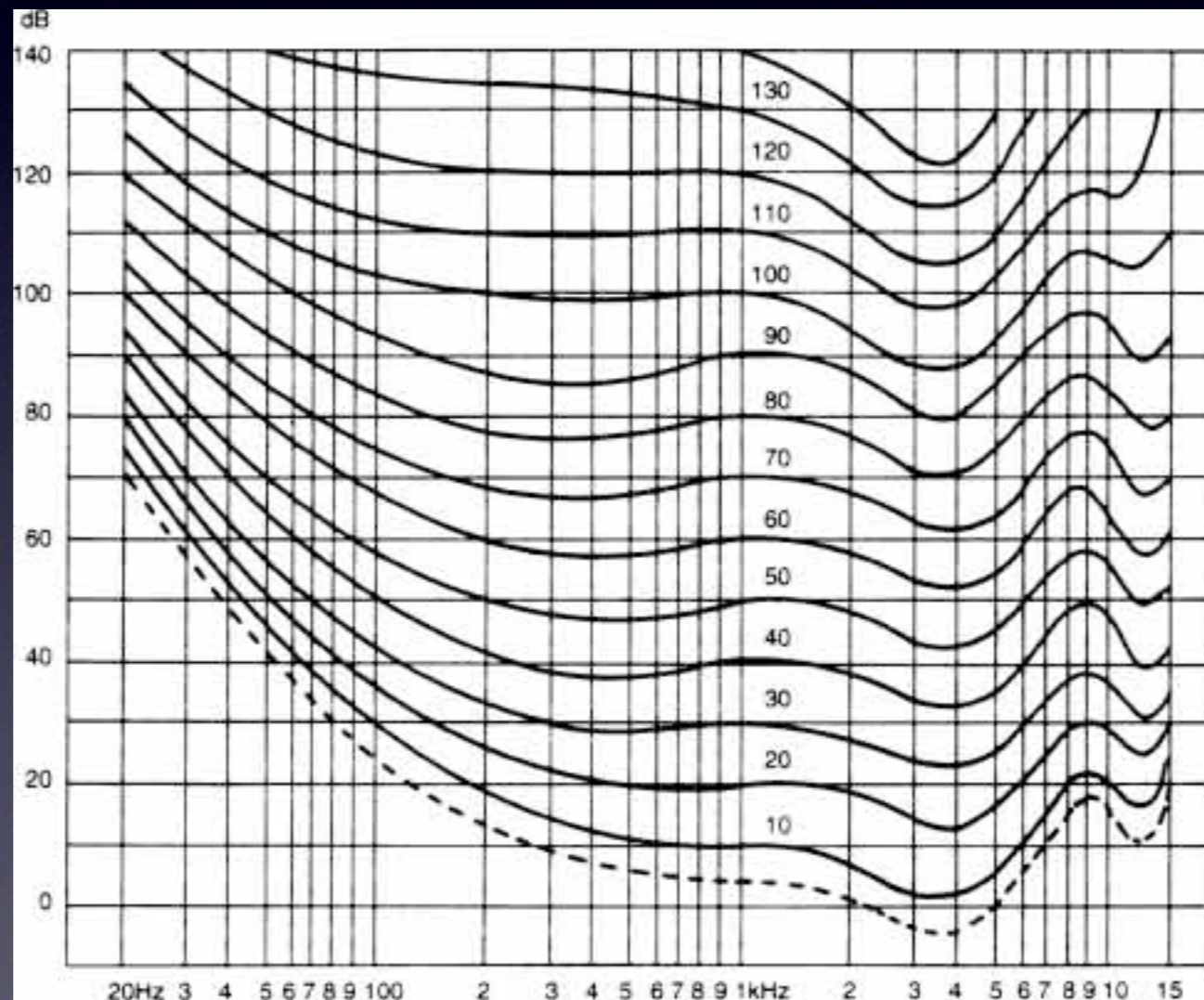


# cap 2: La produzione e la percezione del suono

- campo di udibilità e misura della sensazione uditiva
- generalità sulle vibrazioni delle sorgenti sonore
- le vibrazioni delle corde: onde stazionarie
- vibrazioni armoniche (armonici) - (onde semplici e complesse)
- inviluppo
- le vibrazioni delle canne sonore
- strumenti a percussione
- la voce umana
- legge di Young
- direzione e spazio

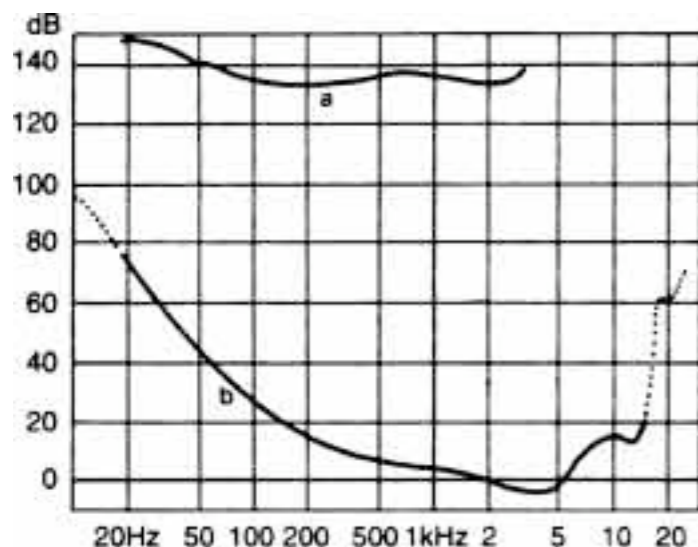


# Campo di udibilità e misura della sensazione uditiva



Il suono è il prodotto delle vibrazioni acustiche al livello della sensazione uditiva:  
ma non tutte le vibrazioni acustiche sono idonee a produrre suono!

Non è possibile trattare questo argomento senza parlare delle caratteristiche essenziali del fenomeno uditivo, in quanto la sensibilità dell'orecchio ha limiti naturali ben definiti.



*Il campo di udibilità:* è determinato dai valori limite di intensità e di frequenza. Il limite inferiore per l'intensità (rappresentata in ordinate) è costituito dalla curva di soglia di udibilità (b); quello superiore dalla curva di soglia del dolore (a). I limiti per la frequenza (rappresentati in ascisse) sono dati, invece, da un valore inferiore, che oscilla fra i 15 e i 20 Hz e da superiore uno che si aggira sui 20.000 Hz (pari a 20 kHz).

Il campo delle frequenze acustiche si estende a oltre 10.000.000 di vibrazioni al secondo (10.000 KHz), ed è incomparabilmente più grande rispetto all'area di udibilità, quindi solo una piccola fascia di queste frequenze può essere percepita come suono.

## Campo di Udibilità:

Sottoponendo un numero sufficiente di volte e nelle condizioni sperimentali opportune i singoli componenti di un gruppo di ascolto all'audizione successiva di toni diversi è possibile stabilire la soglia di udibilità per ciascuna frequenza.

Segnando poi su di un piano cartesiano la media dei valori ottenuti e collegando i punti fra di loro si ottiene la curva della soglia di udibilità, che rappresenta la sensibilità dell'udito alle diverse frequenze. Da essa si ricava che la sensibilità dell'udito varia alle diverse frequenze, come appare dalla fig. nella slide precedente, è massima fra i 2000 e i 5000 Hz mentre è nulla sotto dei 16-20 Hz e al di sopra dei 16.000-20.000 Hz (*l'interpretazione del diagramma sarà più intuitiva se l'altezza delle ordinate verrà letta come numero di decibel [dB] necessari perché il suono raggiunga la soglia di udibilità*).

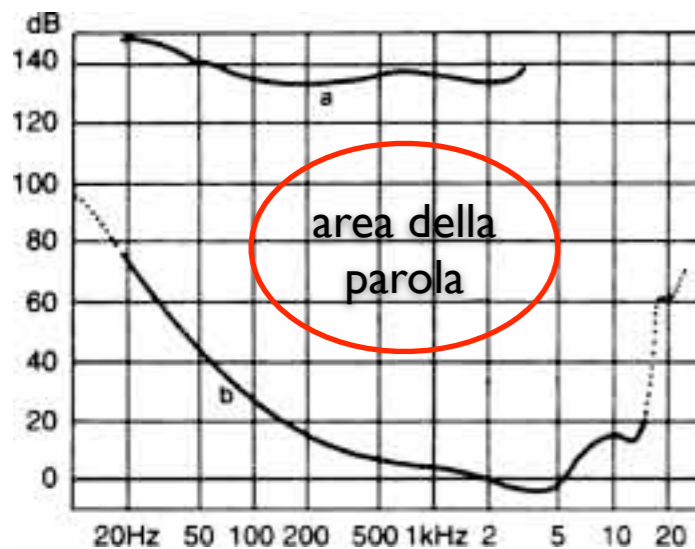
Le frequenze inferiori ai 16-20 Hz costituiscono gli infrasuoni; quelle superiori ai 16.000-20.000 Hz gli ultrasuoni. La sensibilità uditiva alle alte frequenze cala progressivamente col progredire dell'età e questo fenomeno, affatto fisiologico, viene detto presbiacusia (= audizione senile).

Se l'intensità dei toni viene aumentata progressivamente, si raggiunge un livello al quale la sensazione uditiva si trasforma, in corrispondenza dell'orecchio esterno, in una specie di sensazione tattile. Tale livello si soglia di sensazione fisica. A livelli più alti la sensazione fisica si trasforma in fastidio (soglia del fastidio) e, finalmente, in dolore (soglia del dolore).

L'ambito di esistenza del suono, compreso fra gli infrasuoni, gli ultrasuoni, la soglia di udibilità e quella del dolore viene chiamato *campo di udibilità*.



La sorgente sonora, azionata da una forza esterna, riceve e, sotto forma di vibrazioni, trasmette una certa quantità di energia che si propaga con onde di pressione *isocrone* attraverso l'aria, fino a raggiungere l'organo uditivo, dove con una serie di trasformazioni molto complesse si converte nell'impulso nervoso che eccita il cervello: a questo punto è nato il suono.



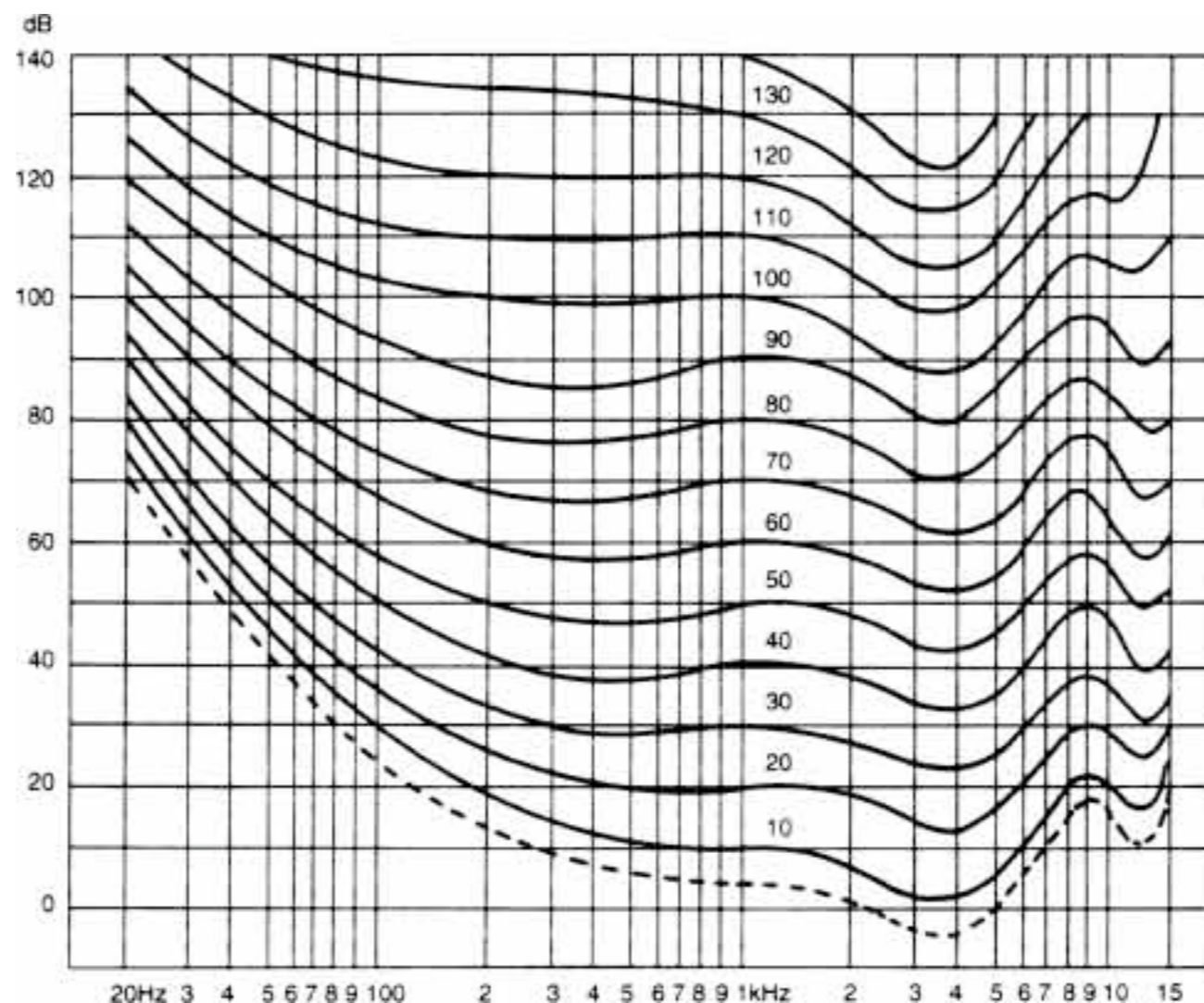
L'andamento di questa curva ci dice che la pressione sonora è massima per le basse frequenze, è minima per quelle tra 500 e 5000 Hz e cresce considerevolmente per le frequenze molto alte.

**La sensibilità dell'orecchio non è lineare, cioè non è uniforme per tutte le frequenze udibili.**

Nella parte centrale dell'area di udibilità, che è quella più resistente alle malattie e all'usura, si trova l'area della parola, la cui collocazione dimostra la coerenza dell'adattamento naturale nel salvaguardare al massimo la più preziosa via di comunicazione.

La non linearità dell'orecchio rispetto alla frequenza ha richiesto ricerche più approfondite, che portarono Fletcher e Munson, eminenti studiosi di psicoacustica, a definire, in un diagramma, una serie di curve che esprimono, per tutte le frequenze udibili, il rapporto tra la pressione acustica e l'uguaglianza della sensazione, per vari gradi d'intensità, dalla soglia di udibilità a quella del dolore.

Questo è il diagramma delle curve isofone:



Consideriamo convenzionalmente con valore “zero dB” la pressione necessaria per raggiungere la soglia di udibilità per la frequenza di 1000 Hz.

Dal grafico è possibile quindi osservare quale deve essere la variazione della pressione stessa per ottenere il medesimo risultato per tutte le altre frequenze.

Ad esempio: per la frequenza 30 Hz, che è di poco più alta rispetto alla più bassa frequenza udibile (16 Hz), possiamo accertare che la pressione efficace per raggiungere la soglia di udibilità deve essere di oltre 60 dB oltre il livello “zero”; sui 100 Hz bastano invece 40 dB e ancor meno ne occorrono man mano che ci si avvicina ai 1000 Hz.

Le altre curve del diagramma, che in corrispondenza dei 1000 Hz sono contrassegnate con i numeri 10, 20, 30 etc. esprimono la stessa esigenza uditiva, ma per intensità sonore sempre più alte fino a raggiungere la soglia del dolore, alla quale corrisponde un incremento dell'intensità non inferiore a 120-130 dB.

# Il livello di sensazione sonora o di intensità soggettiva:

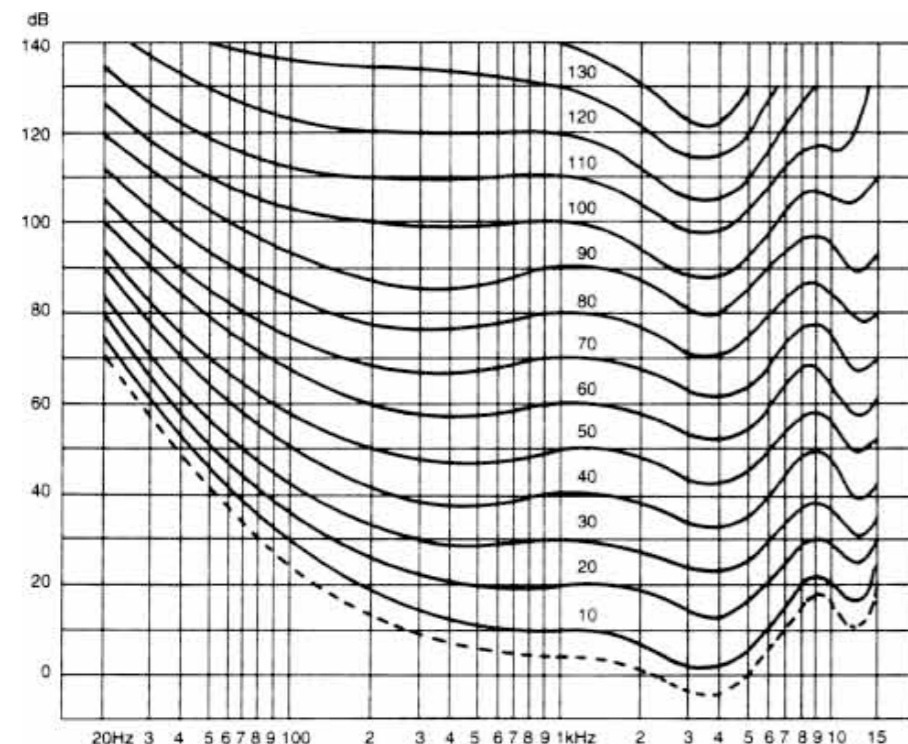
Abbiamo visto come il comportamento psicoacustico dell'orecchio cambia al variare della frequenza.

Altrettanto si può dire per quanto riguarda l'intensità.

Se, invece di limitarci ad osservare il comportamento dell'orecchio ai valori più bassi di questa grandezza, estendiamo lo studio a tutto il campo di udibilità prendendo come riferimento i 1000 Hz, otteniamo un diagramma come quello della figura nella pagina.

Infatti sottoponendo i soggetti in esame all'ascolto degli stessi toni della scala delle frequenze usata per la definizione della soglia di udibilità, ma, questa volta, ad intensità aumentata ogni volta, per es., di 5 o di 10 dB e chiedendo loro di indicare i livelli che vengono percepiti con intensità uguale a quella di riferimento (1000 Hz), le curve di isofonia o isofoniche (uguale sonorità) che si ottengono sono quelle del diagramma.

## La pressione acustica è una grandezza fisica, l'intensità e un fatto soggettivo.



*Curve di isofonia.* Rappresentano l'intensità necessaria alle diverse frequenze per ottenere una sensazione sonora in dB (scala a sinistra) corrispondente a quella che si ottiene dalla frequenza di riferimento (1000 Hz). La scala interna dà il livello della sensazione sonora in phon.



# Una nuova unità di misura: phon.

Poiché il livello di sensazione sonora (o livello di intensità soggettiva) non coincide necessariamente, come è evidente, con il livello di intensità oggettiva e il dB (che serve a misurare questo rispetto ad un valore costante di riferimento) non può servire per esprimere i valori della sensazione sonora, si rese necessario adottare per quest'ultima un'unità di misura specifica: il *phon*.

**Definizione:** la sensazione sonora, indotta da un tono di 1000 Hz avente un livello di intensità pari a un certo numero di dB, ha un livello in phon espresso dallo stesso numero.

In base a tale assunto, per es., mentre a 1000 Hz, per dare i phon di intensità soggettiva occorrono esattamente 50 dB di intensità oggettiva, a 100 Hz, per ottenere lo stesso numero di phon (= la stessa sensazione di intensità) occorrerà una decina di dB in più e, a 4000 Hz, una decina in meno.

Il comportamento uditivo descritto spiega perché la stessa registrazione musicale, ascoltata dalla stessa apparecchiatura ad alta fedeltà, a basso volume appaia meno fedele che ad alto: poiché, a bassa intensità, l'orecchio è meno sensibile alle basse ed alte frequenze, queste componenti sonore, che pure sono presenti nella riproduzione oggettiva, non vengono percepite e la loro assenza o riduzione danno luogo ad un'audizione insoddisfacente.

Per questo motivo le apparecchiature ad alta fedeltà sono dotate del comando loudness che, inserito, introduce un circuito di compensazione avente il compito di esaltare in modo opportuno le frequenze estreme e migliorare la fedeltà dell'ascolto a basso volume.

# Progressioni

Se diciamo che tra due livelli di pressione, o di energia, vi è un rapporto di 60 dB, non vuol dire che in termini aritmetici quel rapporto sia di 1:60 ma bensì di 1:1.000.000 poiché la progressione dei decibel non è aritmetica, ma logaritmica.

Schematizziamo qui di seguito i più comuni tipi di progressioni matematiche:

aritmetica unitaria	1	2	3	4	5	6	etc
geometrica, ragione 2	2	4	8	16	32	64	etc
logaritmica, base 10	10	100	1000	10000	100000	1000000	etc
Decibel e phon	10	20	30	40	50	60	etc

# La variazione dell'intensità

Altro campo di osservazione è quello che ha come oggetto la capacità di apprezzamento delle variazioni di valore delle caratteristiche fisiche dei suoni.

Le valutazioni della minima variazione di intensità percepibile dal sistema uditivo (soglia differenziale di intensità) danno luogo a risposte un po' variabili a seconda dei metodi di rilevamento usati. Sostanzialmente, però, esse danno come risultato valori oscillanti fra 0,5 e 1 dB, almeno nell'intervallo fra 125 e 6000 Hz, mentre, quando ci si avvicina ai limiti delle frequenze di udibilità, la capacità di discriminare le piccole variazioni di intensità diminuisce sensibilmente.

I livelli di intensità ai quali le variazioni avvengono sono alquanto indifferenti nel determinare il comportamento del sistema uditivo che, sostanzialmente, mantiene la stessa capacità di discriminazione sia ai bassi che agli alti livelli. Piuttosto è fondamentale, nella percezione di una variazione di intensità ai limiti della soglia, la velocità, alla quale essa avviene. I dati ora esposti si riferiscono a variazioni istantanee mentre variazioni di valore doppio ma lente ingannano facilmente anche orecchi esercitati.



# La misura del livello di sensazione sonora o di intensità soggettiva

L'espressione del livello di sensazione sonora in fon permette di correlare abbastanza bene il mondo psicoacustico con la realtà oggettiva.

Dire cioè che un tono della frequenza di 100 Hz e dell'intensità oggettiva di 60 dB dà una sensazione sonora di 50 fon, equivale a dire, in base a quanto precedentemente esposto, che quel suono appare all'udito di intensità pari a quella di un tono di 50 fon a 1.000 Hz.

Se però ci si aspetta che un tono di 100 fon a 1000 Hz (100 dB) dia un livello di sensazione sonora doppia di quella data dal tono di 50 fon a 1000 Hz (50 dB) l'attesa rimane delusa perché la sensazione di intensità ottenuta è molto maggiore.

L'effetto di raddoppio di sensazione sonora, infatti, è ottenuto già a soli 60 fon (60 dB). Il rapporto fra l'intensità dello stimolo e la risposta psicoacustica lungo la scala delle grandezze oggettive, cioè, non è costante.

# Una nuova unità di misura: son.

Di qui la necessità di introdurre un'altra grandezza soggettiva, adatta alla quantificazione della sensazione sonora o intensità soggettiva, il son, correlata, tuttavia, alle grandezze oggettive con un assunto convenzionale: un tono di 1000 Hz e di 40 dB induce una sensazione sonora di 1 son.

Aumentando l'intensità oggettiva del tono fino a ottenere il raddoppio dell'intensità soggettiva (cosa che avviene a circa 50 dB), si dirà che quest'ultimo livello è di 2 son. Procedendo sperimentalmente per la medesima strada è stato possibile identificare la relazione reale esistente tra l'intensità dello stimolo e la sensazione indotta e istituire una scala di multipli e sottomultipli, che corrisponde molto bene ad un'altra scala teorica, derivata da una certa equazione, per mezzo della quale si è cercato di definire la legge che regola i rapporti tra intensità oggettiva e intensità soggettiva.

Ora, per convenzione, si è stabilito che, nell'intervallo dei livelli compresi fra 20 e 120 fon (ad esclusione, quindi, dei valori estremi del campo uditivo) il raddoppio della sensazione sonora in son corrisponde esattamente all'aumento di 10 fon nel livello di sensazione sonora, qualunque sia la frequenza del tono di stimolazione. Se ci si rifà alla definizione di decibel, che è una unità di misura logaritmica, si può osservare come il raddoppio dell'intensità o oggettiva si verifichi ogni tre dB.

