Si tratta di corde elastiche vincolate alle due estremità e soggette ad una certa tensione longitudinale. Queste, opportunamente sollecitate, oscillano per un certo periodo, durante il quale trasmettono, direttamente o tramite terze parti la vibrazione all'aria.

In questo modo nasce una oscillazione composta da un numero teoricamente infinito di onde. Di questo numero infinito di onde ne "sopravvivono" solo alcune: le **ONDE STAZIONARIE** (solo le onde che presentano nodi in corrispondenza dei vincoli della corda sono tali da conservare la propria energia, mentre le altre si smorzano).

L'onda stazionaria a frequenza più bassa è quella con lunghezza d'onda  $\lambda_1/2 = L$  (lunghezza corda). Le successive sono tutte e sole quelle che hanno lunghezza d'onda esprimibile come sottomultiplo intero di  $\lambda_1$  ( $\lambda_1/2, \lambda_1/3, \lambda_1/4$ ) dette armoniche

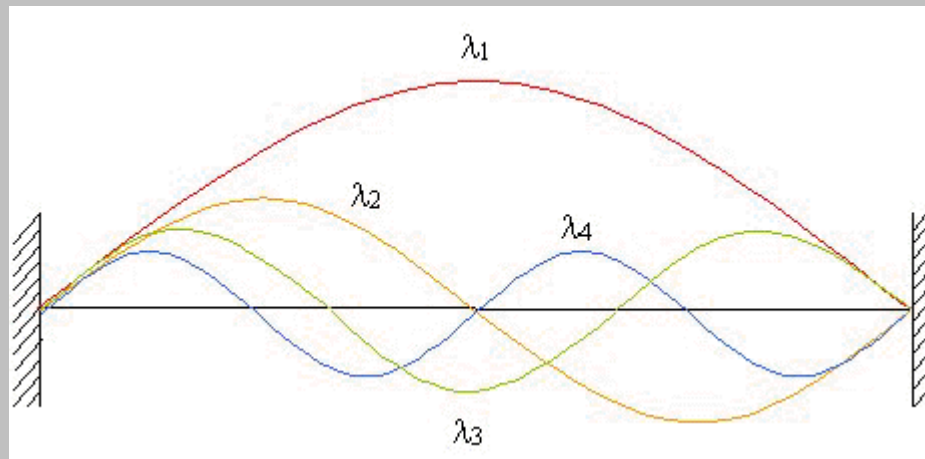
Quindi un suono 'naturale' è in generale composto da diverse armoniche (di ottava superiore), che ne caratterizzano il timbro. L'energia per le varie componenti armoniche cala al crescere della frequenza della armonica corrispondente.

Il cervello percepisce consapevolmente solo le armoniche a frequenza più bassa, mentre le superiori vengono percepite a livello **subliminale**.

In presenza di segnali di piccola ampiezza la percezione simultanea di una nota a frequenza  $f_2$  e di una a frequenza  $f_3 = 3/2 f_2$  crea la sensazione di una  $f_1 = 1/2 f_2$  (fenomeno di **RINTRACCIAMENTO DELLA FONDAMENTALE**).

ESEMPIO. Il telefono taglia le armoniche al di sotto dei 300 Hz (fondamentale maschile = 100Hz, femminile = 200 Hz), ma l'orecchio ricostruisce le fondamentali partendo dalle armoniche superiori.

Quindi l'**ALTEZZA** e l'intensità andrebbero ridefinite per i suoni plurifrequenziali.



# SCALE MUSICALI E NOTE

Le composizioni musicali sono costituite da una successione e da una sovrapposizione di note, cioè di suoni di determinate frequenze.

La **scala naturale** è costituita da sette note fondamentali: do, re mi, fa, sol, la, si.

La nota do<sub>2</sub>, che ha frequenza doppia di do, inizia un'altra serie di sette note che hanno tra loro rapporti di frequenze uguali a quelli delle precedenti sette note. Ciascuna serie di 7 note si chiama **ottava**.

La scala è arricchita di note, introducendo i diesis e i bemolle tra due note successive, eccettuato tra il mi e il fa e tra il si e il do dell'ottava superiore.

**Diesis** di una nota è la nota (più alta) avente con la prima l'intervallo 25/24.

**Bemolle** di una nota è quella nota (più bassa) che ha con la prima l'intervallo 24/25.

Per semplificare le cose e per ovviare agli inconvenienti della scala naturale, alla fine del 1600, **Andreas Werckmeister** (seguito poi da **J. Sebastian Bach**) introdusse la **Scala temperata**:

Nella scala temperata gli intervalli tra due note successive sono sempre uguali. L'ottava viene suddivisa in dodici semitoni uguali, per cui l'intervallo di un semitono è pari a 1,05946

Tra le note do-re, re-mi, fa-sol, sol-la, la-si della scala temperata vi è l'intervallo di due semitoni; tra mi-fa e si-do vi è l'intervallo di un solo semitono.

Tra due note aventi l'intervallo di due semitoni è intercalata una nota intermedia che corrisponde ai diesis e bemolle della scala naturale.

Finora si è detto soltanto di rapporti tra le frequenze delle diverse note. I valori assoluti di queste frequenze non avrebbero importanza se si eseguissero soltanto pezzi suonati da un solo strumento o cantati da una sola voce. Ma, se si devono eseguire pezzi a più strumenti o a più voci, bisogna partire da un punto comune, cioè accordare tutti gli strumenti a una stessa nota che abbia una ben determinata frequenza, quella del **diapason**.

A questo scopo è stato scelto il **la** della terza ottava del pianoforte, fissato dalla Accademia delle Scienze di Parigi nel 1858 e confermato dalla Conferenza internazionale di Vienna, con una frequenza pari a **435** hertz.

Tale misura nel 1954 venne innalzata a **440** hertz, valore adottato dall'American Standards Association nel 1936.