Considerando ora che il raddoppio della sensazione sonora si avverte ogni 10 fon, si possono comprendere le *ragioni della grande capacità di discriminazione dell'orecchio umano nel dominio delle intensità.*

# La sensazione dell'altezza e la sua misura

Le misure musicali usuali degli intervalli di altezza sono, come è ben noto, l'ottava e il semitono temperato. La prima è identificata dal raddoppio della frequenza del tono di riferimento mentre il secondo, che divide l'ottava in 12 parti uguali, sta col tono di riferimento nel rapporto di 1,05946 (radice 12esima di 2).

Altra unità di misura usata nella misurazione degli intervalli musicali è il cent, pari ad un centesimo di semitono temperato e a 1/1200 di ottava.

Altro modo ancora di rappresentare gli intervalli tonali è quello di indicarli come variazioni percentuali.

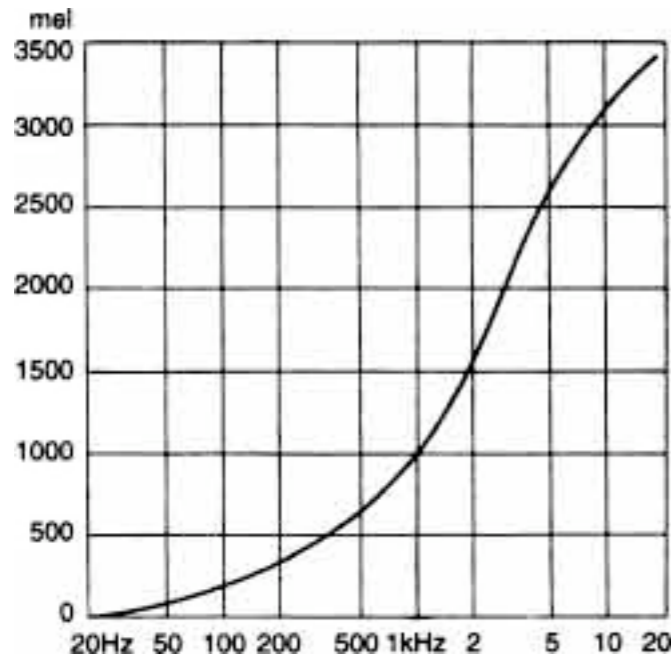
Un tono di 125 Hz, es., è più alto del 25% rispetto ad un altro di 100 Hz. Tali unità di misura, però, si riferiscono alla frequenza reale dei suoni. Poiché la sensazione psicoacustica di altezza, che viene indotta (sensazione di altezza o altezza soggettiva) non è legata alla frequenza con un rapporto costante, è stato necessario istituire anche per essa un'unità di misura: il mel.

Per convenzione un tono di 1000 Hz a 40 dB induce una sensazione di altezza pari a 1000 mel (figura nella pagina). Una sensazione di altezza doppia di quella di riferimento (ottava superiore) corrisponde a 2000 mel; una sensazione di altezza pari alla metà (ottava inferiore), 500 mel.

La verifica sperimentale, però, dimostra che l'effetto di ottava superiore, anziché da 2000 Hz è indotto da circa 3100 Hz mentre quello di ottava inferiore è indotto da una frequenza di circa 400 Hz.

Procedendo sperimentalmente e sempre al livello convenzionale di 40 fon (40 dB a 1000 Hz), si può così constatare come al cambiare dell'intensità del tono di stimolazione, mantenuto a frequenza costante, cambia anche la sensazione di altezza, per cui è possibile tracciare sperimentalmente delle curve di isoaltezza (identica sensazione di altezza) che dicono come sia necessario variare in più o in meno l'altezza reale del tono di stimolazione perché l'udito conservi la sensazione di una nota costante variandone l'intensità.





*Relazione fra sensazione di altezza e frequenza:* Il sistema uditivo, come appare dalla figura, comprime la gamma delle frequenze che è in grado di percepire. L'ambito di frequenza fra 20 e 20.000 Hz è compresso in un campo di soli 3500 mel di sensazione di altezza.

Allargando l'indagine a tutto il campo uditivo si scopre che il comportamento psicoacustico del sistema uditivo per quanto riguarda la sensazione di altezza al variare dell'intensità è molto complesso. Soltanto le frequenze della regione tonale compresa fra 1000 e 3000 Hz sono *relativamente insensibili alle variazioni di intensità*.

I toni di frequenza inferiore tendono a indurre una sensazione di altezza più bassa quanto più alta è la loro intensità, con effetto tanto più accentuato quanto più bassi essi sono; quelli di frequenza superiore tendono invece a indurre sensazioni di altezza più alte quanto l'intensità è più alta esse pure con effetto accentuato quanto più alte sono.

Al crescere dell'intensità, cioè, le frequenze al disopra e al disotto di una certa fascia centrale (1000-3000 Hz) tendono ad esasperare nella sensazione indotta, le loro caratteristiche di acutezza o di profondità.

# La variazione dell'altezza

La sensibilità del sistema uditivo alle variazioni di frequenza è definita dalla *soglia differenziale di frequenza*.

Anche in questo caso occorre tener conto sia dell'altezza sia dell'intensità dei toni messi a confronto.

Mentre alle bassissime frequenze la capacità discriminatoria dell'orecchio è decisamente cattiva (all'altezza del do di 32,7 Hz l'incertezza supera abbondantemente il semitono) essa migliora sensibilmente a mano a mano che ci si avvicina al cosiddetto campo di corretta udibilità (800-3000 Hz) nel quale si mantiene costante per poi tornare a peggiorare leggermente verso l'acuto.

La soglia differenziale di frequenza è indipendente dalla loro intensità per valori superiori a 30 dB al di sopra della soglia di udibilità mentre al disotto di questo livello la capacità di discriminazione dell'orecchio diminuisce sensibilmente.

Come nel caso dell'intensità, la valutazione delle variazioni di frequenza è fortemente influenzata dalla velocità di queste e i valori dati si riferiscono a valutazioni istantanee mentre variazioni lente possono ingannare anche orecchie esercitate.

Si deve qui sottolineare che i risultati esposti sono quelli ottenuti in condizioni sperimentali (toni puri e assenza di riverberazione).

# La somma di più suoni e della loro intensità

Nella realtà quotidiana i toni puri usati per semplicità nelle sperimentazioni descritte, sono praticamente assenti; è quindi del massimo interesse indagare sul comportamento verso i *suoni complessi*, che sono invece quelli realmente esistenti in natura. L'aumento dei fattori in gioco, però, moltiplica in misura enorme le difficoltà di indagine, motivo per cui le acquisizioni sicure in questo campo sono ancora poche.

Una di queste è l'andamento del livello di intensità soggettiva al sommarsi di più toni puri.



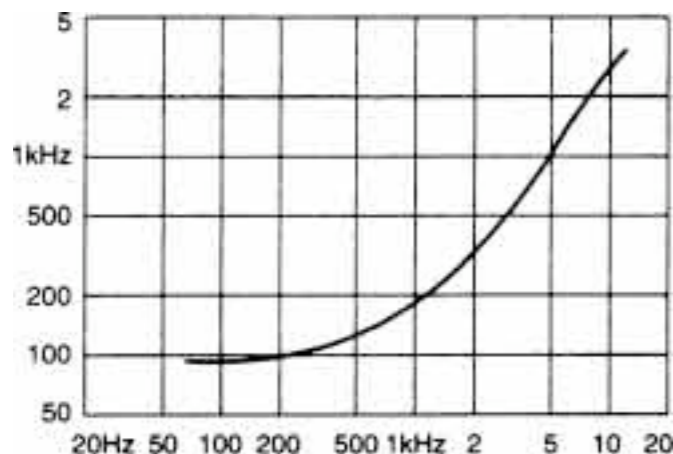
Come si è visto precedentemente, il livello di intensità sonora non dipende soltanto dall'intensità dei toni di stimolazione, ma anche dalla loro frequenza.

Questa interdipendenza psicoacustica fra i due tipi di grandezze persiste ovviamente anche nel caso in cui i toni in gioco siano più di uno.

Nel caso più semplice, costituito da due toni di frequenza diversa ma ognuno dell'intensità oggettiva necessaria per indurre la stessa sensazione sonora (misurata in son) la somma delle intensità dei due toni dà risultati psicoacustici diversi a seconda dell'ampiezza dell'intervallo di frequenza che li separa. Qui occorre introdurre la nozione di banda critica, che è il campo di frequenze in relazione al quale è possibile valutare la somma dell'intensità soggettiva dei due toni.

Le bande critiche che dividono l'ambito delle frequenze udibili sono state stabilite sperimentalmente in numero di 24 e hanno varia larghezza. Ora se l'intervallo fra i due toni è superiore ad una determinata banda critica la sensazione sonora indotta dalla stimolazione contemporanea da parte di essi è doppia; pari, cioè, alla somma delle sensazioni che verrebbero indotte separatamente da ciascuno. Se invece l'intervallo di frequenza scende al disotto di quella determinata banda critica, l'intensità della sensazione sonora risulta inferiore alla somma.

La larghezza della banda critica cambia col cambiare della regione di altezza. Un modo comodo per rappresentarla è quello di indicare sulle ordinate di un piano cartesiano la frequenza centrale di essa. Si vede così, per es., che, quando la frequenza centrale della banda critica si aggira sui 200 Hz, la sua larghezza è di circa 100 Hz mentre, quando la frequenza centrale è sui 5000 Hz la larghezza giunge a 1000 Hz.



Relazione tra larghezza della banda critica e sua frequenza centrale. La larghezza della banda critica cresce al crescere della frequenza. (In ascisse è indicata la frequenza centrale, in ordinate la lunghezza della banda critica.)

# Effetto di mascheramento

L'effetto ben noto, per il quale due o più suoni prodotti assieme si "disturbano" reciprocamente, si chiama effetto di mascheramento o, semplicemente, mascheramento.

Il caso più evidente è quello in cui suoni forti coprono suoni deboli, ma anche l'ascolto di un suono forte può essere disturbato dalla presenza di uno meno intenso. In ogni caso il suono disturbatore viene chiamato suono *mascherante* e quello disturbato, suono *mascherato*.

Dal punto di vista psicoacustico l'effetto di mascheramento consiste nell'*innalzamento della soglia di udibilità* (diminuzione di sensibilità) a scapito del suono mascherato e si misura dal numero di dB del quale si deve aumentare la sua intensità perché esso - sempre in presenza del suono mascherante - torni ad essere udibile.

Se, per esempio, un suono è coperto da un altro più forte ed è necessario aumentarne l'intensità di 10 dB perché torni ad essere udibile, si dice che esso subisce un mascheramento di 10 dB.

Il fenomeno tende a manifestarsi con regolarità alle diverse intensità e, scelta a piacere una coppia di suoni, possiamo constatare che, aumentata l'intensità del suono mascherante di un certo numero di dB, il numero di dB del quale è necessario aumentare l'intensità del suono mascherato perché esso torni ad essere udibile è uguale o, comunque, poco diverso.

È importante anche la relazione reciproca di altezza tra frequenze superiori ed inferiori: i toni di frequenza inferiore mascherano più facilmente i toni di frequenza superiore di quanto non accada nel rapporto inverso.

L'effetto di mascheramento, ad ogni modo, diminuisce con l'allargarsi dell'intervallo tra la frequenza mascherante e quella mascherata, mentre è più sensibile se l'intervallo è contenuto all'interno di una delle bande critiche. Il massimo dell'effetto si verifica quando i due toni hanno la stessa frequenza.

Nel caso, poi, in cui il mascheramento venga effettuato da un *rumore*, si osserva che l'effetto mascherante è dato prevalentemente da una ristretta banda di questo, banda la cui ampiezza sta in un determinato rapporto con la banda critica di pertinenza.

Riassumendo possiamo dire che, in presenza di un suono mascherante, le soglie di udibilità di un suono mascherato da una diventano infinite e dipendono da più fattori: altezza ed intensità dei due suoni e relazioni reciproche di altezza e intensità fra i due. Nella realtà pratica, poiché la composizione armonica dei suoni naturali è complessa, i fattori in gioco diventano moltissimi; si pensi al caso di due persone dialoganti in un ambiente affollato o ad uno strumento nell'orchestra.

# Generalità sulle vibrazioni delle sorgenti sonore

Suono o rumore?!



Qualsiasi corpo idoneo a vibrare con frequenza udibile può essere considerato una sorgente sonora.

La distinzione tra *suono* e *rumore* non muta i termini della questione. In realtà una vera e propria distinzione tra suono e rumore non esiste nemmeno dal punto di vista dell'apprezzabilità psicologica.

La vecchia distinzione assegnava la produzione del suono alle vibrazioni cosiddette *regolari* e quella del rumore alle vibrazioni *irregolari* o *disarmoniche*.  
Ma questa distinzione non ha validità assoluta.

Anziché cercare di definire un confine che non può esistere, è più utile vedere la questione alle sue opposte estremità, dove da un lato troviamo il

*suono puro*

(generato dalle vibrazioni sinusoidali prive di distorsioni)

e dall'altro il

*rumore puro (o suono bianco)*

generato dalla simultaneità di tutte le vibrazioni sinusoidali del campo di udibilità, dai 16 ai 16.000 Hz, nessuna esclusa.

es.: suono abbastanza puro - diapason; rumore puro - vapore da caldaia sotto pressione



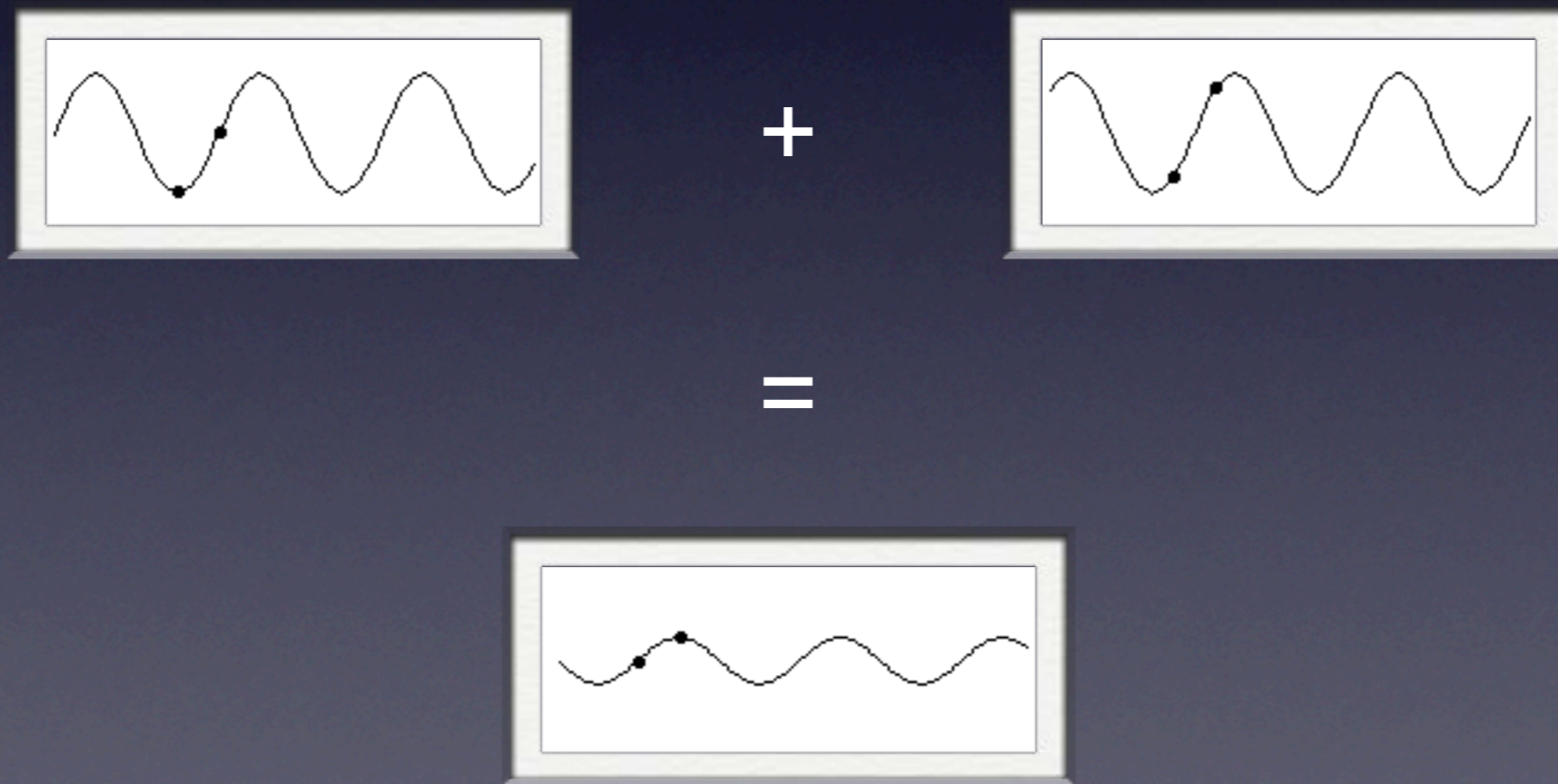
NB: la definizione “suono bianco” è stata derivata dall’ottica.  
Nell’ottica la “luce bianca” appunto è la somma di tutte le radiazioni visibili  
(cioè di tutti i colori dell’iride).  
Così nell’acustica il “suono bianco” è la somma di tutte le vibrazioni udibili.

Il suono, dal più disordinato dei rumori alla sua maggiore qualificazione musicale, non è che l’equivalente uditivo di un movimento vibratorio di particelle materiali, che dalla sorgente si propaga, secondo determinate leggi, all’ambiente circostante, sino a raggiungere l’organo uditivo.  
E’ dunque dalla sorgente sonora che dovremo seguire il cammino del suono.

E’ ora necessario dal punto di vista fisico, distinguere le varie sorgenti sonore in gruppi omogenei, secondo lo schema seguente:

1. corde
2. canne sonore
3. strumenti a percussione
4. la voce umana

# Le vibrazioni delle corde: onde stazionarie



# Onde Stazionarie

Un' onda stazionaria è una perturbazione periodica di un mezzo materiale, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio. In pratica non c'è propagazione nello spazio.

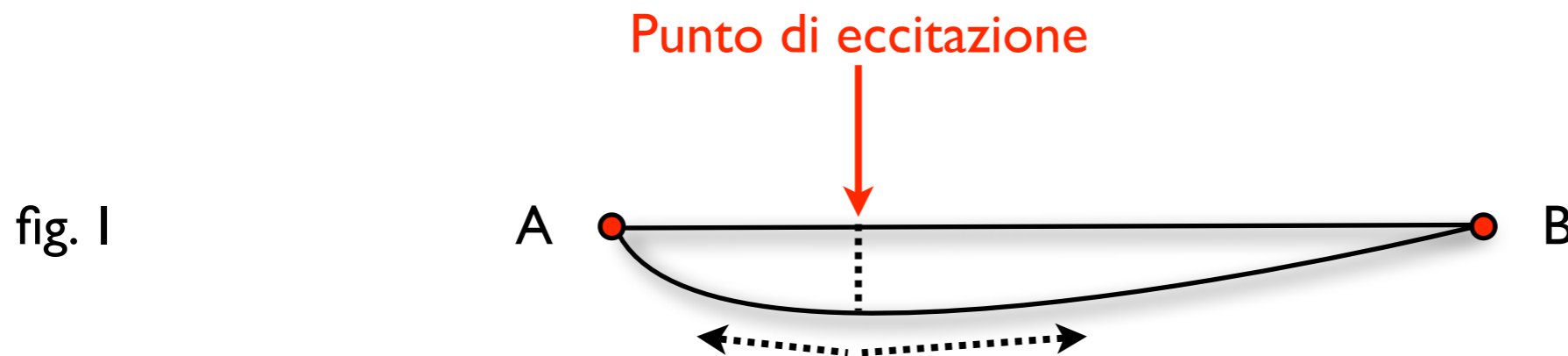
Le onde stazionarie sono il risultato dell'interferenza tra onde progressive e regressive sinusoidali, aventi la stessa frequenza.

Una caratteristica delle onde stazionarie è che ad esse non è associato alcun trasporto di energia.



# Le onde stazionarie nell'acustica

Se esaminiamo col rallentatore il comportamento di una corda elastica sollecitata da un movimento vibratorio, possiamo vedere che dal punto in cui ha agito la forza esterna (il martelletto del pianoforte, l'azione dell'archetto sulla corda del violino, il pizzico sulla corda dell'arpa, etc.), la vibrazione si propaga lungo la corda in due direzioni opposte.



Poichè la distanza che le due onde devono percorrere è solitamente diversa, avviene che quella che procede verso A raggiungerà per prima il punto terminale, dove si *rifletterà* invertendo sia il percorso sia la fase, con la cresta cioè rivolta in senso contrario a quello di partenza: nel frattempo l'altra onda avrà percorso un po' del suo cammino.

E' chiaro quindi che ad un certo istante si avrà la situazione riportata in fig. 2, alla quale seguirà quella di fig. 3 e così via, con ripetute riflessioni e ripetuti incontri fra le due onde, ma con ampiezza di movimento sempre decrescente.



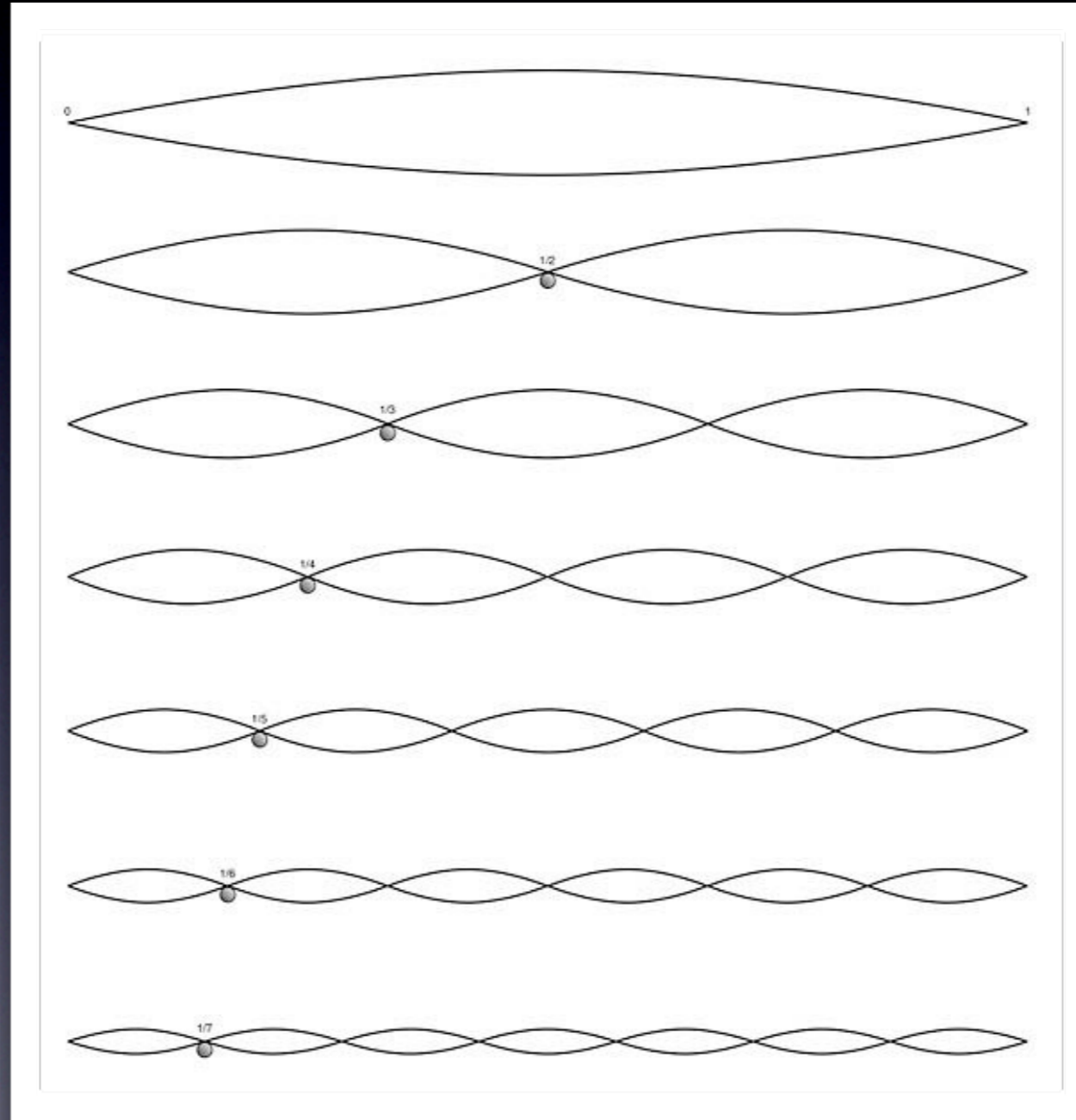
Questa propagazione di onde, avanti e indietro tra i due punti ai quali la corda è fissata, assume il nome di “stazionaria” appunto per la localizzazione del movimento stesso. Le onde sono anche di tipo smorzato in quanto la loro ampiezza, dalla quale dipende l'intensità del suono, decresce periodo per periodo, sino all'esaurimento dell'energia ricevuta al momento dell'eccitazione.

Il percorso completo di andata e ritorno lungo la corda equivale a una oscillazione di andata e ritorno del pendolo, vale a dire a un periodo.

Il fenomeno delle onde stazionarie è però un po' più complesso. Ne esamineremo ora gli aspetti essenziali.



# Vibrazioni armoniche

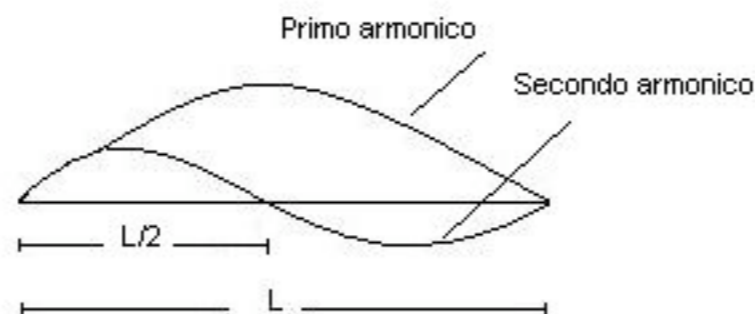


armonici

Un suono prodotto in natura da un corpo vibrante non è MAI puro, ma è costituito da un *amalgama* in cui al suono fondamentale se ne aggiungono altri più acuti e meno intensi: questi sono gli **armonici**, che hanno una importanza fondamentale nella determinazione del *timbro* di uno strumento e nella determinazione degli *intervalli musicali*.

I suoni armonici corrispondono ai **possibili modi naturali di vibrazione di un corpo sonoro** (secondo un *moto armonico*).

Ad esempio, se una corda di lunghezza  $L$  emette un MI (primo armonico), la stessa corda vibra con meno intensità anche a frequenza doppia (pari alla lunghezza  $L/2$ , secondo armonico), emettendo un MI all'ottava superiore, e così via, suddividendo la lunghezza d'onda in multipli interi  $L/3$ ,  $L/4$ , eccetera.. Lo stesso principio vale per le colonne d'aria che vibrano all'interno di tubi (come negli ottoni).



# Vibrazioni armoniche

Quando due onde muovono una verso l'altra s'incontrano, sommando algebricamente le rispettive energie.

Per questi incontri e per le riflessioni del moto vibratorio nei punti estremi della sorgente sonora (es. i terminali di una corda), il moto stesso è influenzato da **nuovi impulsi** che danno luogo a *vibrazioni la cui frequenza è un multiplo di quella **fondamentale***, considerata come generatrice del fenomeno e, per questo, **prima armonica**.

Le vibrazioni, che via via insorgono nel modo suddetto, prendono il nome di **seconda, terza (etc) armonica**, le cui frequenze sono, rispettivamente, il doppio, il triplo (etc) di quella fondamentale.

I periodi (ovvero l'inverso della freq.) saranno la  $1/2$ ,  $1/3$  di quello fondamentale, e questo è perchè queste vibrazioni più corte occupano frazioni della lunghezza stessa della corda.

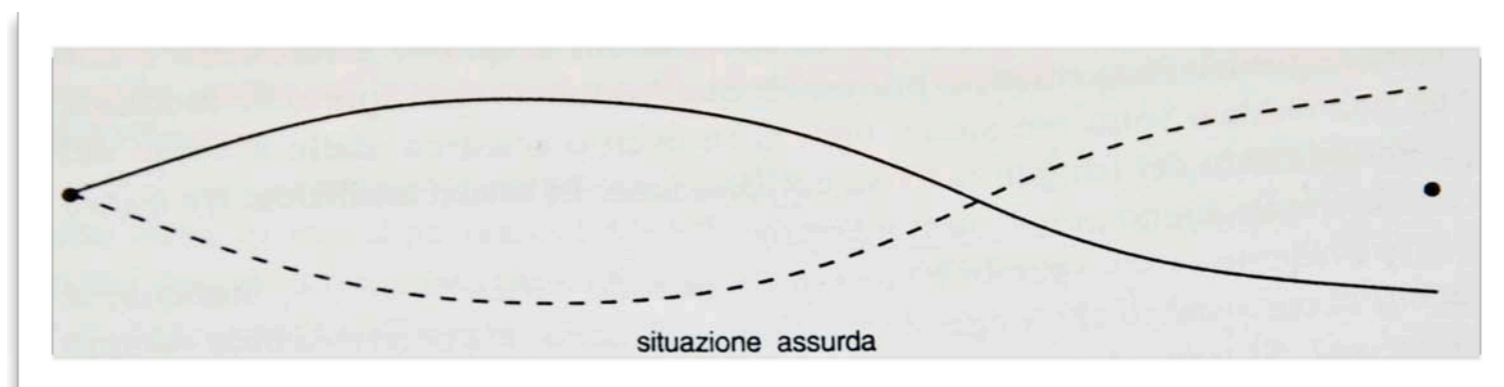
**La frequenza delle vibrazioni armoniche è sempre un multiplo della frequenza fondamentale**

# Perchè non possono esserci vibrazioni armoniche di qualsiasi lunghezza e frequenza?

Per capirlo basta pensare al caso della corda vibrante: i punti terminali della corda (quelli dove è rigidamente vincolata) non possono che essere sede di nodi.

In qualsiasi movimento vibratorio vi sono infatti dei **punti nodali** (dove il movimento stesso è nullo) e delle **zone ventrali** (dove l'ampiezza al centro della zona è massima).

E' quindi chiaro che nel movimento vibratorio di una corda non potranno che darsi frazionamenti interi del movimento stesso e mai situazioni come quella indicata nella figura seguente:



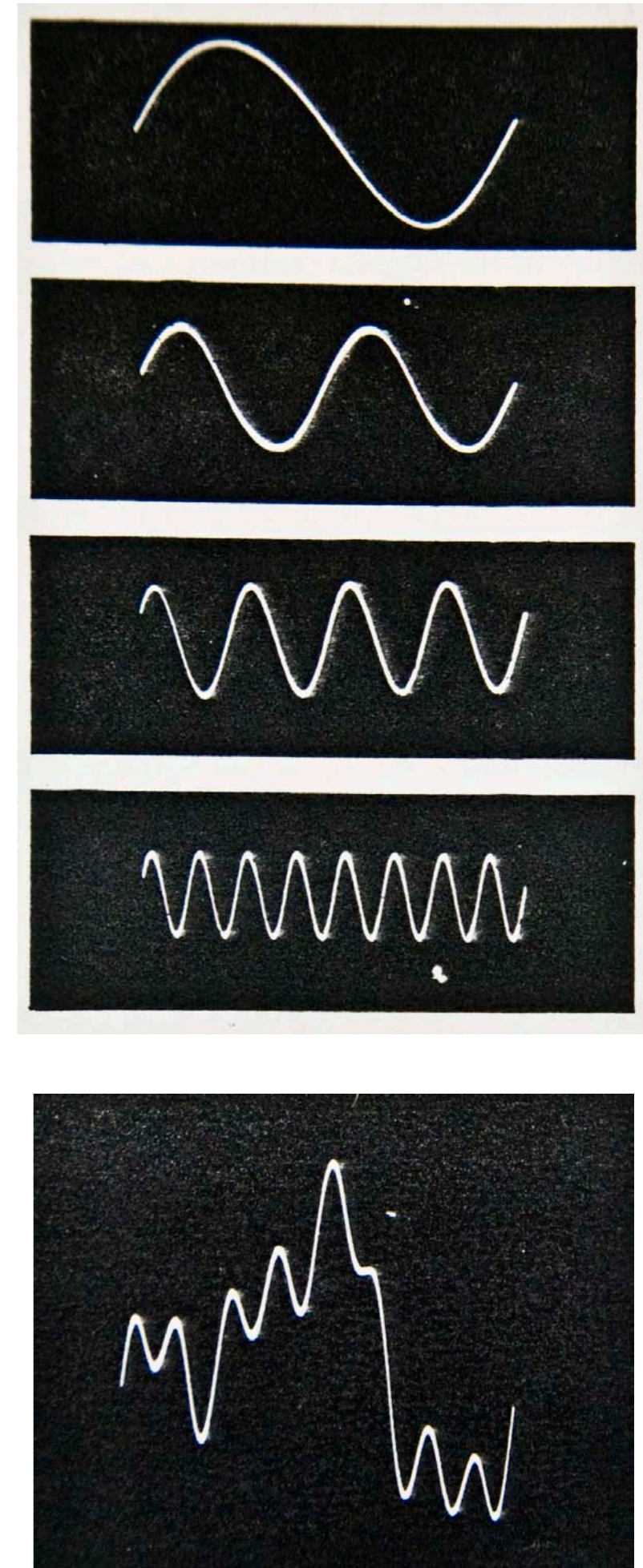


# Armonici e Vibrazioni Complesse

Nella figura sotto è riprodotto l'*oscillogramma* che risulta dall'azione contemporanea delle quattro vibrazioni (nelle figure sopra) che rappresentano rispettivamente la *prima*, la *seconda*, la *quarta* e l'*ottava* armonica.

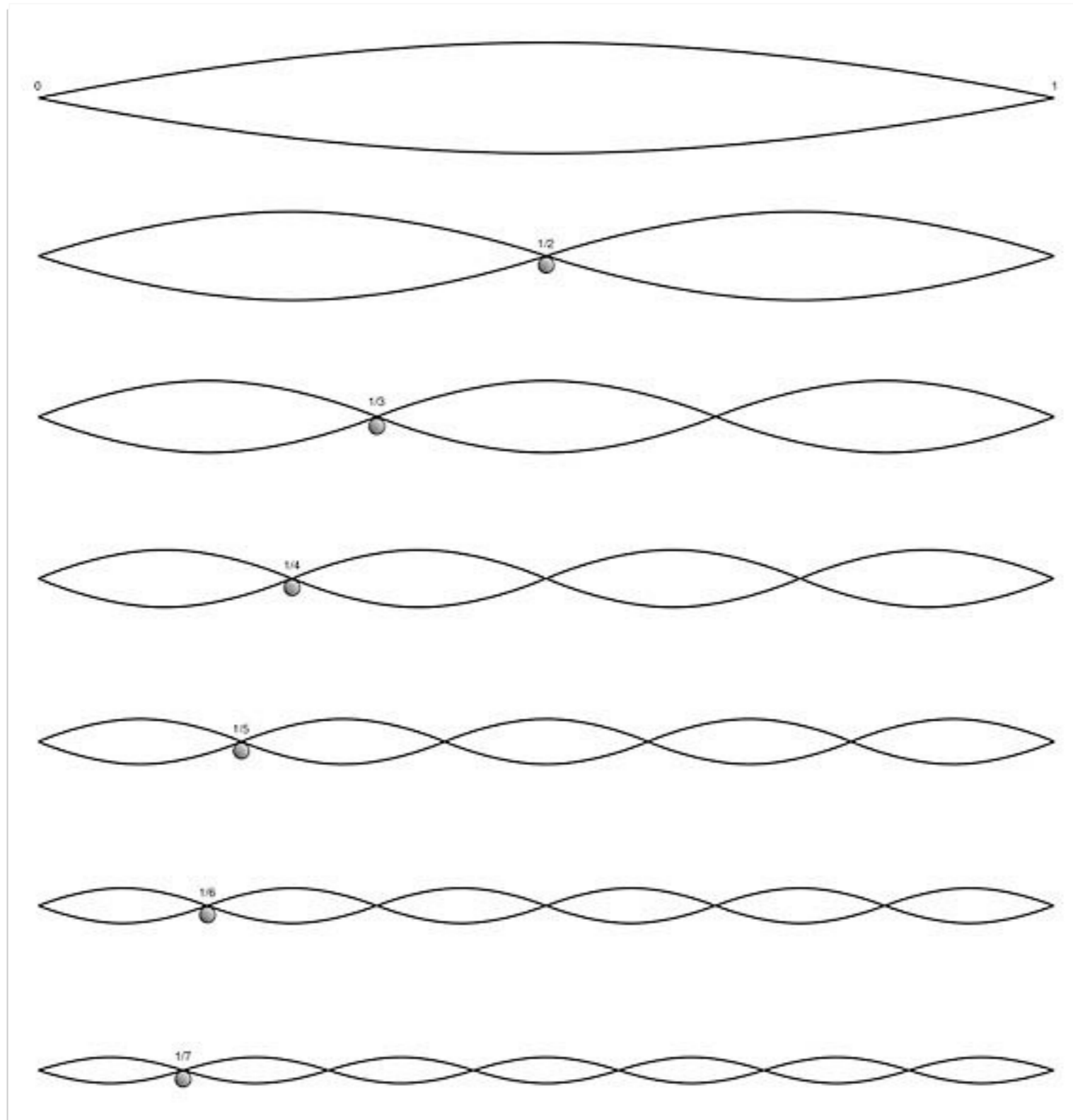
L'immagine sotto è la fotografia fedele di questo movimento vibratorio, che per la presenza di più componenti viene detto "**vibrazione complessa**".

Qualsiasi sorgente sonora che sia sede di vibrazioni come quelle dianzi esemplificate si comporterebbe in modo analogo. Se si considera che nella pratica musicale, salvo casi riguardanti gli oscillatori elettronici, tutti i suoni usati sono prodotti da vibrazioni più o meno complesse, ben si vede l'importanza che deve essere attribuita a queste situazioni acustiche, dalle quali dipende, fra l'altro, la formazione del timbro.





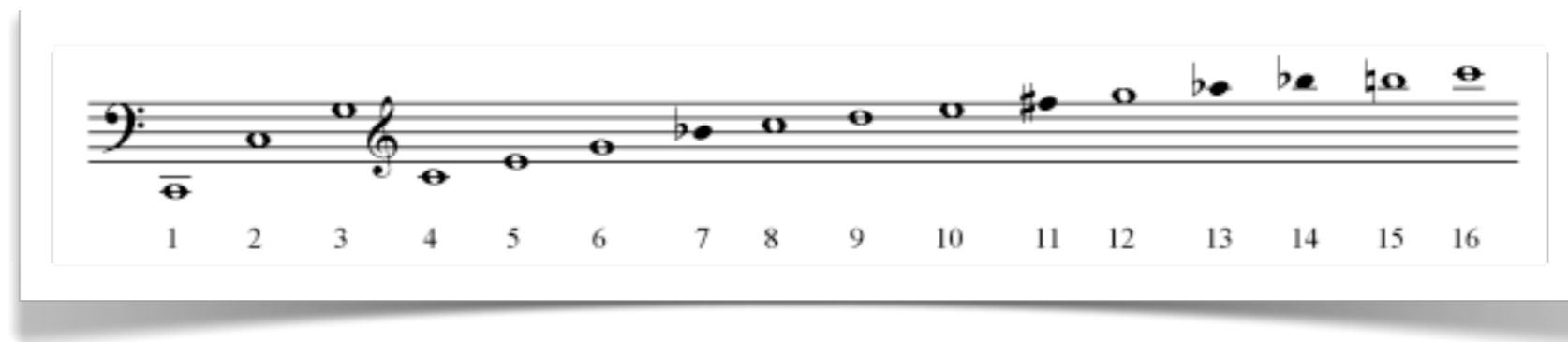
# Armonici (overtones, o ipertoni)



# Caso di un pianoforte

Se su un pianoforte premo un Do3 (fissando a Do5 il Do centrale) verranno riprodotte frequenze multiple che sono proprie di altre note. Dato che la frequenza fondamentale del Do3 è di circa 65,4 Hz, si produrranno suoni con una frequenza multipla, ovvero di 130,8 Hz, 196,0 Hz, 261,6 Hz e così via le quali corrispondono rispettivamente alle note Do4, Sol4, Do5.

Nella figura si possono notare tutti gli armonici del Do3. Le note piene stanno a significare che la frequenza non è esattamente quella della nota descritta.



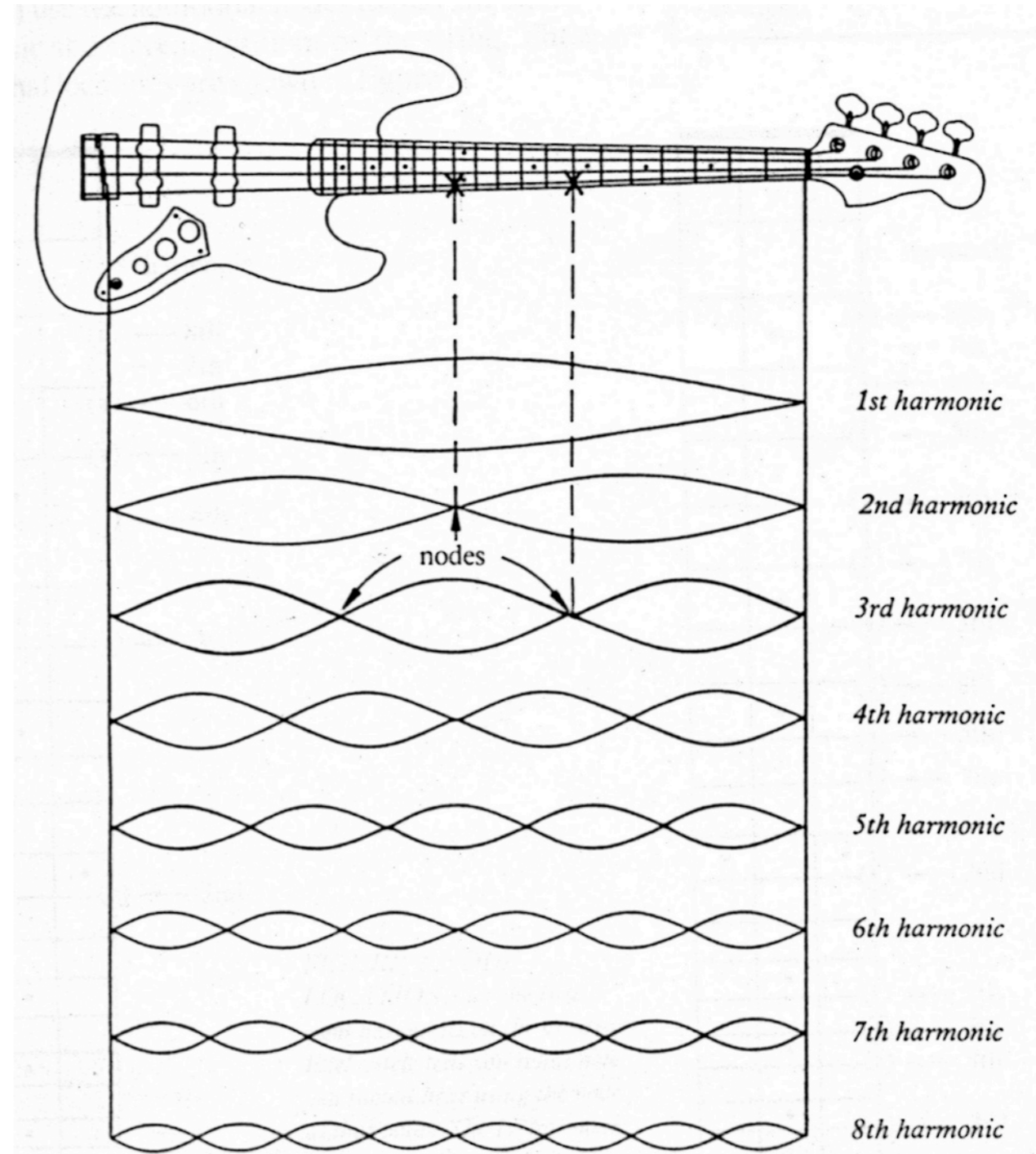
# Caso di uno strumento a corde

Cosa sono questi armonici e perché si riescono a formare soltanto in alcune determinate parti del manico?

Ogni corpo che vibra o che si muove produce compressioni e rarefazioni nell'aria nelle immediate vicinanze.

Queste compressioni e rarefazioni si propagano nell'aria come onde sonore, in modo analogo a come si propagano le onde prodotte da un sasso che cade in uno specchio d'acqua. Le onde sonore sono direttamente associate alle vibrazioni del corpo e ne rispecchiano le caratteristiche. Nel caso di uno strumento a corda le vibrazioni sono molto facili da studiare, tralasciando per ora tutte le complicazioni legate ad eventuali casse o tavole risonanti accoppiate alle corde stesse.

La corda vibrante produce delle vibrazioni a seconda dei suoi modi di oscillazione. Tutte le onde prodotte sono di tipo stazionario (dato che la corda è fissata agli estremi). Studiamo dunque i modi di oscillazione della corda:



La **frequenza** della corda vibrante dipende dalla sua **lunghezza**, **massa** e **tensione**: i matematici ci insegnano che ogni onda del tipo che ci interessa può essere scomposta nella somma di onde sinusoidali, che sono chiamate anche **armonici**.

C'è però, e si intuisce dalla figura della slide precedente, una certa corrispondenza tra le onde armoniche prodotte dalla vibrazione: hanno tutte lunghezza d'onda pari ad un *multiplo intero dell'onda totale*.

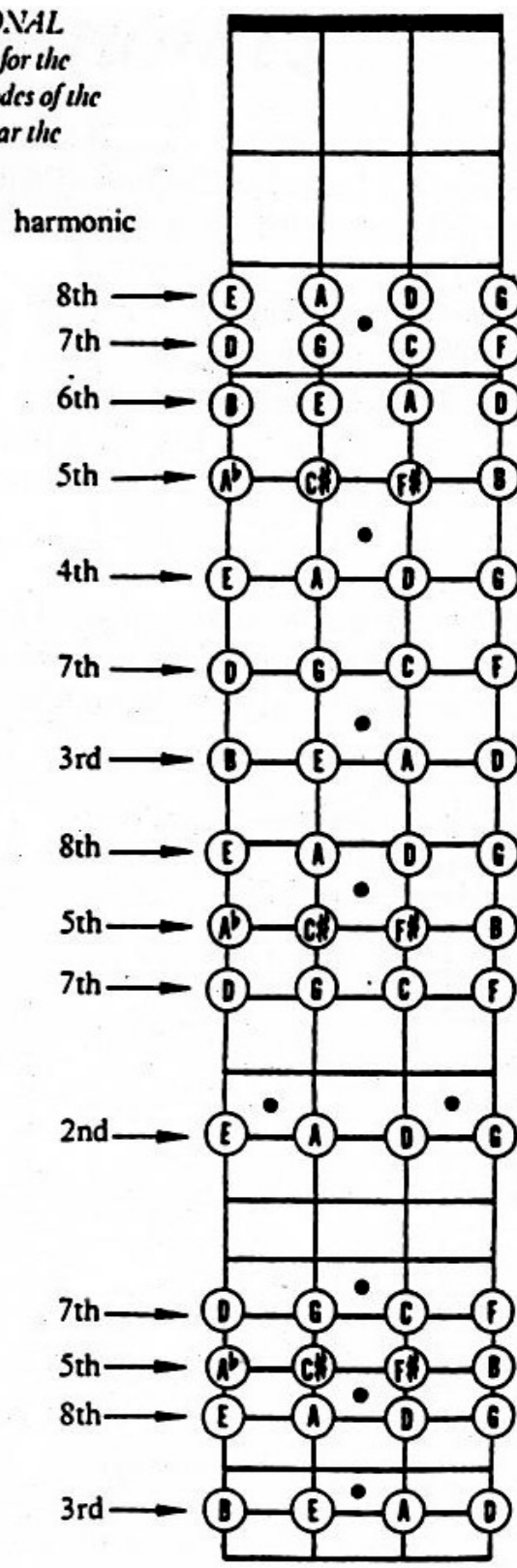
Per questa caratteristica, la successione in cui si dispongono queste onde è chiamata **successione armonica**

(in matematica si indica con questo nome una successione numerica i cui termini diminuiscono come  $1/n...$  ovvero il secondo termine è  $1/2$  del primo, il terzo  $1/3$  del primo etc.), e da qui appunto il nome storico di **“armonico”**.

Una qualsiasi nota suonata su uno strumento a corde produce quindi un'onda *abbastanza complessa*, composta da **infinite** onde di tipo armonico.

Questo si può notare anche dal fatto che il suono che fuoriesce dalla corda pizzicata vicino al ponte è differente da quello della stessa pizzicata in un qualsiasi altro punto: facendo questo si enfatizzano alcune onde armoniche invece di altre, ottenendo una sonorità (e quindi un timbro) differente.

FIGURE 8. ADDITIONAL NODE LOCATIONS for the first eight harmonics. Nodes of the 6th harmonic located near the pickups are not shown.



Ci sono tecniche per “stimolare” armonici naturali o artificiali negli strumenti a corde e questi armonici sono molto semplici da descrivere dal punto di vista ondulatorio, dato che le onde prodotte da questi sono quasi perfettamente sinusoidali:

Quando produciamo un armonico, “imponiamo” alla corda di poter *vibrare* soltanto dal ponte al punto in cui posizioniamo il dito della mano sinistra: se questo si pone in uno dei nodi delle *onde armoniche componenti* (come quelli in figura), allora nella corda viene sviluppato soltanto quel tipo di *vibrazione* relativo a quel tipo di *frequenza*.

Se poniamo un dito nel nodo della seconda onda armonica noi produciamo una nota uguale a quella che suoneremmo suonando la corda a vuoto, soltanto un *ottava* superiore. Stesso fenomeno si verifica per tutte le altre onde producendo rispettivamente una *quinta* più alta di una *ottava* per la terza oscillazione, un'altra *ottava* superiore per la quarta, una *terza* superiore di due *ottave* per la quinta, una *quinta* superiore di due *ottave* per la sesta, una *settima* superiore di due *ottave* per la settima, e un'*ottava* superiore di tre *ottave* per l'*ottava* e così via.

La successione armonica sulle onde crea quindi una serie di intervalli di frequenze che sono riconducibili alla scala naturale (in particolar modo alla quadriade).



Abbiamo parlato di **scala naturale** e non di **scala temperata**; qui dobbiamo aprire una parentesi: **gli armonici sono note “naturali” che non seguono una divisione razionale ed artificiale come quella della scala temperata.**

Questo condiziona il *pitch* di alcuni armonici e li manda “fuori tonalità”.

La musica europea si fonda sul **sistema temperato occidentale**: a partire dal XVII secolo, l'*ottava* è stata divisa in *dodici semitoni uguali* che danno luogo alla **scala cromatica** (in cui ad esempio il do diesis è identico al re bemolle, il re diesis al mi bemolle).

La **scala naturale** è un po' diversa da questa, questo spiega le differenze di tonalità indicate in tabella:

Harmonic	Percentage Of Error
1st	0.00
2nd	0.00
3rd	+0.11
4th	0.00
5th	-0.79
6th	+0.11
7th	-1.78
8th	0.00

# La serie armonica naturale, è la seguente:

*i suoni armonici*

\* in cents, confrontati con la scala temperata

Serie degli armonici naturali in cui il suono fondamentale è un Do.  
Il 7° 11° e 14° armonico sono calanti, il 13° è crescente.

Questa serie di note è la base fisica che ha dato origine al temperamento naturale.

Notare che nel temperamento naturale il 7°, l'11° e 14° armonico suonano calanti ed il 13° è crescente in relazione agli analoghi suoni nel temperamento equabile.

# Accordatura (di uno strumento a corde) con gli armonici

Come sanno tutti, il metodo per accordare lo strumento con gli armonici è molto utile, perché ci permette di farlo con grande precisione rispetto alla semplice accordatura al 5° tasto.

In cosa consiste questo metodo: si producono onde di tipo sinusoidale (o almeno in prima approssimazione) e si fanno “accavallare”. Se le onde differiscono in frequenza, creeranno dei **battimenti** facilmente udibili, altrimenti il **suono** sembrerà **puro**.

Il compito che abbiamo è quello di creare queste onde facendo l'armonico al 5° tasto di una corda e al 7° della corda successiva più fine. Per crearle conviene suonare con un solo dito della mano destra e pizzicare decisi le corde in modo da ottenere degli armonici lunghi che ci permettano di girare le meccaniche. Nel momento in cui si formano le onde, sentiremo (se lo strumento a corde non è accordato) dei **fastidiosi battimenti**.

*Via via che ruotiamo le meccaniche nel senso giusto, i battimenti si sentiranno sempre meno frequentemente. Quando scompariranno (cioè ad esempio non riusciremo a distinguerli per un periodo lungo **2-3 secondi**) avremmo accordato il nostro strumento con un'incertezza di **0,5 Hz**.*

**Questa incertezza è addirittura inferiore a quella dei più comuni accordatori elettronici (da 1 a 2 Hz).**

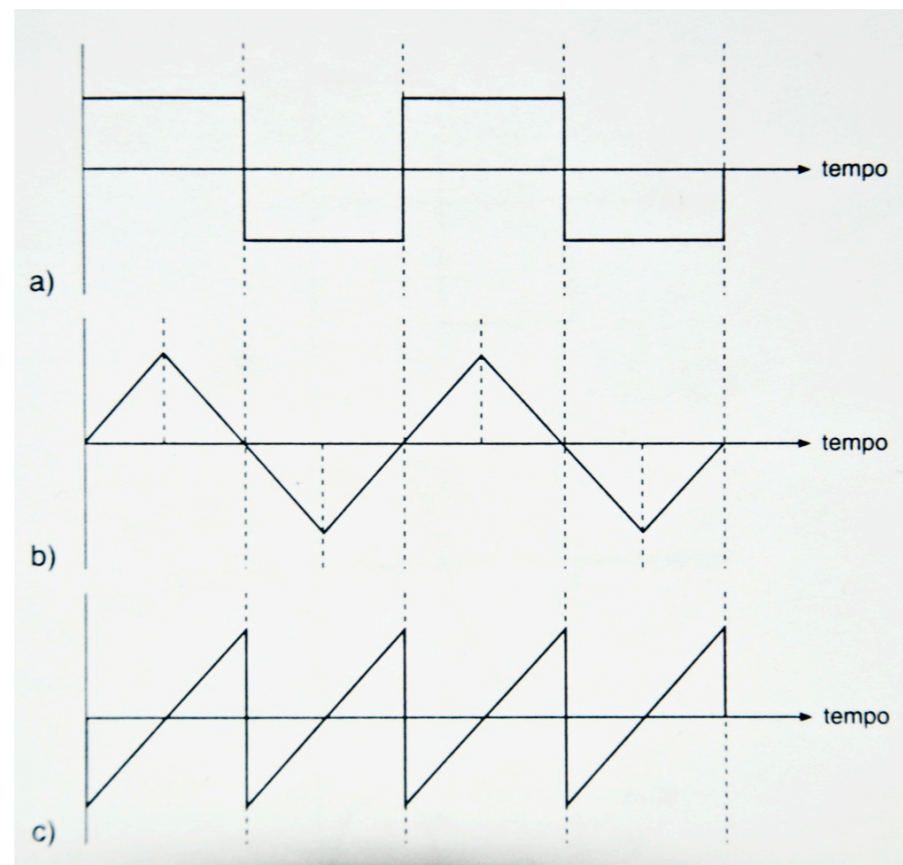
L'unico problema è che per ottenere il basso precisamente accordato (con un La a 440 Hz) dovremmo aiutarci con un'altra sorgente di riferimento e quindi se usiamo l'accordatore per questo compito, il risultato delle nostre incertezze aumenta in relazione a quella dell'accordatore. Un gran consiglio è quello di usare un diapason e cercare (dato che anche lui emette onde sinusoidali) di accordare il la di riferimento usando l'armonico del 5° tasto della 3° corda e il diapason.

# Onde semplici e complesse:

Le forme d'onda musicali possono essere suddivise in due categorie: semplici e complesse.

Quelle denominate quadrate, triangolari e a dente di sega sono esempi di onde semplici che contengono degli armonici.

Tali forme d'onda sono semplici perché sono continue e ripetitive: un ciclo di un'onda quadra è esattamente uguale a quello successivo, e tutti sono simmetrici rispetto alla linea zero.





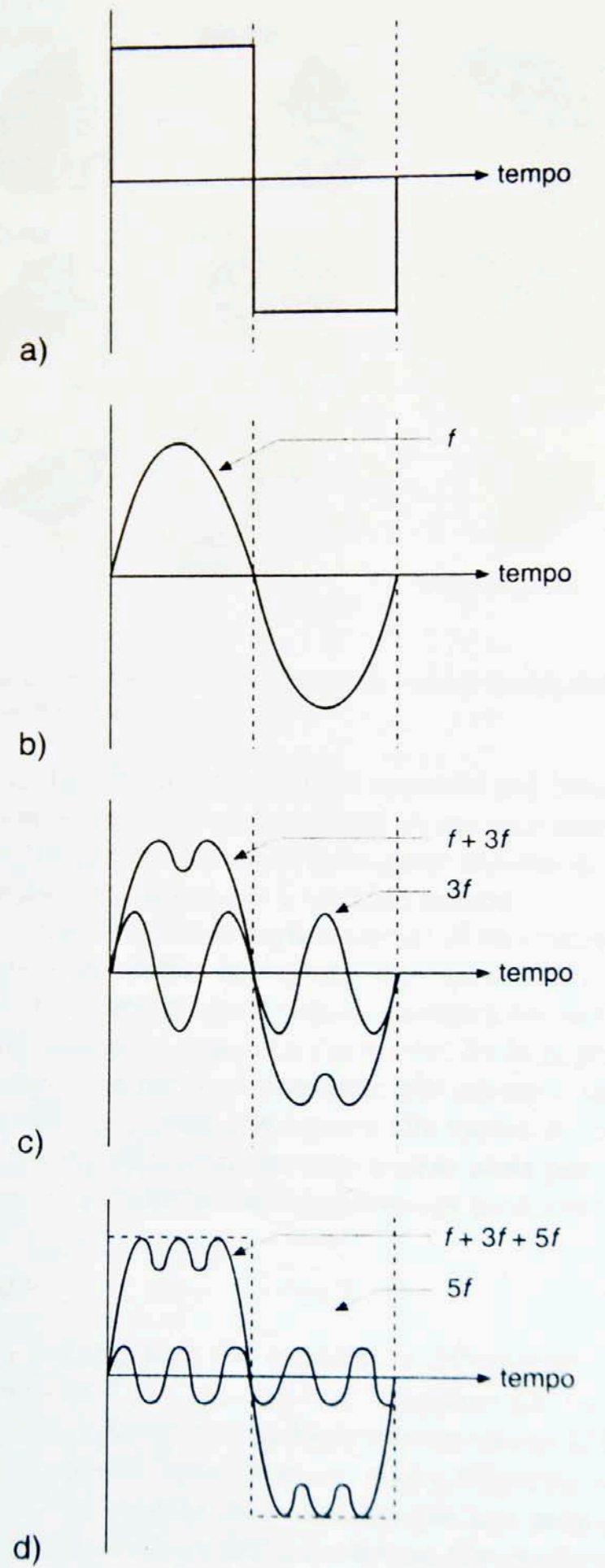
Le onde complesse, d'altro canto, non necessariamente si ripetono o sono simmetriche rispetto alla linea zero.

Non ripetendosi, è difficile suddividerle in cicli, o farle rientrare in determinate categorie in base alla frequenza semplicemente guardando la forma d'onda.

L'orecchio interno separa i suoni nelle loro componenti sinusoidali prima di trasmettere gli stimoli al cervello. Perciò non dovremmo interessarci alla forma d'onda in sé stessa, quanto piuttosto alle componenti che ne determinano quella particolare forma, dato che queste componenti influiscono sulle caratteristiche del suono e come il cervello le percepisce.

Ciò può essere illustrato facendo passare un'onda quadra attraverso un filtro passa-banda regolato in modo da lasciar passare solo una ristretta banda di frequenze in qualunque intervallo unitario di tempo. Si vedrebbe che l'onda quadra è composta dalla frequenza fondamentale più tutti i suoi **armonici dispari**, l'ampiezza dei quali decresce all'aumentare della loro frequenza.

Nelle figure a lato a) e b) si può notare come i singoli armonici dell'onda sinusoidale si combinino per formare un'onda quadra, mediante sottrazione della fondamentale laddove essi non siano correlati e mediante addizione laddove siano correlati.



a) onda quadra con frequenza  $f$

b) onda sinusoidale con frequenza  $f$

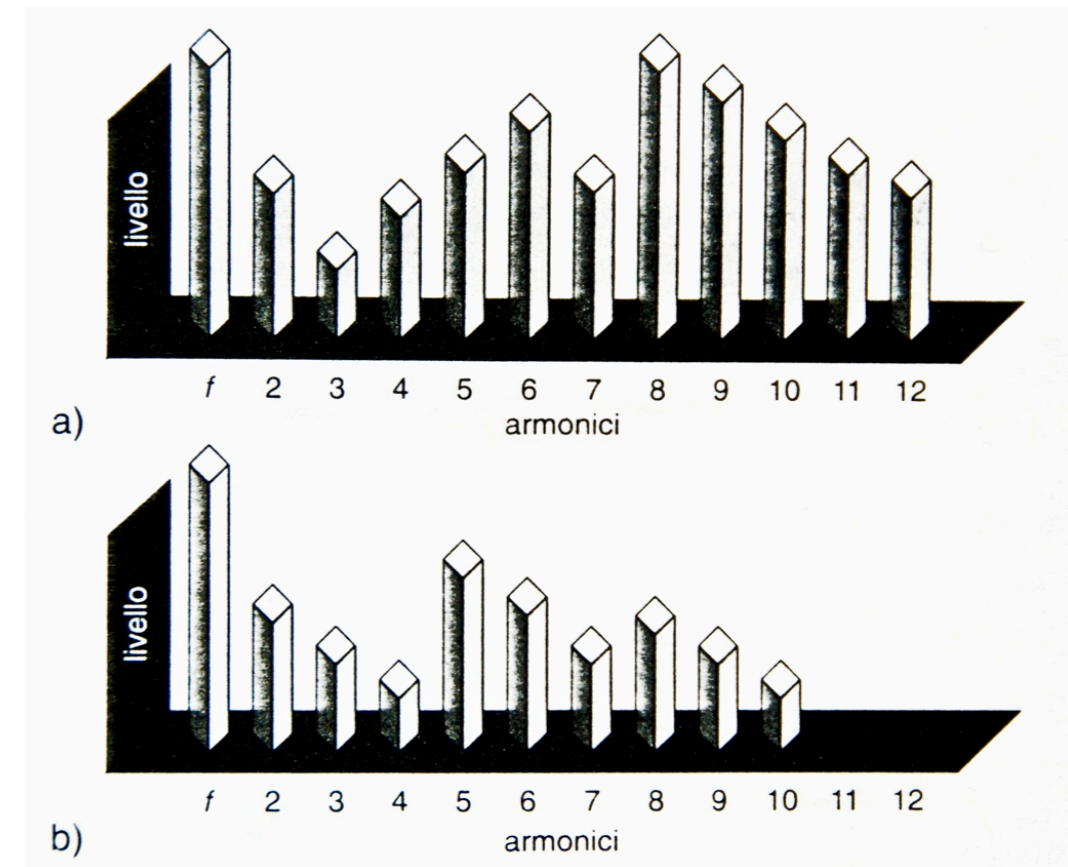
c) somma di un'onda sinusoidale con frequenza  $f$  e di un'onda sinusoidale con frequenza  $3f$  di ampiezza inferiore

d) somma di un'onda sinusoidale con frequenza  $f$  e di onde sinusoidali con frequenza  $3f$  e  $5f$  di ampiezza inferiore; si nota una certa somiglianza con l'onda quadra

Se ci si trova ad analizzare il contenuto armonico di un violino (a) e a paragonarlo poi con quello di una viola (b) (se entrambi stanno suonando un La da concerto a 440 Hz) si ottengono i risultati mostrati nella figura sotto:

Si nota che il violino ha armonici che differiscono sia in estensione che in intensità rispetto a quelli della viola.

Gli armonici presenti e le loro relative intensità determinano le caratteristiche sonore di ciascuno strumento e definiscono il timbro dello strumento. Se si cambia il bilanciamento degli armonici, cambieranno le caratteristiche sonore dello strumento.

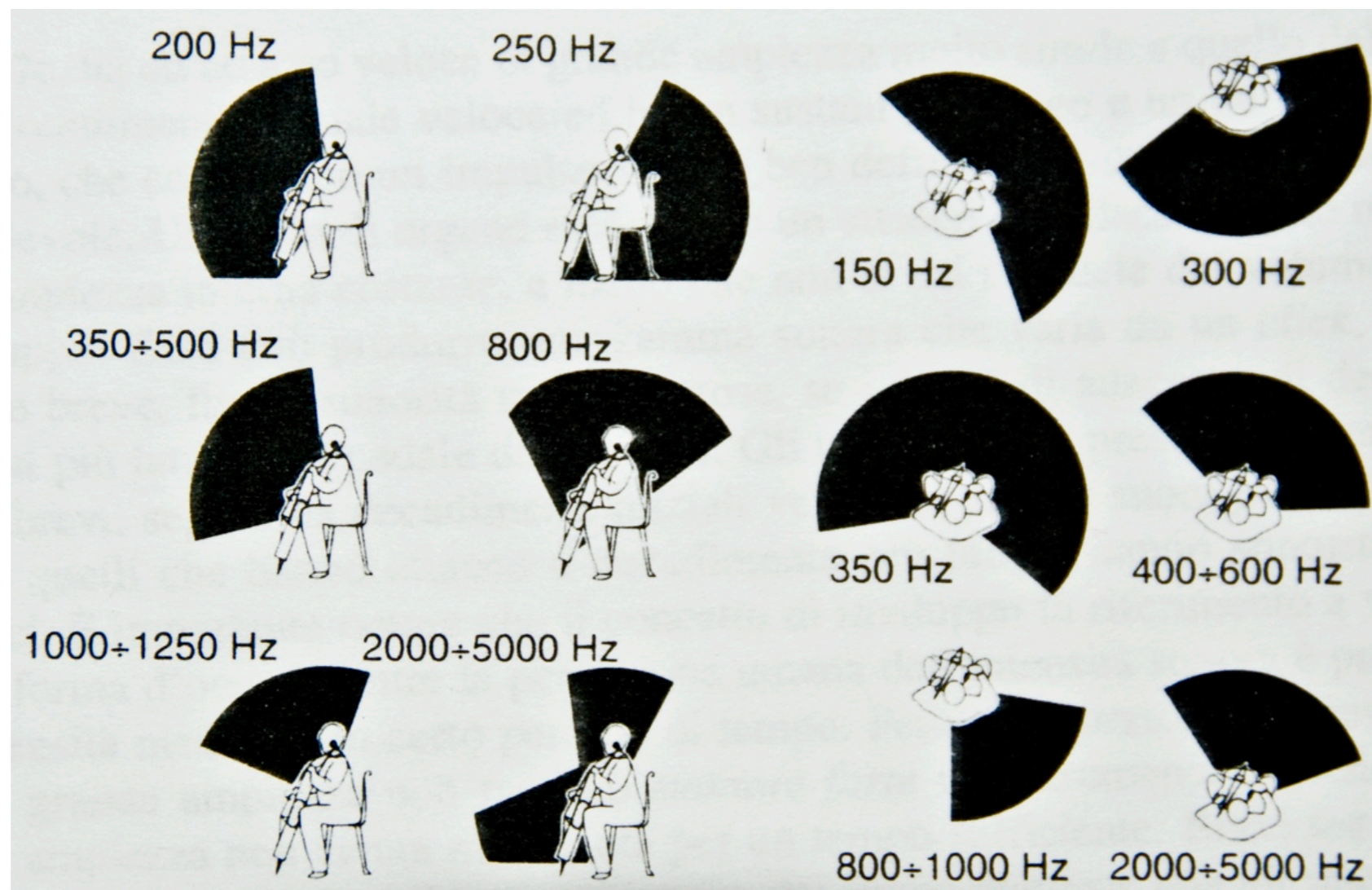


Per esempio se nel caso del violino si diminuisse il livello degli armonici che vanno dal quarto al decimo e si eliminassero quelli superiori al decimo, il violino suonerebbe proprio come una viola.



Oltre alle variazioni nel bilanciamento armonico che si possono verificare tra strumenti e tra famiglie di strumenti, è normale che sia la frequenza fondamentale, sia le frequenze degli armonici cambino di direzione dal momento della loro emanazione dallo strumento, a seconda della loro posizione nell'estensione sonora dello strumento stesso.

Per esempio la figura sotto ci mostra i diagrammi dei principali modelli di radiazione sonora del violoncello, sia visto di lato che visto dal di sopra.





Il significato degli armonici per la nostra percezione della qualità sonora fu riassunto alla perfezione da **Russel Hamm** nel numero di maggio 1973 del *Journal of the Audio Engineering Society*:

“Le fondamentali caratteristiche della colorazione di uno strumento sono determinate dall'intensità dei primi armonici. Ciascuno degli armonici inferiori dà il suo caratteristico effetto quando è dominante, o può modificare l'effetto di un altro armonico dominante se è più rilevante di esso.

Nella più semplice classificazione gli armonici sono suddivisi in due gruppi tonali:

- gli **armonici dispari** (il terzo e il quinto), rendono il suono *stoppato* o *mascherato*
- gli **armonici pari** (il secondo, quarto e sesto) rendono il suono più *corale* o *cantante*.

Dal punto di vista musicale il secondo armonico è un'ottava sopra la fondamentale e non è praticamente udibile, anche se contribuisce alla *corposità* del suono, rendendolo più pieno. Il terzo armonico è anche denominato *quinta* o *dodicesima*. Conferisce al suono una caratteristica che molti musicisti definiscono *ovattata*.

Invece di rendere il suono più *pieno*, una terza molto forte lo rende più *morbido*. Se vi si aggiunge il quinto armonico oltre al terzo, il suono diventa *metallico* e, nel caso di un eccessivo aumento della sua ampiezza, diventa *fastidioso*. Un secondo armonico forte assieme ad un terzo anch'esso forte tende a far svanire la sensazione di *ovattato* appena descritta; se si aggiungono il quarto e il quinto la sonorità poi si apre e diventa simile a quella di un ottone.

Armonici superiori al settimo rendono il suono più definito e tagliente. Dato che questa maggiore definizione viene bilanciata dalle qualità fondamentali del suono, essa tende a rinforzare la fondamentale e conferisce al suono un attacco ben definito.

Molti degli armonici di quest'ultimo tipo non hanno la stessa intonazione, cioè sono per esempio il settimo, il nono e l'undicesimo. Perciò una definizione troppo spinta può portare a un'aspra dissonanza.

Dato che l'orecchio sembra essere molto sensibile agli armonici che conferiscono maggior definizione, il controllo della loro ampiezza è di fondamentale importanza.

Lo studio del suono di una tromba dimostra che l'effetto di definizione è correlato direttamente con il valore a cui si suona.

Suonare con una tromba la stessa nota forte o piano non comporta una grande differenza nell'ampiezza della fondamentale e degli armonici più bassi, ma si vede che l'ampiezza del sesto armonico aumenta o diminuisce in maniera quasi proporzionale all'intensità dell'emissione. Tale bilanciamento della parte *esterna* di un suono è un segnale di intensità che ha importanza critica per l'orecchio umano.

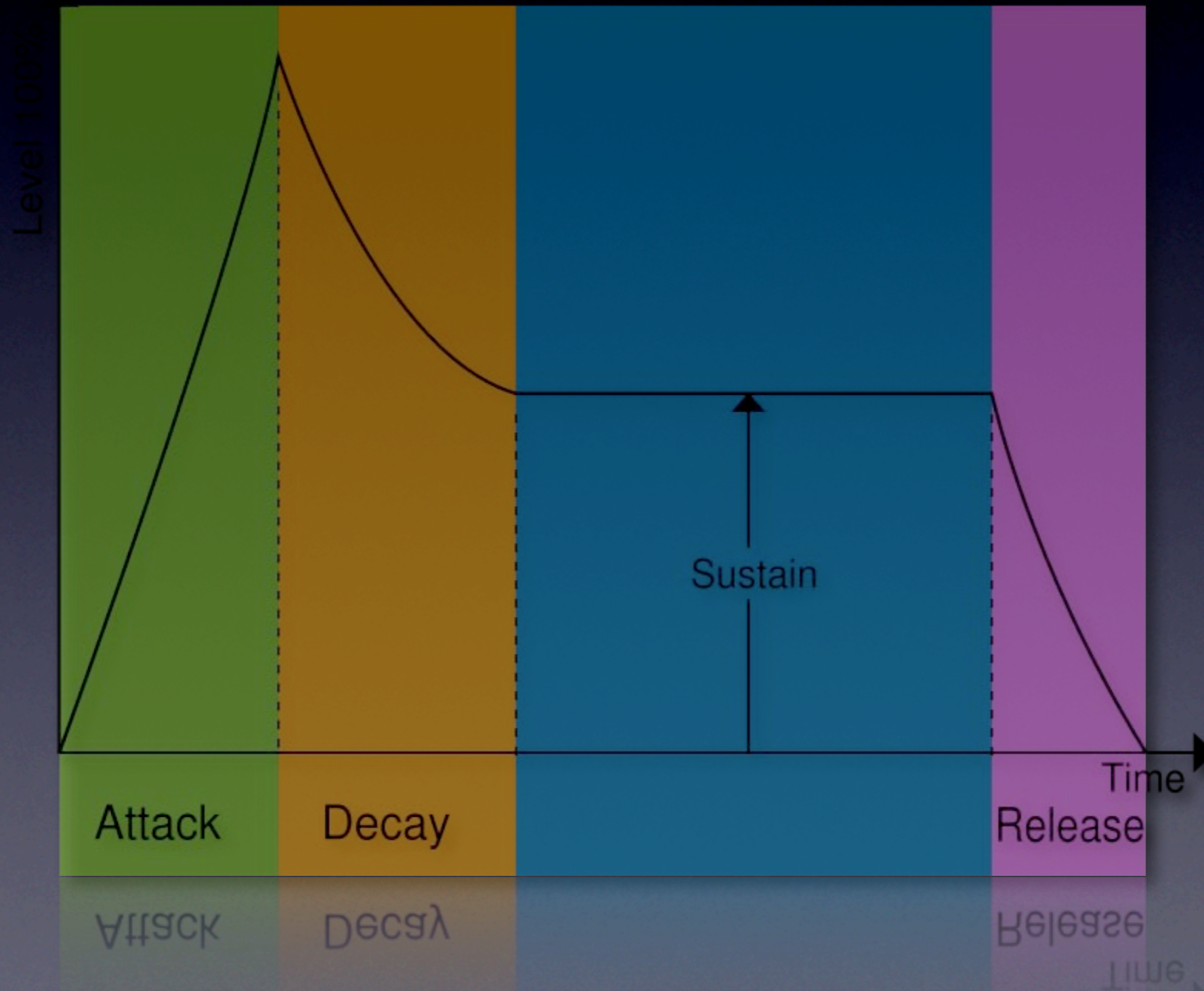
Dato che il bilanciamento relativo degli armonici di uno strumento è così importante per il suono dello strumento stesso, la risposta in frequenza di microfoni, amplificatori, monitor e di tutti gli altri elementi che il segnale incontra nel suo percorso, può influenzare il timbro o il bilanciamento armonico del suono. Se la risposta in frequenza non è piatta, il timbro del suono ne risulterà cambiato; per esempio se si amplificano le alte frequenze in maniera minore rispetto alle basse e alle medie, il suono risulterà più smorzato del necessario. Gli equalizzatori possono essere usati per variare il timbro degli strumenti, variando perciò l'impressione soggettiva che producono sull'ascoltatore.”

# Apporto qualitativo delle armoniche sulla formazione del timbro

- 1° - Stabilisce l'altezza del suono
- 2° - Conferisce chiarezza
- 3° - E' prevalente nei cosiddetti suoni di "canna"
- 4° - Aumenta l'effetto introdotto dalla 2° armonica
- 5° - Incupisce un poco il suono
- 6° - Conferisce un carattere squillante
- 7° - Produce un po' di asprezza
- 8° - Aumenta la chiarezza ed il carattere squillante
- 9° - Fa aumentare l'asprezza
- 10° - Apporta maggiore chiarezza ed effetto metallico

man mano che il numero d'ordine delle armoniche si eleva, aumenta la chiarezza e anche l'asprezza del suono. Per contro una carenza o diminuzione di contributo da parte delle armoniche superiori produce un timbro più velato.

# Inviluppo



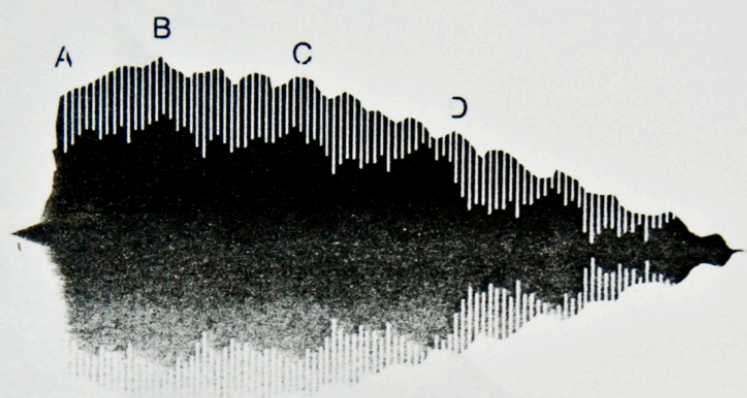
# L'inviluppo

Il timbro non è l'unica caratteristica che ci permette la differenziazione fra strumenti musicali. Ciascuno strumento ha il suo inviluppo caratteristico che va considerato insieme al timbro e determina il suono particolare dello strumento stesso.

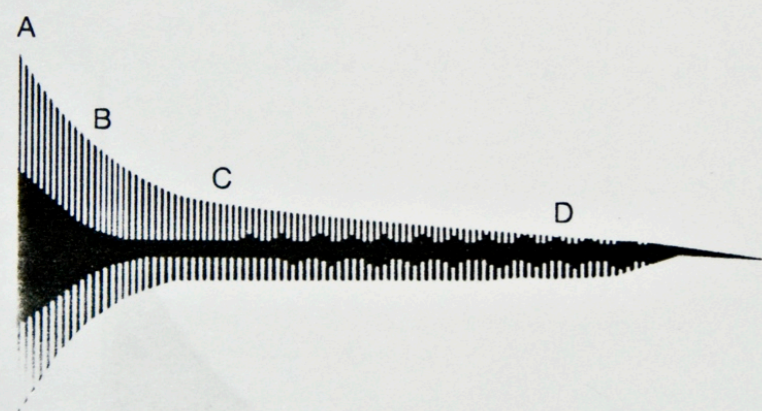
L'inviluppo di una forma d'onda descrive la variazione di intensità e può essere rappresentato graficamente unendo fra di loro i punti di picco con la stessa polarità per una serie di cicli. L'inviluppo di un segnale acustico è composto di tre sezioni: attacco, dinamiche interne e decadimento.



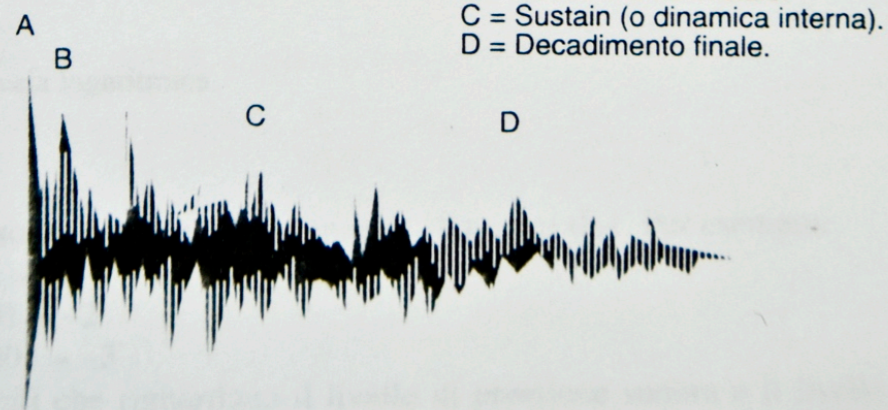
L'**attacco** (*attack*) descrive il modo in cui un suono inizia e aumenta di intensità; le **dinamiche interne** sono gli aumenti e le diminuzioni di volume e il mantenimento (*sustain*) dopo il periodo iniziale; con **decadimento** (finale) si intende il modo in cui il suono cessa.



a)



b)



Legenda: A = Attacco iniziale.  
B = Decadimento iniziale.  
C = Sustain (o dinamica interna).  
D = Decadimento finale.

c)

Ciascuna di queste sezioni ha tre variabili:

**1. durata nel tempo**

**2. ampiezza**

**3. variazione di ampiezza nel tempo**

Forme d'onda di alcuni strumenti musicali:

a) clarinetto

b) rullante

c) piatto

Gli inviluppi che presentino tempi di attacco molto brevi, seguiti da decadimenti iniziali veloci, si dicono suoni *percussivi* o *spinti*, mentre quelli che hanno attacco e decadimento più lunghi hanno sonorità più morbide e dolci.

E' importante notare che il concetto di inviluppo fa riferimento a valori di picco della forma d'onda, mentre la percezione umana dell'intensità sonora è proporzionale all'intensità media in un certo periodo di tempo. Perciò le porzioni dell'inviluppo che hanno grande ampiezza non faranno *suonare forte* uno strumento a meno che questa grande ampiezza non venga mantenuta per un tempo sufficiente. Brevi sezioni a grande ampiezza contribuiscono alle caratteristiche del suono piuttosto che all'intensità.

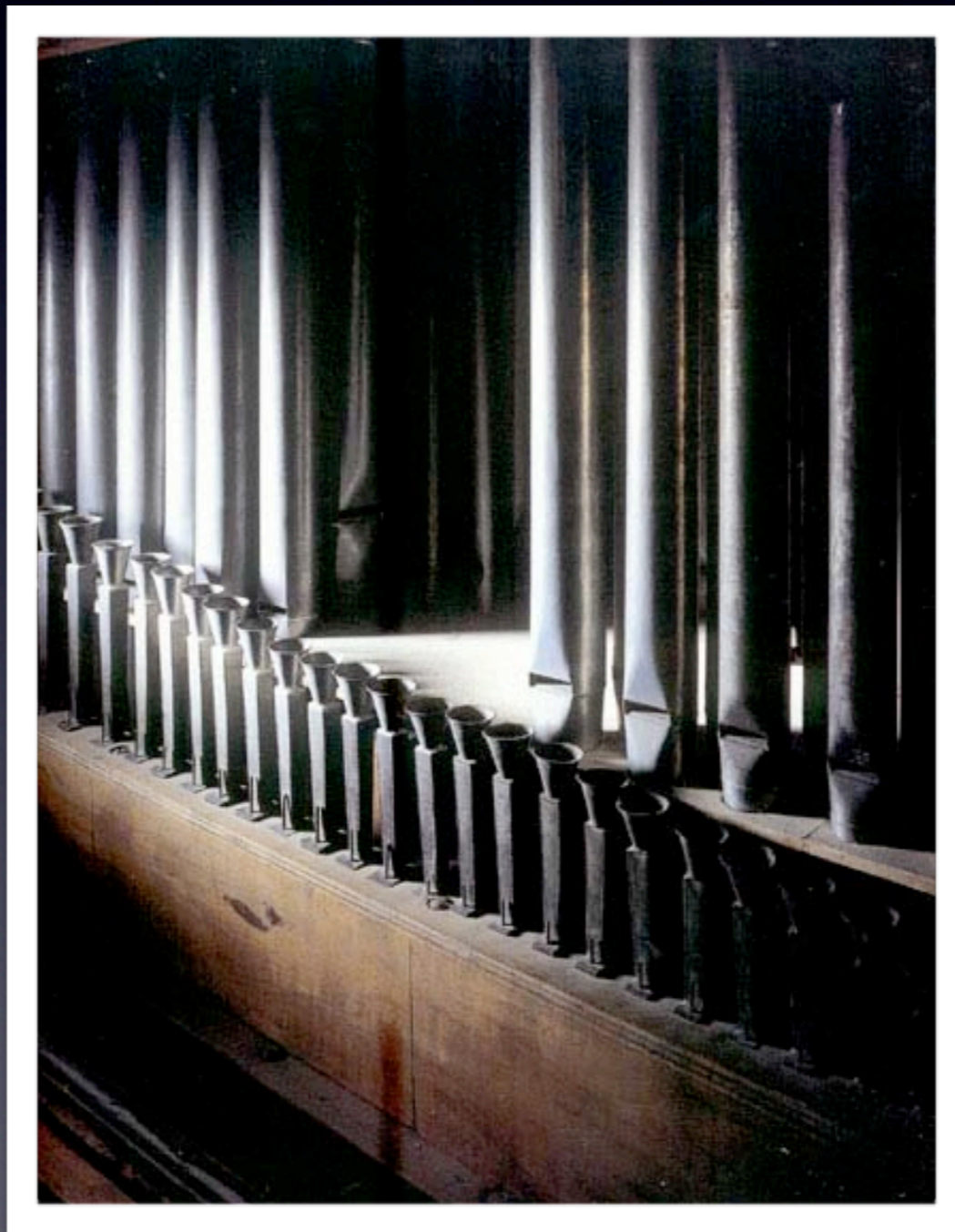
Mediante l'uso di una strumentazione di controllo dell'ampiezza, come ad esempio i compressor, i limiter, gli expander, le caratteristiche del suono di uno strumento possono essere cambiate, variando l'inviluppo e non il timbro.

L'inviluppo di una forma d'onda generata da uno strumento elettronico è simile, per la maggioranza delle caratteristiche, al suo *gemello* acustico e viene anch'esso misurato in base al suo attacco iniziale (**attack**), al tempo di decadimento (dall'attacco iniziale) (**decay**), al tempo di **sustain** e al tempo di rilascio finale (**release**).

Di solito viene indicato con la sigla abbreviata ADSR.



# Le vibrazioni delle canne sonore





Quello che abbiamo detto sulle vibrazioni armoniche a proposito delle corde elastiche, ci esime dal dire cose pressoché uguali sulle canne sonore: i presupposti matematici della situazione sono infatti gli stessi in tutti i casi (le frequenze armoniche sono sempre multipli di quelle fondamentali), anche se la diversa natura delle sorgenti sonore comporta adeguamenti meccanici particolari, che però non toccano i requisiti fondamentali del fenomeno.

Quello che ci interessa capire è cosa succede nelle canne sonore quando una **perturbazione** modifica il loro equilibrio interno.



# Analisi acustica nelle canne sonore

1. La **perturbazione**, che è la conseguenza dell'impulso operato dalla forza eccitatrice, la quale agisce sempre all'**imboccatura** della canna, si manifesta con un'onda di compressione nella colonna d'aria ivi contenuta.

2. La **compressione** (che ha dimensioni limitate) si propaga lungo il tubo con **velocità ben precisa** (che vedremo in dettaglio) fino a raggiungere l'estremità opposta del tubo stesso, dove l'onda incontra l'ambiente esterno e vi si precipita.

3. La **rarefazione**, ossia la naturale reazione alla spinta dell'onda, si forma nella **parte terminale** del tubo, e percorre in senso inverso la lunghezza del tubo sino alla sua imboccatura.

...



# Periodo di vibrazione delle canne sonore

...ora bisogna che all'imboccatura si rinnovi l'impulso eccitatore con perfetto sincronismo, e la sua **periodica ripetizione** darà luogo a pulsazioni di frequenza coerente con la lunghezza della canna e col tempo che l'onda di compressione e quella di rarefazione impiegano a percorrere nei due sensi la lunghezza della canna stessa.

Questo è il **periodo di vibrazione** di tutte le canne sonore, ed è chiaro che la sua durata (andata e ritorno dell'onda) dipende dalla velocità che anima il movimento delle pulsazioni: come il tempo impiegato per compiere un dato percorso dipende dalla velocità di chi lo compie.

# Velocità delle pulsazioni nelle canne sonore

La velocità delle pulsazioni dell'aria nelle canne sonore è pari a quella delle onde longitudinali nello stesso gas. In via pratica può essere ritenuta uguale a quella del suono nell'aria che, come vedremo nel capitolo che riguarda la “propagazione di energia per onde”, è normalmente di 340 m/s.

# ...un'altra cosa per le canne sonore

Per completare la descrizione del meccanismo delle pulsazioni che avvengono nei tubi sonori, dobbiamo considerare ancora una cosa.

La riflessione dell'onda, al punto terminale del tubo, non avviene nell'istante medesimo in cui essa lo raggiunge, ma con un po' di ritardo.

L'onda di compressione è infatti dotata di una certa forza, che conserva il suo impulso in senso longitudinale per una piccola lunghezza oltre quella effettiva del tubo.

Esempio: notare la forma del getto d'acqua che esce dallo spinello di una pompa. Il getto non si trasforma subito in "rosa", ma conserva per una certa lunghezza la forma rotonda del tubo dal quale fuoriesce, causa la forza esercitata dalla pressione.

*E' come se il tubo fosse un po' più lungo.*

Una cosa simile avviene anche nel caso dei tubi sonori, alla cui estremità la trasformazione dell'onda longitudinale in onda sferica si opera con una certa gradualità ed è compiutamente raggiunta in un punto che è apprezzabilmente spostato verso l'ambiente esterno.

Tutto quello che abbiamo detto a proposito delle relazioni che intercorrono tra la frequenza delle pulsazioni nei tubi sonori, la lunghezza del tubo e la velocità delle pulsazioni può venir sintetizzato in questi termini:

$$f = \frac{V}{\lambda}$$

dove  $f$  è la frequenza,  $V$  è la velocità e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della vibrazione.

# Lunghezza d'onda del LA a 440 Hz nell'aria:

$$\lambda = \frac{V_{suono}}{f} = \frac{340 \frac{m}{s}}{440 \text{ Hz}} = 0.772 \text{ m}$$

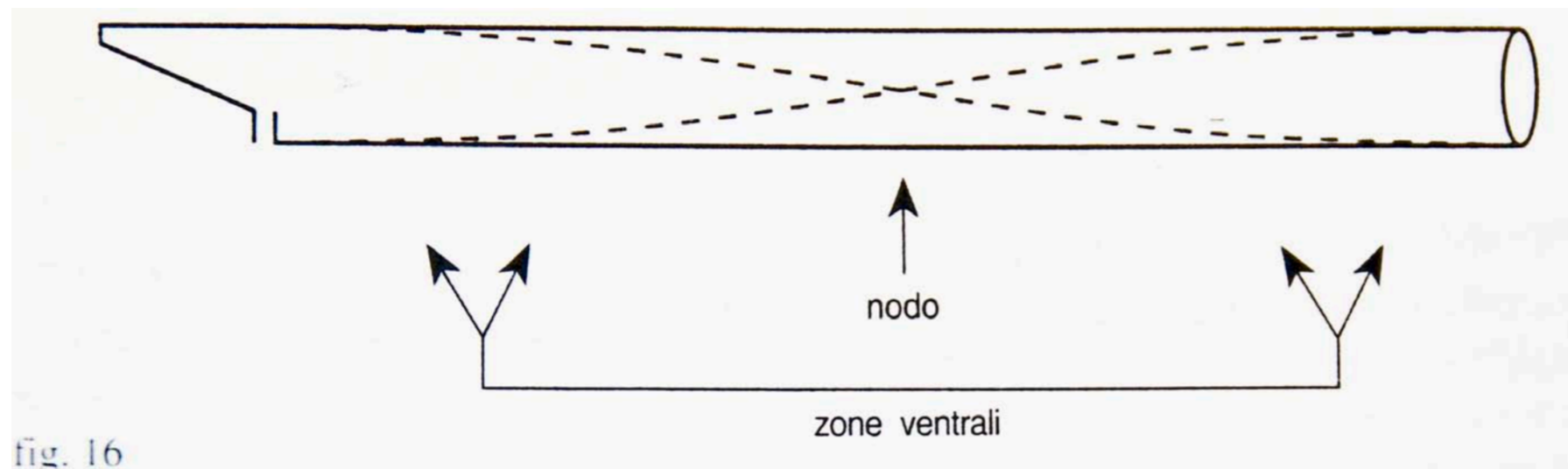
Tra la lunghezza di una canna sonora e la lunghezza d'onda della sua vibrazione fondamentale intercorre sempre un rapporto preciso; cosa che non avviene per la lunghezza delle corde, in quanto una stessa corda, a seconda che sia più o meno tesa, emette suoni di altezza diversa, prodotti da frequenze diverse, alle quali corrispondono lunghezze d'onda adeguatamente diverse.

Allora possiamo chiederci:

## Qual è il rapporto tra la lunghezza della canna e la sua onda fondamentale?



# Schematizzazione della canna sonora

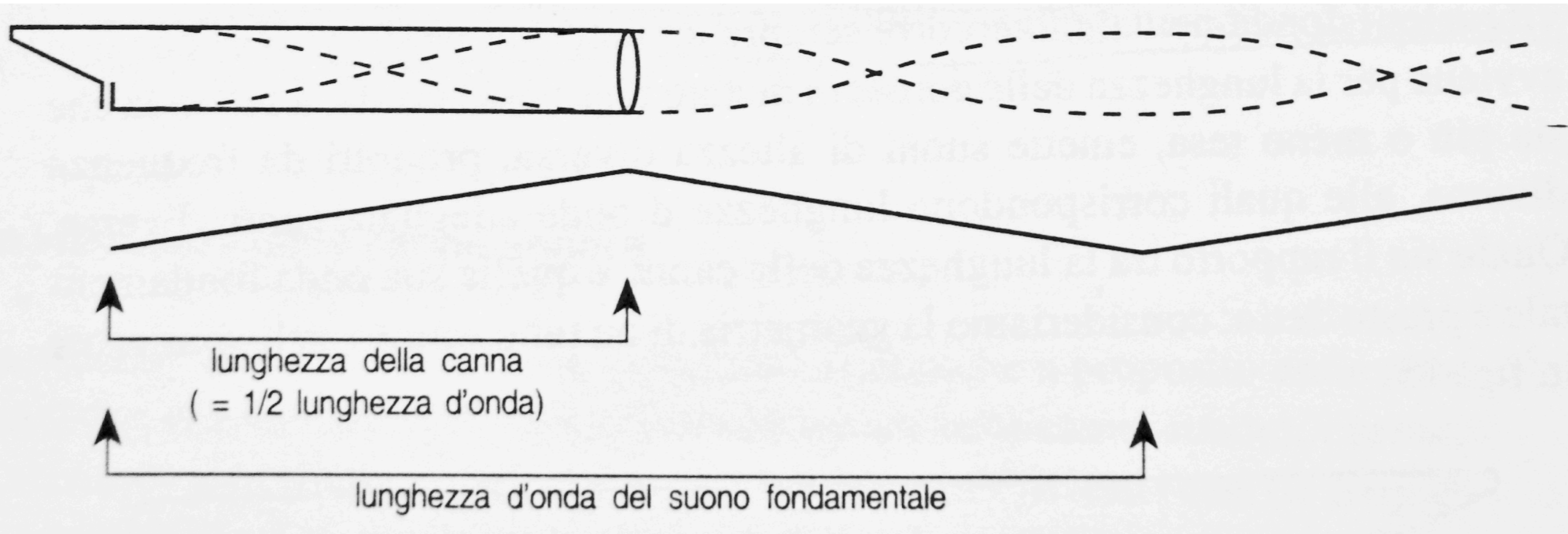


Alle estremità di una canna aperta non può formarsi che una **zona ventrale**: un nodo in quello stesso punto sarebbe assurdo.

Anzi: siccome all'imboccatura agisce la forza eccitatrice, alla quale deve corrispondere **necessariamente** un'ampiezza del movimento vibratorio (altrimenti la vibrazione sarebbe impedita), è parimenti evidente che anche quel punto deve corrispondere ad una **zona ventrale**, come avviene all'estremità del tubo.

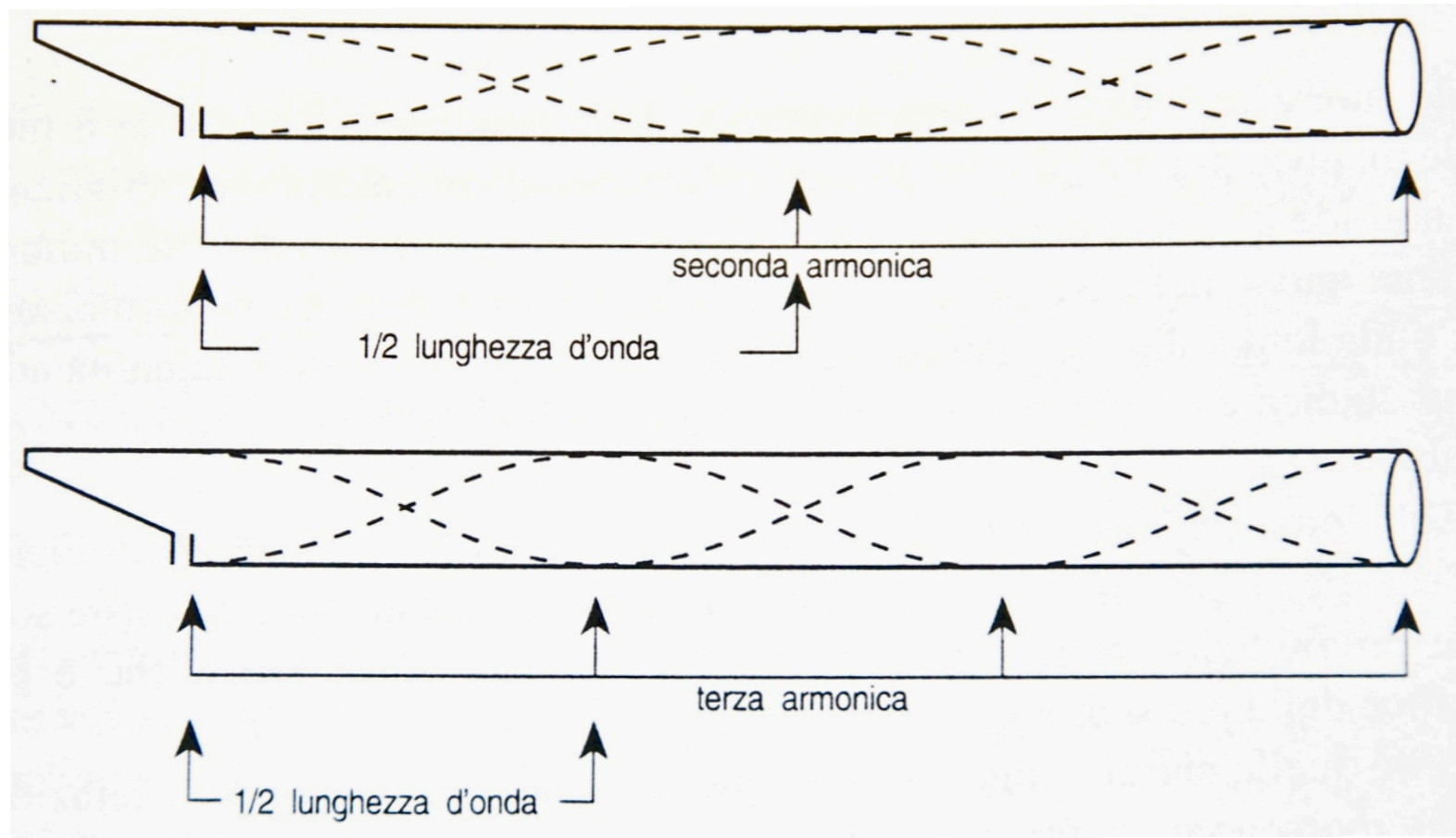
Il meccanismo delle vibrazioni esige però che almeno un punto nodale ci sia, altrimenti si dovrebbe parlare di corrente d'aria e non di vibrazione acustica: questo punto nodale, quando la canna emette il suono fondamentale, si forma infatti presso la metà, circa, del tubo.

Da questa figura si può dedurre graficamente il rapporto che intercorre tra la lunghezza effettiva del tubo e quella dell'onda fondamentale:



Variando la modalità e la frequenza degli impulsi prodotti dalla forza eccitatrice, le canne sonore possono emettere, in luogo della vibrazione fondamentale, un'armonica della medesima. L'altezza di questi suoni varia a seconda dell'eccitazione, ma sempre con frequenze che sono multiple di quella fondamentale.

Vediamo in figura come si formano ventri e nodi in una canna sonora quando viene emessa una frequenza armonica:



# Canne chiuse

Nella grande famiglia delle canne sonore usate nella pratica musicale, incontriamo un particolare tipo di tubi tappati alla loro estremità terminale: si tratta delle cosiddette **canne chiuse**.

La principale caratteristica acustica di queste canne è che alla loro estremità tappata, anziché formarsi una zona ventrale, si forma un **punto nodale**.

Le stesse ragioni meccaniche per cui all'estremità di una canna aperta deve formarsi una zona ventrale, esigono che all'estremità di una canna tappata si debba formare un punto nodale, ossia un punto le cui pulsazioni si riflettono (senza inversione di fase) ripercorrendo in senso inverso la lunghezza del tubo.

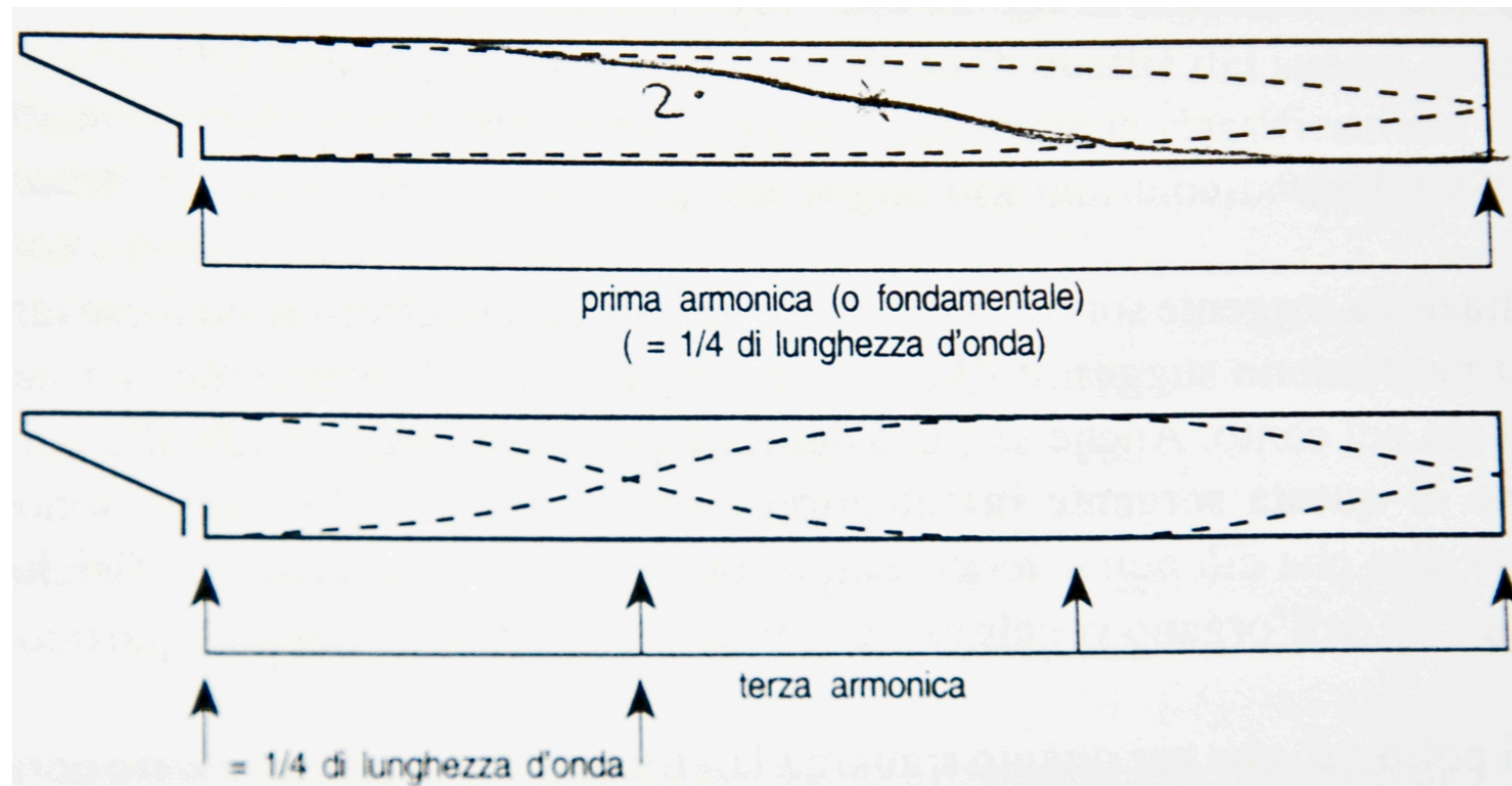
E' come se il punto nodale, che si forma presso la metà circa di una canna aperta, venisse spostato all'estremità tappata del tubo. Per questo motivo (duplicità del percorso - andata e ritorno - dell'onda) è come se la canna fosse lunga il doppio. Parimenti doppia è la lunghezza d'onda, mentre la frequenza, che sta alla lunghezza d'onda in proporzione inversa, viene dimezzata.

A parità di lunghezza le canne chiuse emettono suoni che sono un'ottava bassa rispetto a quelli emessi dalle canne aperte.

questa particolarità consente ai costruttori d'organi di ridurre gli ingombri, dato che per le canne destinate alle note molto gravi possono ottenere la stessa frequenza usando tubi di metà lunghezza, ma con l'estremità tappata.

Poiché nelle canne chiuse si deve necessariamente formare un punto nodale all'estremità tappata, ne consegue che sono impedito tutte le vibrazioni armoniche che in quel punto debbono avere una zona ventrale, vale a dire tutte le armoniche di ordine pari: 2, 4, 6, 8, etc.

Se consideriamo che la lunghezza della canna è virtualmente raddoppiata e che la sua estremità tappata viene a essere il centro della lunghezza stessa, dove, per effetto della chiusura, non può formarsi che un punto nodale, risulterà chiara la ragione per cui questo tipo di canna può generare solo le le armoniche di ordine dispari:





# La genesi delle “stecche”

Se da una corda elastica, o da una campana, si può ottenere il suono anche con una sola percussione, nelle canne sonore un solo impulso non basta, occorre infatti che la forza eccitatrice agisca senza interruzione per una durata pari a quella del suono che si vuole ottenere: occorre altresì che la frequenza degli impulsi coincida col periodo delle pulsazioni.

Se il suono si “rompe”, e nasce quell’effetto sgradevole, tanto temuto da suonatori e cantanti, conosciuto con il nomignolo di “stecca”.

Ciò avviene perché con la perdita del sincronismo l’onda di pressione si propaga lungo il tubo, mentre l’onda di ritorno dell’impulso precedente non è ancora arrivata all’imboccatura. Si tratta di uno scontro vero e proprio tra due onde di fase inversa che “viaggiano” sulla stessa linea, l’una contro l’altra.

L’abilità di un esecutore che riesca costantemente a evitare le stecche, consiste essenzialmente nella sua acuta sensibilità nel “sentire” e mantenere il sincronismo tra gli impulsi e il periodo delle vibrazioni: cosa che nella pratica musicale è meglio conosciuta come sensibilità nel sentire e mantenere la “nota” prima e durante l’emissione.

# Strumenti a percussione



Una piastra metallica, una lamina, un regolo, una corda o una membrana tesa etc. possono essere altrettante sorgenti sonore eccitabili mediante percussione.

Il modo di vibrare di questi corpi elastici è il più vario e può essere anche tra i più complessi. Si passa infatti dalle vibrazioni regolarissime e quasi sinusoidali del diapason a rebbi, alle caotiche e disarmoniche vibrazioni della “gran cassa”. Tra l’uno e l’altro di questi poli incontriamo sorgenti idonee a emettere suoni ad altezza determinabile e altri ai quali questo requisito non può competere (strumenti a suono cosiddetto “indeterminato”), con una catena di passaggi dall’uno all’altro tipo che copre una casistica veramente numerosa. Limiteremo la nostra considerazione agli aspetti fondamentali della questione:



## I. **Membrane tese** (*timpano tamburo etc*):

possono essere considerate come corde elastiche estese in due dimensioni (una superficie).

Sono fissate rigidamente lungo tutto il bordo ad un apposito telaio, pertanto, alla loro periferia non vi sono che punti nodali, mentre al centro della membrana si forma un punto donale comune scarsamente definito: il resto della superficie è sede di zone ventrali separate da linee nodali.

Dal tipo del supporto (che nel timpano è quasi emisferico con un foro al centro) e dalla regolarità della tensione, dipende la possibilità di dare, o meno, **suoni di altezza determinabile.**



## 2. **Piastre** (*campane, piastra ricurva, etc*):

vibrano liberamente lungo tutta la loro superficie, dove si formano zone ventrali, separate da linee nodali variamente distribuite, mentre al centro si ha un punto nodale molto ben definito, dove generalmente viene applicato il sostegno della piastra.

Dalla regolarità delle vibrazioni delle piastre dipende l'altezza quasi sempre ben determinata del loro suono, anche se la grande difficoltà di ottenere una fusione perfettamente omogenea e di geometria altrettanto precisa comporta, si può dire sempre, che il suono delle piastre in genere (e quello delle campane in particolare) implichi **più sistemi di vibrazioni di frequenza molto prossima tra loro**, che sono causa dell'ondulazione che caratterizza il suono di queste sorgenti sonore.

I piatti, i tam tam, sono pure costituiti dalle piastre, ma il minimo spessore rispetto alla loro superficie è causa di vibrazioni disarmoniche e quindi di **suono di altezza non determinabile.**

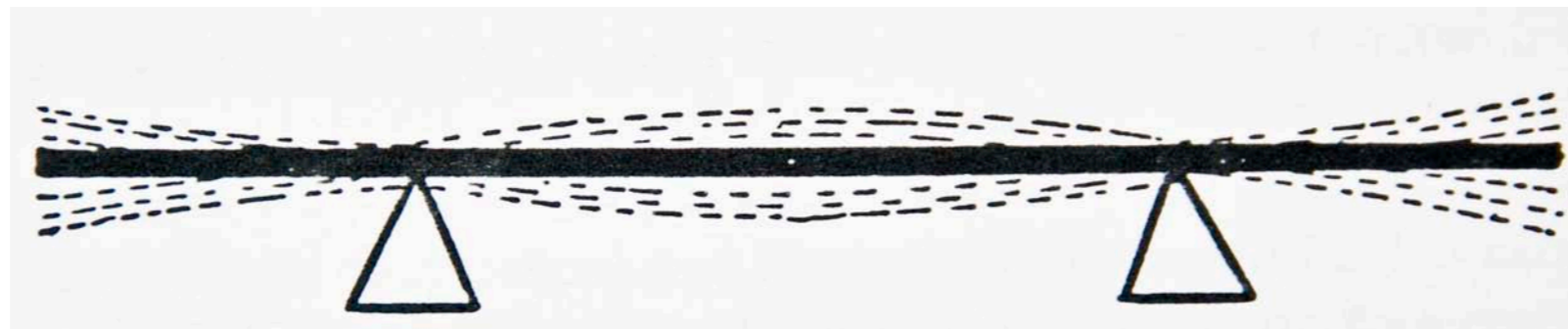




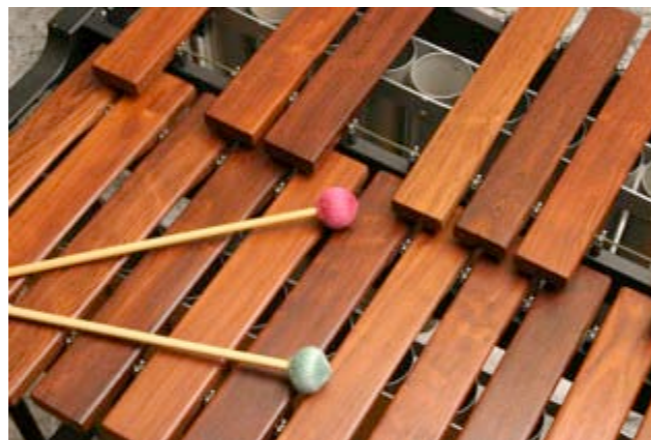
**3. Regoli metallici** o di vetro (celesta, vibrafono, glockenspiel, etc):  
sono sorgenti di suono di altezza molto precisa.

I regoli sono quasi sempre appoggiati a due supporti: in questi punti di appoggio non possono formarsi che nodi, mentre alle estremità e al centro si avranno zone ventrali.

Questo particolare vincolo è la causa del suono quasi puro che questi regoli possono dare:



Analogo comportamento è quello dei regoli di legno (xilofono etc), con la sola differenza che il loro suono è molto complesso e di altezza meno precisa rispetto a quella dei regoli metallici.

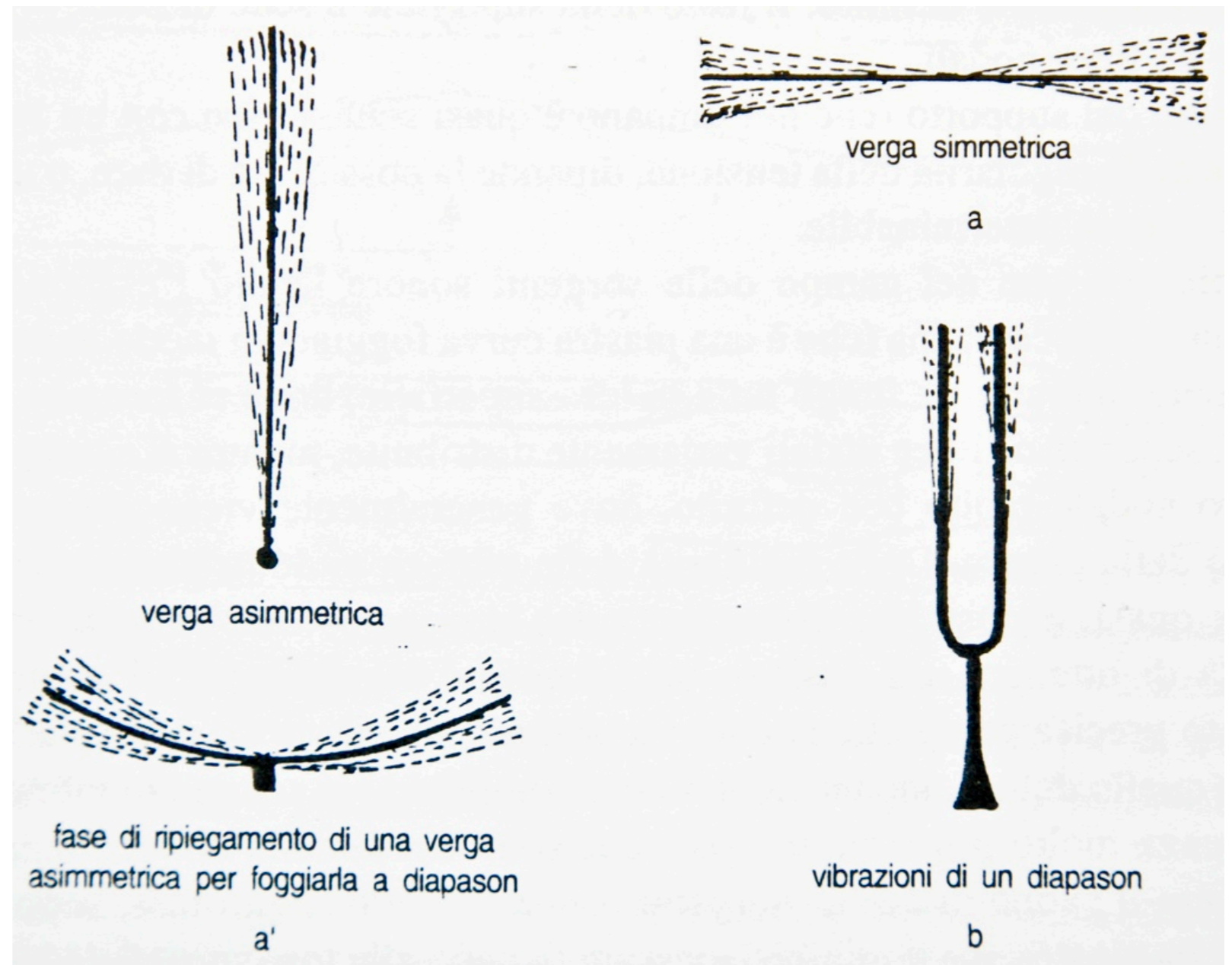


# Diapason a rebbi:

verga metallica di acciaio fissata a un supporto situato alla metà della sua lunghezza.

In figura possiamo vedere la trasformazione di una verga rettilinea in diapason a rebbi:

Le vibrazioni della verga che nella condizione rettilinea sono esemplificate nelle fig. a) e a') rimangono inalterate e pertanto possono trovare esemplificazione come è riportato in fig. b)



# Classificazione delle percussioni

La classificazione degli strumenti a percussione può avvenire con vari criteri che dipendono dalla loro costruzione, dall'origine etnica, dalla loro funzione orchestrale etc.

A volte le percussioni sono classificate tra “pitched” e “unpitched”. Anche se valida, questa classificazione risulta alquanto inadeguata.

La maggior parte degli strumenti a percussione, se classificati nella maniera in cui si produce il suono, secondo la famosa divisione dei pionieri Erich von Hornbostel e Curt Sachs per la classificazione degli strumenti musicali, si trovano nelle classi degli **idiofoni** e **membranofoni**.

La maggior parte dei **cordofoni** sono solitamente definiti come strumenti a corda, ma alcuni di questi sono anche a percussione (come l'hammered dulcimer e il piano)

Molti **elettrofoni** sono anche strumenti a percussione (drum machines etc)





# Idiofoni

Gli idiofoni sono strumenti il cui suono è prodotto dalle vibrazioni dello stesso materiale con il quale sono costruiti. Il loro sviluppo incominciò molte migliaia di anni or sono, quando l'uomo preistorico percosse tra loro bastoni, pietre e ossa, per sottolineare i ritmi prodotti con il battito delle mani e con il calpestio dei piedi. Molti degli idiofoni primitivi, realizzati con materiali naturali, vengono ancora oggi utilizzati per accompagnare il canto o la danza o come strumenti da segnale.

Negli strumenti musicali idiofoni il suono è prodotto con la vibrazione del corpo stesso dello strumento, senza l'utilizzo di corde o membrane.

Molti strumenti a percussione che non sono tamburi sono idiofoni e la maggior parte di questi hanno origini occidentali.



Questi strumenti sono classificati come idiofoni a percussione e vengono suonati colpendoli direttamente, con le bacchette o con le mani (come il triangolo), o indirettamente a seguito di scuotimento (come maracas o cabasa). Gli strumenti nelle sottocategorie frizione, pizzico, e ad aria sono di rara diffusione.

Gli idiofoni sono realizzati in materiali diversi, come il metallo, il legno, l'osso e le materie plastiche. Gli strumenti a suono determinato sono suonati controllando la nota prodotta, e rispettando le regole dell'armonia come per gli altri strumenti con la stessa caratteristica. Gli strumenti a suono indeterminato sono utilizzati invece per la scansione dei ritmi, o con funzione di abbellimento.

# Membranofoni

I membranofoni sono strumenti il cui suono è prodotto da una membrana o da una pelle, tesa sopra un telaio, posta in vibrazione. Della famiglia dei membranofoni fanno parte i **tamburi** (bipelle, monopelle), presenti in varie foggie e realizzati con materiali diversi in ogni parte del mondo, e i più rari **mirlitons**. Le più antiche fonti iconografiche che attestano l'uso dei tamburi, risalgono alle civiltà mesopotamiche e a quella egiziana.

Gli strumenti musicali della classe dei membranofoni si dividono in due famiglie fondamentali che hanno in comune lo stesso materiale vibrante, una membrana tesa: I **mirliton** e i **tamburi**.

I **mirliton** emettono il suono per mezzo della vibrazione di una membrana tesa che viene sollecitata dalla voce dell'esecutore e entra in vibrazione aggiungendo frequenze di disturbo alle frequenze vocali, con la conseguenza di modificare il timbro dell'esecutore (es Kazoo).

I **tamburi** emettono il suono per mezzo della vibrazione di una membrana tesa che può essere sollecitata in numerose maniere.





# Tamburi

**Tamburo sonaglio:** la membrana viene sollecitata da oggetti contenuti all'interno del fusto del tamburo che viene agitato come un sonaglio (Es. indiani d'america).

**Tamburo a frizione rotante:** la membrana riceve le vibrazioni da una corda fissata al suo centro e imperniata con un nodo scorsoio ad un bastoncino in modo che il tamburello possa roteare. Se ne produce un cra cra dovuto all'effetto Doppler indotto sull'ascoltatore (Es raganella romagnola e di altre zone del mediterraneo).

**Tamburo percosso:** la membrana viene sollecitata con le mani, con mazzuoli, con spazzole di filo di ferro (batteria), con mazzuoli imbottiti (Timpano orchestrale).

**Tamburo a percussione indiretta, tamburo tibetano:** la percussione è indotta dalla rotazione su se stesso, alternativamente del tamburo che così riceve la percussione di battenti legati all'esterno che per il brusco cambio di rotazione vanno a collidere sulle membrane.

**Tamburo a frizione:** la frizione è ottenuta sfregando le membrane con le mani o con un bastone appoggiato o imperniato al centro della membrana (es. puti pu napoletano). Nel coccodè del galletto romagnolo la frizione è ottenuta tirando con le dita una cordicella legata al centro della membrana; le dita scorrono sulla cordicella evocando il suono del coccodè del galletto.

La **forma dei fusti** del tamburo può essere molto varia; ecco alcuni esempi: **fusto a cornice** a **cono** a **cono rovesciato** a **botte cilindrico** a **caldaia** (Timpani) ecc.

Le membrane sollecitate possono essere due (**tamburo bipelle**); oppure una sola una sola col tamburo chiuso alla estremità opposta o chiuso da un'altra membrana (in ogni caso si dice monopelle).

La membrana è costruita con materiali sintetici o naturali, fra cui la **pelle animale**, il **mylar**, ed altri. Per massimizzare la vibrazione della membrana, alcuni strumenti come i tamburi della batteria, utilizzano una **membrana** cosiddetta **risonante**, che influenza comunque il timbro in relazione alla sua tensione. In tal caso, la membrana su cui viene generata la vibrazione iniziale viene indicata come **battente**.

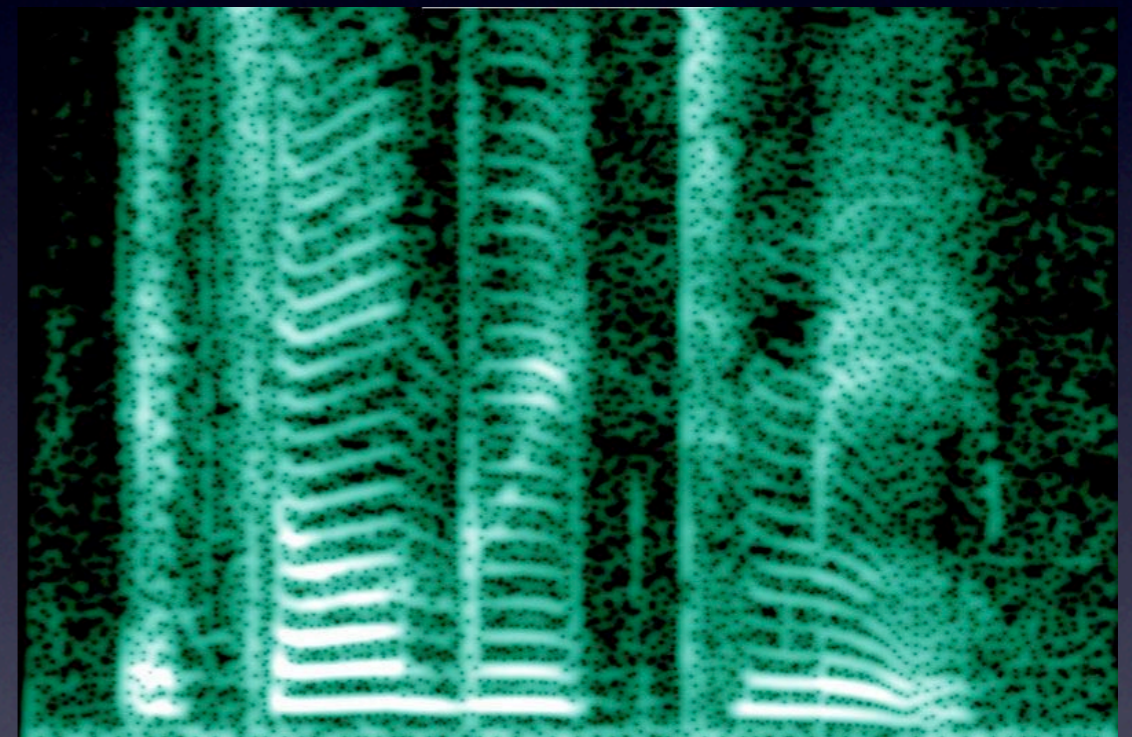
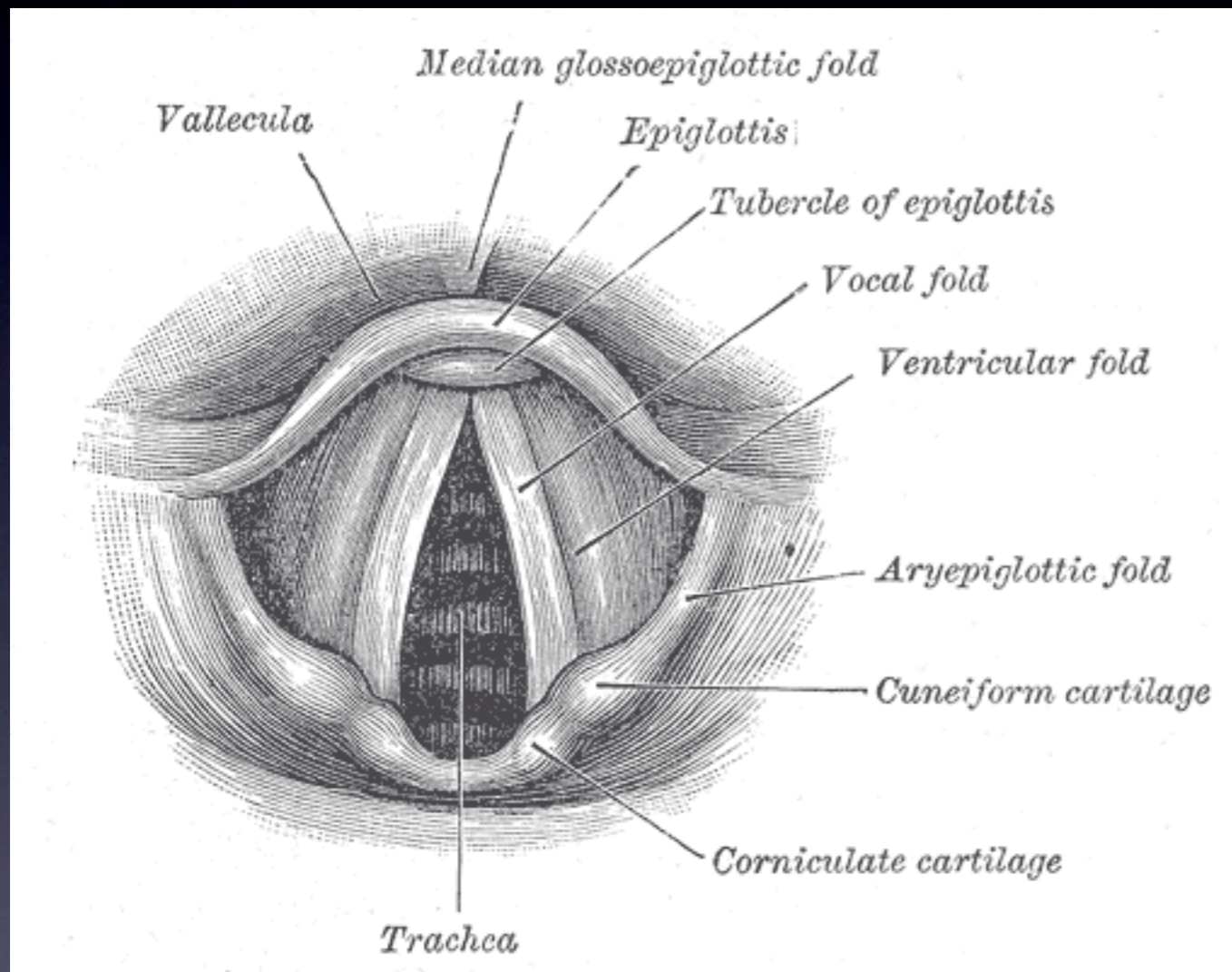
Per enfatizzare il suono molti membranofoni utilizzano un **cilindro risonante**, il fusto, che raccoglie le vibrazioni della membrana nella zona di contatto con la stessa. Il materiale di cui è costituito il fusto caratterizza il **timbro** dello strumento, che ha un suono caldo nei casi di fusti di materiale naturale, come il legno, ed un suono più squillante e con più armonici nel caso di fusti in metallo o in materie plastiche.

I **tiranti** sono utilizzati per intonare lo strumento, nel caso di strumenti a suono determinato, o per ottimizzare la risonanza con il fusto per gli strumenti a suono indeterminato. I tiranti possono essere delle viti di metallo che avvitano in appositi blocchetti ed applicano una forza su un cerchio superiore alla membrana ed esterno al fusto, o tiranti in corda, questi ultimi più diffusi nelle percussioni artigianali.





# La voce umana



# La voce umana

Si tratta della sorgente sonora più sottile e versatile, i cui effetti sono forse tanti, quanti ne possono suggerire l'inventiva, l'emozione e l'intenzione, sia nella parola sia nel canto.

Anche l'uso del fiato potrebbe fare pensare alla collocazione di questa sorgente in categoria affine a quella delle canne sonore, bisogna dire che ciò non sarebbe esatto, in quanto le caratteristiche fisiche e fisiologiche dell'organo vocale esigono una considerazione del tutto particolare.

Uomini e donne hanno differenti corde vocali di dimensioni differenti; i maschi adulti hanno solitamente voci più basse e corde più grosse. Le corde vocali maschili sono tra i 17 e i 25 mm in lunghezza. Le femmine hanno corde più piccole tra i 12.5 e i 17.5 mm in lunghezza.

Come si vede dalla figura nella pagina precedente, le corde sono situate proprio sotto la trachea. Il cibo e l'acqua non passano tra le corde vocali ma presso l'esofago che è un tubo scollegato. Entrambi i tubi sono separati dall'epiglottide, uno "sportello" che ricopre l'apertura della trachea quando si inghiotte.

Il suono della voce di ogni individuo è veramente unico, non solo per la differenza tra la grandezza e la forma delle corde vocali, ma anche per la grandezza e la forma del resto del corpo della persona.

L'essere umano ha cavità vocali che possono far allentare, tirare o cambiare il loro spessore.

La forma del torace e del collo, la posizione della lingua, e lo spessore di altri muscoli può essere alterata. Ognuno di queste azioni può causare un cambiamento del pitch, volume, timbro, o tono del suono prodotto.

Il suono tra l'altro risuonano tra diverse parti del corpo e la costituzione e la struttura ossea possono variare il suono prodotto. I cantanti imparano anche a produrre dei suoni in alcuni modi usando le risonanze migliori all'interno del loro corpo (risonanza vocale).



# Descrizione della fonazione nella voce umana:

1. **Polmoni:** per quanto riguarda la fonazione possono essere considerati dei veri serbatoi d'aria funzionanti come mantici.

Da questi l'aria viene spinta verso il tubo ristretto bronco-tracheale, dove per la pressione esercitata da loro stessi, si determina una tensione che provoca la reazione delle corde vocali inferiori.

2. **Corde Vocali:** le corde vocali inferiori non sono, e neppure somigliano, a corde nel senso comune del termine. Le corde vocali superiori non sembrano essere di alcuna utilità per la fonazione.

Si tratta di un tessuto simile a labbra, la cui superficie inferiore è coperta da un rivestimento membranoso, di tipo molle, attaccato solo ai margini delle ripiegature muscolari.

La reazione delle corde vocali, ognuna delle quali è fissata su tre lati, si manifesta mediante vibrazioni la cui frequenza è correlata con la tensione delle corde stesse e con la pressione dell'aria.

La naturale ricerca dell'equilibrio di tutto il sistema, turbato dalla pressione, che è persistente, provoca il periodico allargarsi e restringersi delle corde, che nell'uomo sono più spesse che nella donna: dal **periodo** di questo movimento dipende, appunto, la frequenza delle vibrazioni e l'altezza del suono.

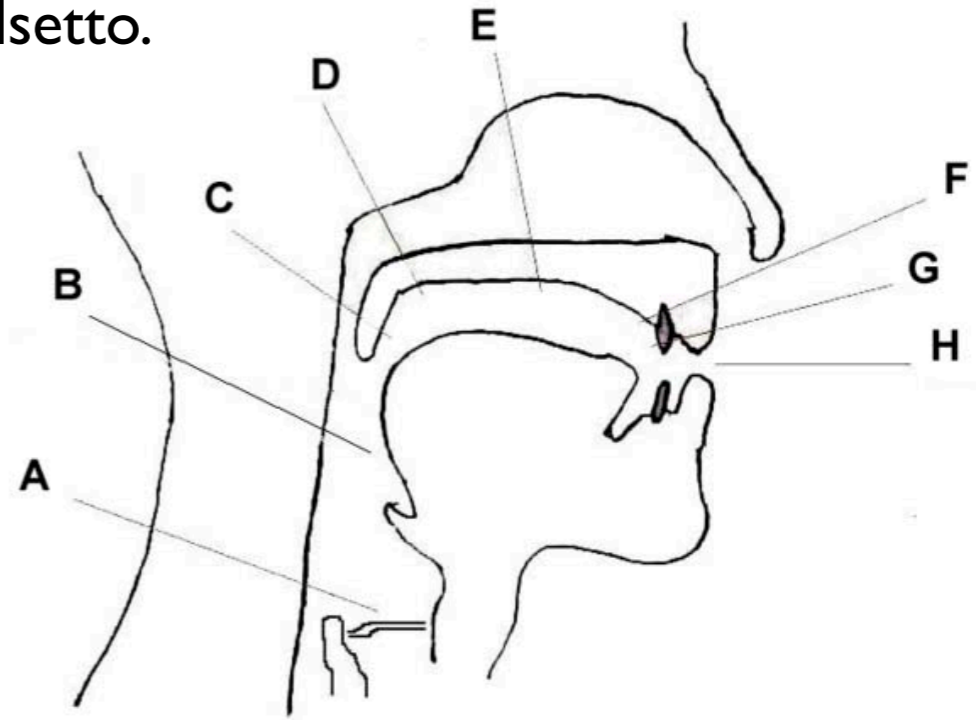
Le vibrazioni delle corde vocali non sviluppano però energia bastante a generare suoni di sufficiente intensità:

**3. Cavità dell'organo vocale:** da quelle inferiori a quelle superiori, che possono variare il loro volume in relazione alla frequenza, provvedono ad amplificare, mediante **risonanze**, l'intensità del suono, che dal più flebile sussurro può arrivare alle più grandi potenze canore.

# Il Canto

La voce umana è un suono prodotto dalla vibrazione delle corde vocali per effetto dell'aria espirata dai polmoni mediante occlusione della glottide. Nell'uso canoro il suono della voce è caratterizzato dalle risonanze della trachea, della faringe e della bocca, ed eventualmente delle altre cavità (seni) facciali e craniali; i timbri vocali che si ottengono dipendono anche dal meccanismo di produzione della voce. A seconda del modo in cui la voce viene prodotta si possono distinguere tre tipi di emissione: la voce ingolata, la voce impostata e il falsetto.

L'apparato fonatorio: A Glottide - B Faringe - C Velo del palato - D Palato molle - E Palato duro - F Alveoli - G Denti - H Labbra



## Voce impostata

La voce impostata è il modo corretto di produrre suono con la voce; cantando con voce impostata (che non sempre è una abilità naturale, ma deve essere appresa con lo studio) si producono suoni di qualità migliore, più omogenei timbricamente, si è capaci di maggiore volume sonoro ma soprattutto si è in grado di cantare per un tempo prolungato senza incorrere in danni alle corde vocali. La voce impostata consiste nel far risuonare una delle cavità corporee nominate più sopra accoppiandola all'oscillazione delle corde vocali, che iniziano la vibrazione con la loro adduzione per rotazione all'indietro delle cartilagini aritenoidi.

Il suono della voce impostata è potente, rotondo e pieno, duttile; mantiene queste caratteristiche in ogni condizione di emissione, acuti o bassi, piani o fortissimi.

## Voce di gola

La voce di gola è il modo in cui si emette il suono quando si parla, affidando la variazione della tonalità alla maggiore o minore tensione delle corde vocali (maggiore o minore sforzo adduttivo delle aritenoidi). Durante il canto, la tensione delle corde vocali e la forte vibrazione che devono sostenere porta rapidamente all'affaticamento del cantante e a lesioni delle corde stesse (edemi, noduli ecc.). Il suono della voce di gola è rigido e piatto, simile ad un grido: questa somiglianza è evidente soprattutto negli acuti e nei fortissimi. Il timbro cambia a seconda della potenza e dell'altezza.

## Falsetto

Il falsetto è un particolare modo di vibrazione delle corde vocali che permette di emettere le note più acute con meno sforzo, o in alternativa di emettere note più acute di quanto si potrebbe fare con mezzi normali: si produce per stiramento delle corde vocali in seguito all'inclinazione della cartilagine tiroide, che provoca una vibrazione "per giustapposizione" delle corde stesse invece che per battimento. Questo modo di emissione può essere un effetto voluto oppure un riflesso automatico della laringe, che se forzata a emettere suoni più acuti di quanto può fare (o se è affaticata) si protegge emettendo suono in falsetto. I cantanti addestrati possono controllare la zona di passaggio dagli acuti in voce piena a quelli in falsetto, ottenendo il cosiddetto falsettone, una tecnica usata spesso nelle opere barocche. Per quanto detto, il suono di una voce in falsetto è più acuto e meno potente della voce normale, ed è più sibilante e meno ricco di sonorità (contiene meno armonici).

Esempi di cantanti di musica leggera e di musica rock che ricorrono al falsetto sono *Philip Bailey, Matthew Bellamy, Ville Valo, Jeff Buckley, Robert Plant, John Frusciante, Chris Martin, Bono, Vince Neil, Axl Rose, Amir Hoxha, Justin Hawkins, Tiny Tim, Thom Yorke, Jimmy Sommerville, Mika e Bee Gees.*

Tipico esempio di canto in falsetto è poi quello di alcuni cantanti melodici italiani del secolo scorso come *Luciano Tajoli e I cugini di campagna.*



# Registri vocali

Un'altra delle maggiori influenze sul suono e la produzione della voce è la funzione della laringe che le persone possono manipolare in differenti modi per produrre differenti suoni. Questi tipi differenti di funzioni laringee sono descritte come differenti tipi di registri vocali.

Un registro nella voce umana è una particolare serie di toni, prodotti nello stesso modo vibratorio della cavità vocale, e possedenti le stesse qualità. I registri originano nella funzione laringea. Questi esistono perché le cavità vocali sono capaci di produrre molti diversi modi vibratorii.

Ognuno di questi modi vibratorii è compreso entro un particolare range di pitch e produce alcune note caratteristiche.

Con la parola “registro vocale” può essere usato in vari contesti riguardanti la voce.

Un registro vocale consiste in una gamma di suoni che viene prodotta a livello fisiologico con gli stessi meccanismi e che di conseguenza mostra caratteristiche di omogeneità all'ascolto.

La foniatra distingue tra registri primari e secondari.

I registri primari sono caratterizzati esclusivamente da una modalità di vibrazione delle corde vocali, quelli secondari anche dall'assetto del tratto vocale.

I registri primari sono i seguenti quattro in ordine di altezza tonale, anche se il primo e l'ultimo hanno un utilizzo molto raro.

**Vocal Fry (M0):** le corde vocali durante la vibrazione sono flaccide e hanno una superficie di contatto irregolare; il quoziente di chiusura è molto alto e l'aria esce in singoli scoppietti udibili singolarmente; la frequenza è molto bassa, fino a 20 Hz. Il suono all'ascolto può ricordare il verso di una rana.

**Meccanismo Pesante (M1):** le corde vocali sono spesse e la massa vibrante è grande; l'azione del muscolo tiroaritenoidico è prevalente su quella del muscolo cricotiroideo; il quoziente di chiusura è più elevato che nel meccanismo leggero. È il tipo di fonazione utilizzato comunemente per parlare.

**Meccanismo Leggero (M2):** le corde vocali sono assottigliate e la massa vibrante è ridotta; l'azione del muscolo cricotiroideo è prevalente su quella del muscolo tiroaritenoidico; il quoziente di chiusura è più basso che nel meccanismo pesante. È un suono molto più chiaro di quello del meccanismo pesante. A volte viene definito “falsetto”, ma tale definizione dà adito a confusione perché lo stesso termine definisce anche alcuni registri secondari.

**Fischio (M3):** le corde vocali sono quasi immobili con una massa vibrante molto ridotta e concentrata sulla porzione anteriore. È un registro utilizzato raramente, che all'ascolto ricorda molto un fischio effettuato con le labbra.

I registri secondari si originano dai **primari**, con l'aggiunta di **fattori di risonanza** che li differenziano.

# Vibrazioni armoniche nella voce

Anche la voce umana, al pari di qualsiasi altra sorgente sonora, è dotata di vibrazioni armoniche generate dalla frequenza fondamentale, che si manifestano essenzialmente nelle **vocali** e con particolare rilievo nel canto.

Le **consonanti**, invece, non hanno un suono definito se non congiuntamente ad una vocale.

Rumori di vario tipo possono essere emessi dall'organo vocale: in questi casi si tratta sempre di vibrazioni acustiche di varia altezza in rapporto disarmonico tra di loro.

# Tessitura delle diverse voci umane:

(valori medi)	da (Hz)	a (Hz)
soprano	262	1046
contralto	175	784
tenore	116	523
baritono	98	415
basso	55	294



# Legge di Young



In un corpo elastico atto a vibrare, nel luogo dove agisce la forza eccitatrice non possono formarsi punti nodali: saranno pertanto impedito tutte le vibrazioni armoniche che avrebbero dovuto avere uno di questi punti nella zona interessata

Secondo le più recenti acquisizioni scientifiche, la legge di Young non ha il valore e l'estensione assoluta che esprime la sua enunciazione, la quale vale integralmente per la prima delle armoniche che cade sotto la sua "giurisdizione" e gradualmente meno per le altre.

Questo affinamento del giusto valore della legge di Young non deve però far pensare che sia il caso di rivedere la teoria e la pratica del **punto di tocco** negli strumenti a corda: questo sta benissimo come viene insegnato e praticato; poiché ha risolto, attraverso una multisecolare esperienza, tutti i problemi del caso.

Quello che è cambiato è soltanto la teorizzazione della legge di cui trattasi.

La questione è chiara se si pensa che la pressione esercitata dalla forza eccitatrice determina necessariamente una zona ventrale e già sappiamo che dove si forma un ventre non può coesistere un nodo: sarebbe una contraddizione perché i ventri sono zone di movimento e i nodi sono punti dove il movimento è nullo.

Negli strumenti a corda la legge di Young ha un'applicazione costante, che la pratica suggerì ancor prima che lo stesso young ne enunciasse i termini sotto il profilo fisico.



# Young e il pianoforte

Il martelletto del pianoforte, ad esempio, percuote la corda a circa  $1/8$  della sua lunghezza, determinandovi una zona ventrale che ostacola l'insorgere delle armoniche 7, 8, 9, le quali richiedono in quella stessa zona la formazione di un punto nodale. La scelta del punto di percussione è stata fatta allo scopo di sopprimere, nel limite possibile, le armoniche 7 e 9, il cui apporto alla formazione qualitativa del suono è indesiderabile.

Che poi, causa la vicinanza dei rispettivi punti nodali, si sopprima anche l'ottava armonica, ciò rappresenta l'onere che bisogna pagare per ottenere il risultato voluto.

La durata di una percussione è sempre molto breve, quasi istantanea, mentre il suono che si produce può essere anche molto lungo, pur essendo gradualmente smorzato. Se l'effetto dovuto alla legge di Young è massimo nel momento della percussione, esso diminuisce man mano che il suono si prolunga, in quanto il perdurare delle vibrazioni, nonostante il decremento continuo della loro ampiezza, tende a ripristinare la situazione naturale del sistema vibratorio.



# Young e gli strumenti ad arco

Negli strumenti ad arco, la legge di Young è invece più efficace, poiché il contatto con la corda è regolarmente intermittente. Questo caso è molto significativo anche per altre ragioni.

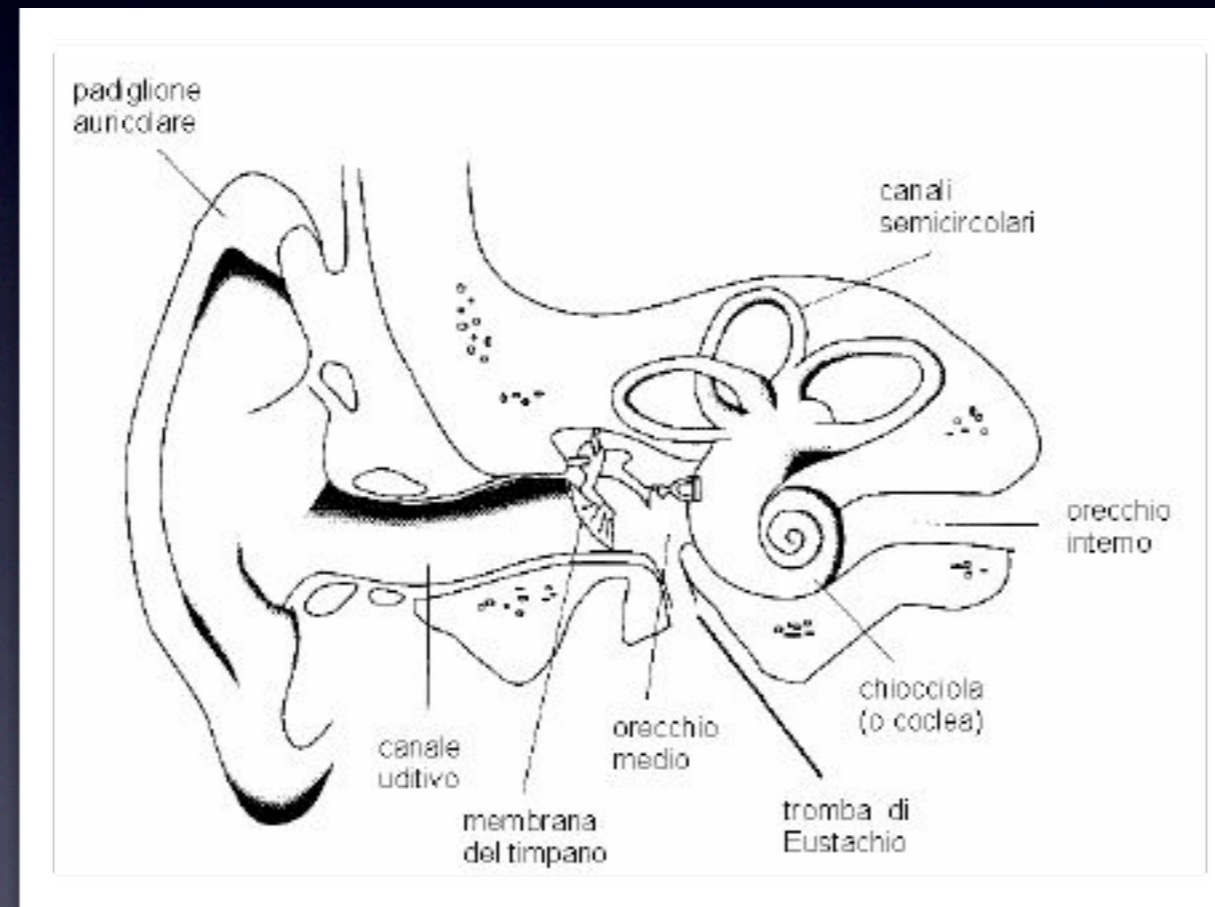
Non è raro infatti di trovare in varie partiture la prescrizione di “suonare sulla tastiera” oppure “sul ponticello”:

nel primo caso il suonatore deve spostare l’arco dalla sua posizione normale, portandolo approssimativamente sulla metà della corda, questo punto è sede di un nodo per tutte le armoniche di ordine pari, le quali subiranno attenuazioni causa la pressione normalmente esercitata dall’arco sul punto stesso.

I suoni ottenuti con l’arco portato sulla tastiera sono quindi composti quasi esclusivamente da armoniche di ordine dispari e il loro timbro è alquanto opaco e poco penetrante.

L’altra prescrizione, ossia quella di suonare “sul ponticello”, ha uno scopo del tutto diverso: anche in questo caso la legge di Young conserva sempre il suo valore, ma il luogo dell’eccitazione è così vicino a uno dei punti terminali delle corde, da rendere praticamente possibile il formarsi di un grande numero di vibrazioni armoniche, dalla cui presenza dipende il timbro quasi metallico che ne consegue.

# Il Sistema Uditivo



L'orecchio è un trasduttore estremamente sensibile e risponde alle variazioni di pressione provocate dalle compressioni e rarefazioni causate dalle onde sonore mediante una serie di processi correlati che si verificano all'interno dell'organo uditivo.

Quando arrivano all'ascoltatore, le onde di pressione sonora sono raccolte nel canale auricolare tramite la parte esterna dell'orecchio (**pinna**) e poi indirizzate al timpano. Le onde sonore sono poi trasformate in vibrazioni meccaniche e trasferite alla parte interna dell'orecchio mediante tre ossicini (**martello, incudine e staffa**).

E' costituito da un sistema complesso di organi, aree, componenti e, attraverso numerosi passaggi, converte il segnale acustico in una serie di impulsi elettrici. E' suddiviso in tre zone:

**Orecchio esterno:** è costituito dal padiglione auricolare, dal canale uditivo fino alla membrana timpanica; ha lo scopo di raccogliere ed incanalare le onde sonore.

**Orecchio medio:** è formato da una catena di ossicini, dal timpano alla coclea; realizza un'importante amplificazione del segnale sonoro.

**Orecchio interno:** si compone della coclea e dei nervi cocleari che trasferiscono gli impulsi elettrici fino al cervello e pertanto trasforma lo stimolo meccanico in uno nervoso.

Le onde elastiche sonore, prima di essere trasformate in segnali elettrici subiscono una serie di modificazioni meccaniche nell'orecchio medio e in quello interno al fine di adattare l'impedenza del segnale, di amplificarlo e di discernere le sue frequenze costituenti il timbro.

Il **padiglione auricolare (pinna)** costituisce il primo elemento del sistema uditivo; è formato da una struttura cartilaginea. Consente di percepire la **direzione** della sorgente sonora e **riflette** e **concentra** le onde sonore indirizzandole nel canale uditivo esterno, lungo circa 25 mm, che termina nella **membrana timpanica**.

La combinazione dei due padiglioni (sinistro, destro) consente il riconoscimento della locazione della sorgente sonora grazie ai piccoli **sfasamenti** che esistono tra le varie riflessioni di onde e che sono interpretabili dal cervello. Quello però che non possiamo fare è individuare l'esatta distanza della sorgente.

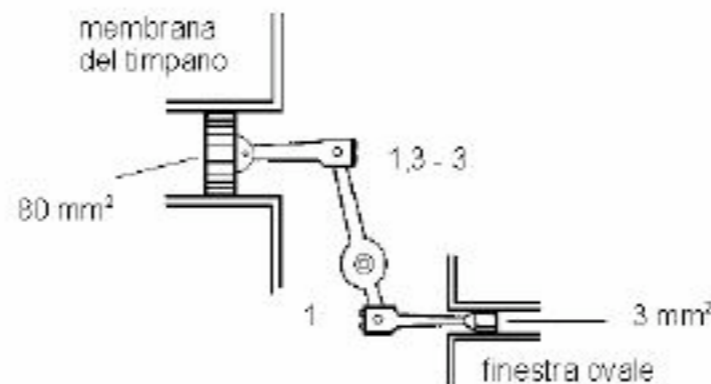


Il **canale uditivo** e la **membrana del timpano** sono praticamente una canna aperta ad un'estremità e pertanto risuonano intorno alla frequenza **3800 Hz** che rappresenta la massima sensibilità del sistema uditivo.

Le energie delle onde sonore udibili, pur essendo molto modeste, sono in grado di esercitare efficaci pressioni sulla membrana timpanica facendola oscillare verso l'esterno e l'interno ovvero longitudinalmente con il canale uditivo.

Lo spostamento del timpano si ripercuote sulla catena degli **ossicini dell'orecchio medio** (**martello, incudine e staffa**) i quali hanno una duplice funzione: quella di essere **adattatori di impedenza**, per consentire il passaggio delle onde sonore dall'ambiente **gassoso** (orecchio esterno e medio) a quello **liquido** (orecchio interno) e, grazie ai bracci di leva con cui lavorano, quella di consentire un'**amplificazione del segnale** di circa **20-30 decibel** soprattutto per le frequenze medie. L'amplificazione avviene grazie al rapporto che esiste tra l'area del timpano, pari a  $80 \text{ mm}^2$  e quella della finestra ovale, pari a  $3 \text{ mm}^2$  (è lo stesso effetto che si avverte quando una tubatura riduce la sua sezione: in liquido che scorre al suo interno accelera passando dalla sezione maggiore a quella minore).

Fungono anche da **protezione** (riducendo il livello dei transienti sonori più elevati, come i tuoni o le esplosioni).



# Cosa succede se il suono ha un'intensità troppo elevata?

Il sistema uditivo adotta dei meccanismi di difesa costituiti: da un **irrigidimento della membrana timpanica** che ne blocca l'eccessiva oscillazione e dall'**allontanamento della staffa dalla finestra ovale** (in modo tale da diminuire il trasferimento dell'oscillazione alla coclea).

Comunque sia, il timpano non è in grado di sopportare l'eccessiva oscillazione provocata da onde sonore la cui intensità è superiore ai **160 dB**: in tal caso avviene la rottura della membrana timpanica.

Le onde sonore, amplificate nell'orecchio medio, vengono trasmesse al contenuto liquido della **coclea** dall'azione della staffa che comunica con l'orecchio interno tramite la finestra ovale che è rivestita da una membrana flessibile.

La **coclea** è un organo di forma tubolare, simile a una chiocciola, che contiene due camere riempite di un liquido; è costituita da un condotto, lungo circa 35 mm e largo all'imboccatura 2 mm, che è avvolto a spirale per circa quattro giri a forma di chiocciola. E' in quest'organo che avviene la **trasduzione** degli **impulsi meccanici** in **elettrici**.

Il **condotto** è suddiviso per tutta la sua lunghezza in tre compartimenti riempiti di liquido: il **dotto cocleare** (riempito dal liquido chiamato endolinfa), la **rampa vestibolare** e la **rampa timpanica**. La scala vestibolare e quella timpanica sono in comunicazione all'estremità della coclea (elicotrema) dove termina a fondo cieco. Il dotto cocleare è isolato dalle altre due grazie alla membrana di Reissner e alla membrana basilare (che lo separa dalla scala timpanica). Lungo la membrana basilare si trova L'**Organo del Corti**, contenente i **recettori**, ovvero le **cellule ciliate** (mostrate nella figura sottostante), ed è avvolto da una membrana gelatinosa chiamata **tectoria**: le vibrazioni trasmesse alle ciglia bagnate dal liquido (le quali rispondono alle diverse frequenze a seconda della loro posizione lungo l'organo) si traducono in stimolazioni neurali che ci danno la sensazione uditiva.

**La perdita dell'udito si ha generalmente quando queste ciglia sono danneggiate o si deteriorano a causa dell'età.**



I movimenti alternati della staffa sulla finestra ovale esercitano pressioni variabili sul fluido (perilinf) che riempie la scala vestibolare e, poiché trattasi di un liquido praticamente incomprimibile, si determina un movimento alternato della membrana e delle pareti elastiche della coclea che vengono poste in oscillazione.

A causa delle caratteristiche meccaniche della struttura, l'oscillazione è più marcata in prossimità del giro basale se il suono è acuto, mentre è più marcata in prossimità del giro apicale se il suono è grave. I movimenti oscillatori che si creano nella membrana basilare provocano la deformazione dell'**Organo del Corti** che rappresenta la struttura cardine per la **trasduzione del segnale**.

Le deformazioni dell'organo del Corti inducono l'attivazione o l'inibizione di **due** tipologie di **cellule recettoriali** che sono situate sulla membrana basale: le **cellule ciliate esterne** (OHC) e le **cellule ciliate interne** (IHC) che sono fornite appunto di **cilia** che le collegano alle fibre nervose. In entrambe i tipi cellulari l'attivazione avviene a causa della deflessione delle cilia, conseguente alla modificazione della loro forma tramite un rapidissimo accorciamento (che permette di individuare frequenze comprese da 20 a 20.000 Hz), e comporta una variazione della polarizzazione delle cellule stesse.

Le OHC sono disposte su più file e in numero pari a circa 24.000; sono in grado di rispondere all'attivazione con una rapida deformazione meccanica dei corpi cellulari (si piegano) possono trasdurre frequenze anche di 20.000 Hz e, grazie ad un meccanismo di retroazione, accentuano il movimento della membrana tectoria e la deformazione delle IHC causando un'**amplificazione del segnale di circa 40 decibel** (amplificatore cocleare).



Le **IHC** rappresentano le **vere cellule recettoriali** essendo le sole **connesse con le fibre del nervo acustico**. Consentono l'accesso dell'informazione acustica trasformata in codice elettrico (potenziali d'azione) alle strutture centrali grazie alla variazione della loro polarizzazione che, di conseguenza, induce una variazione della frequenza di scarica del neurone sensitivo che è collegato a loro.

I **segnali** provenienti dalle **due orecchie** vengono **combinati direttamente nel sistema nervoso** dove le vie uditive centrali operano una separazione delle informazioni riguardanti il tempo di arrivo dei segnali e la loro intensità consentendo l'**analisi per individuare la provenienza dei suoni nello spazio**.

Queste informazioni vengono trasmesse in canali paralleli alla **corteccia uditiva** dove si costruisce una **mappa** delle **caratteristiche binaurali** relative al **tempo**, alla **intensità** e alla **frequenza** dei segnali acustici.

# Direzione e Spazio

# La percezione della direzione

Un orecchio soltanto non riesce a discernere la direzione da cui proviene un suono; per fare ciò sono necessarie entrambe le orecchie.

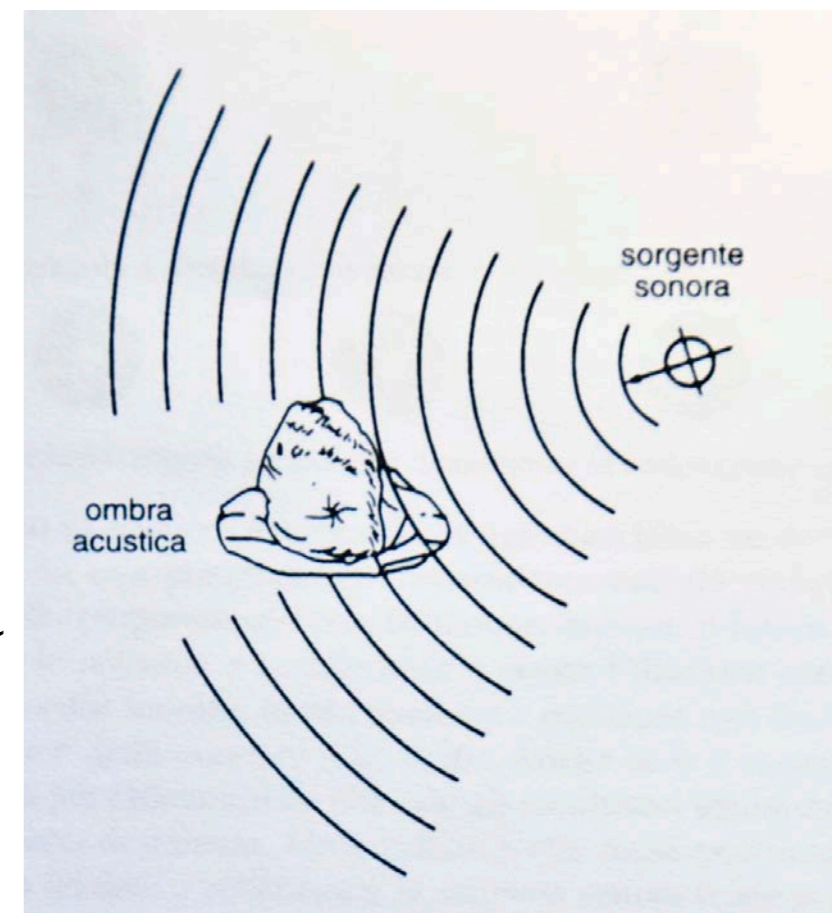
La capacità delle due orecchie di individuare una sorgente sonora in uno spazio è detta **localizzazione spaziale o binaurale**.

E' l'effetto risultante dell'utilizzo di tre informazioni (percepite dalle orecchie):

1. differenze di intensità fra le orecchie
2. differenze di tempi di arrivo alle orecchie
3. influenza della pinna (parte esterna dell'orecchio)

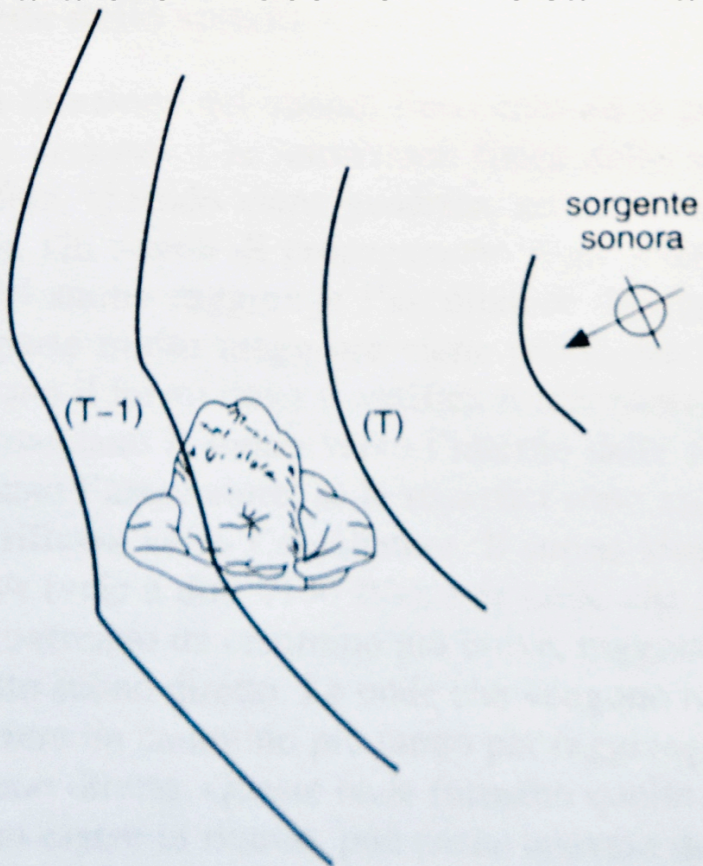


Ad esempio: i suoni di frequenze medie e alte provenienti dalla parte destra arrivano all'orecchio destro con un livello di intensità superiore rispetto all'orecchio sinistro, provocando quindi una differenza di intensità fra le orecchie. Tali differenze si verificano perché la testa funge da ombra acustica permettendo solo ai suoni riflessi dalle superfici circostanti di raggiungere l'orecchio sinistro (fig. a lato).



Dato che i suoni riflessi fanno un percorso più lungo e perdono energia ad ogni riflessione, l'intensità del suono percepito dall'orecchio sinistro risulta ridotta e il cervello comprende che il suono derivante proviene dalla destra.

Questo effetto non assume grande importanza per le basse frequenze, le cui lunghezze d'onda sono molto superiori al diametro della testa e possono facilmente curvarsi attorno alla sua ombra acustica. Un altro metodo di localizzazione noto come differenze di tempi di arrivo fra orecchie, è usato alle basse frequenze.



Sia nella prima che nella seconda figura sono illustrate piccole differenze di percorso delle onde sonore, dato che la lunghezza del percorso per giungere fino all'orecchio sinistro è leggermente superiore a quella del percorso fino all'orecchio destro. La pressione sonora è quindi recepita all'orecchio sinistro in un istante di tempo successivo rispetto all'orecchio destro; questo metodo di localizzazione, in combinazione con le differenze di intensità fra le orecchie ci dà le informazioni per la localizzazione laterale sull'intero spettro udibile.



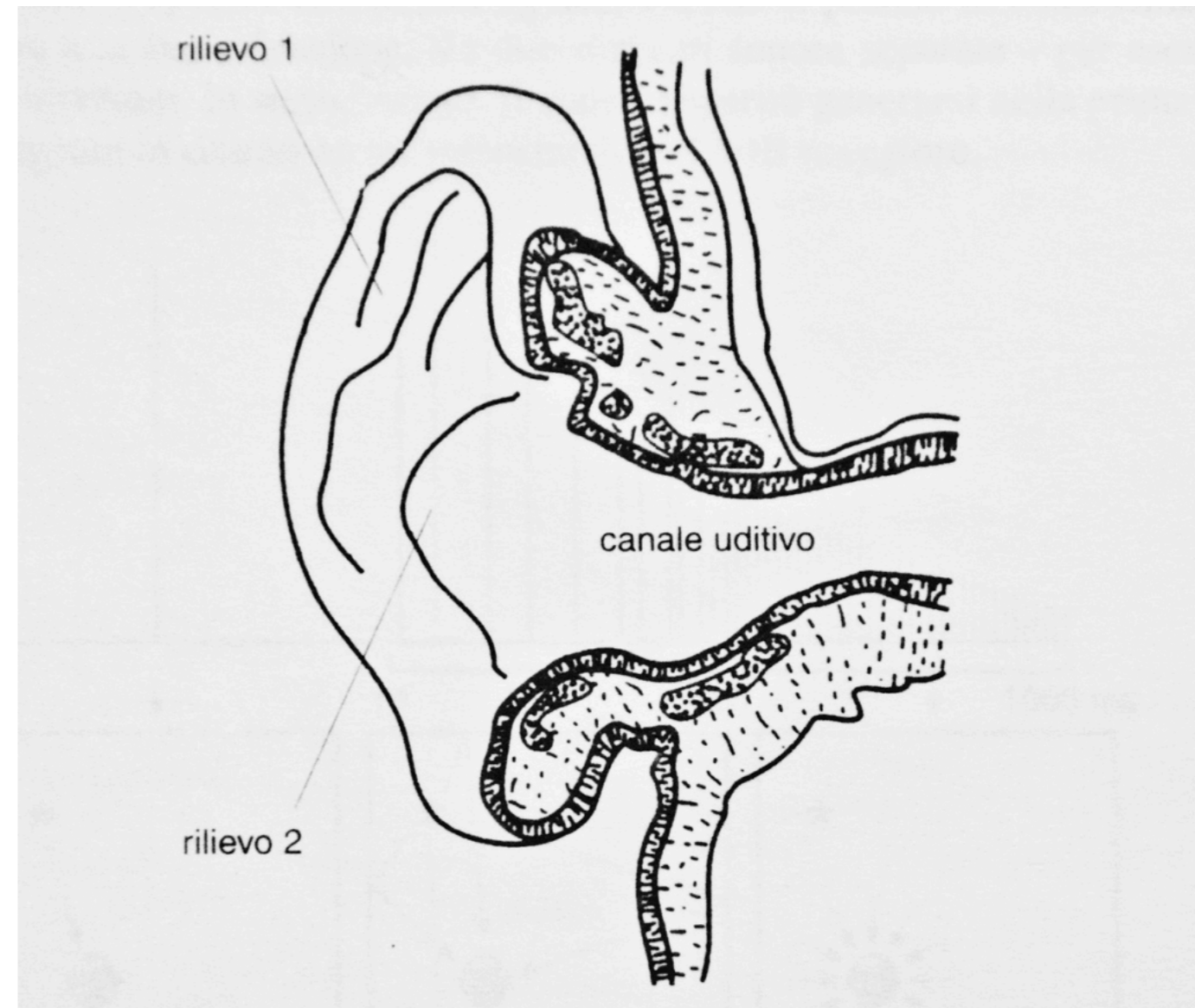
Le informazioni relative all'intensità e ai ritardi ci permettono di capire l'angolazione da cui proviene un suono, ma non se un suono si origina da davanti, da dietro o da sopra.

La pinna, comunque, usa due rilievi che riflettono il suono incidente nell'orecchio; tali rilievi introducono dei ritardi di tempo fra il suono diretto (che raggiunge l'ingresso del canale uditivo) e il suono riflesso dai rilievi stessi (che varia a seconda della posizione della sorgente).

E' interessante notare che da una posizione anteriore fino a  $130^\circ$  rispetto all'asse non ci possono essere riflessioni da parte dei rilievi della pinna, perché esse vengono bloccate dalla pinna stessa.

- I suoni non riflessi che sono in ritardo di un tempo compreso fra 0 e 80 microsecondi saranno percepiti come se si originassero da dietro.
- Il secondo rilievo produce ritardi fra i 100 e i 300 microsecondi, corrispondenti a una sorgente collocata entro il piano verticale.

Le riflessioni ritardate da entrambi i rilievi si combinano con il suono diretto per dare le caratteristiche colorazioni della risposta in frequenza che sono dovute a interferenze di fase distruttive e costruttive a frequenze diverse fra loro.



Il cervello è in grado di comparare queste colorazioni in ciascun orecchio e usare queste informazioni per determinare la localizzazione della sorgente.

Piccoli movimenti della testa forniscono ulteriori informazioni posizionali, dovute alla mutevole prospettiva della sorgente. Comunque queste ultime informazioni sono meno importanti rispetto alle altre localizzazioni.

Se non ci sono differenze fra ciò che percepisce l'orecchio destro e quello che percepisce l'orecchio sinistro, il cervello ritiene che la sorgente sia alla stessa distanza rispetto a ciascun orecchio.

Questo fenomeno permette ai fonici di posizionare un suono non solo nel monitor destro o in quello sinistro, ma anche fa i due monitor in maniera monofonica: inviando lo stesso segnale ai due monitor, il cervello percepisce il suono in maniera identica fra le due orecchie e ne deduce che la sorgente sonora proviene da una posizione perfettamente centrale rispetto all'ascoltatore.

Cambiando il livello proporzionalmente in ciascun monitor, il fonico cambia le differenze di intensità fra le orecchie e perciò riesce a creare l'illusione che la sorgente sonora sia posizionata fra i due monitor in una qualunque posizione egli desideri: questa tecnica di posizionamento è detta **panning**.

Anche se il metodo è ampiamente usato, non è quello più efficace, dato che solo gli ascoltatori equidistanti dai due monitor percepiranno l'effetto desiderato. Un ascoltatore che fosse posizionato molto vicino al monitor di sinistra tenderà a posizionare la sorgente sonora come proveniente da quella direzione, anche se il segnale è stato indirizzato a destra tramite il pan.

Esistono altri sistemi di localizzazione molto più efficaci, come ad esempio il delay digitale (DDL), il variatore di fase, filtri o tecniche di microfonaaggio stereofonico per assegnare un punto di localizzazione fra i due monitor.

# La percezione dello spazio

Oltre a riconoscere la direzione del suono, l'orecchio e il cervello interagiscono per riuscire a percepire la **distanza** e la sensazione fisica dello **spazio acustico** in cui un evento sonoro si verifica.

Quando viene generato, un suono si propaga dalla sorgente verso tutte le direzioni.

Gli angoli di propagazione sono determinati dalla natura della sorgente:

- una parte del suono raggiunge l'ascoltatore **direttamente**, senza incontrare alcun ostacolo
- una parte molto maggiore viene **propagata** in direzione delle molte superfici che racchiudono il luogo dove si verifica il fenomeno sonoro; se queste superfici sono **riflettenti**, rimandano il suono verso l'interno della stanza, e alcune di queste riflessioni raggiungeranno l'ascoltatore; se le superfici sono **assorbenti**, solo una piccola parte di energia verrà riflessa verso l'ascoltatore.

Il suono viaggia nell'aria ad una velocità costante di 344 m/s, e le onde che si muovono in linea retta verso l'ascoltatore, percorrendo un cammino più breve, raggiungono l'ascoltatore stesso per prime; questo è detto **suono diretto**.

Le onde che vengono riflesse dalle superfici circostanti devono percorrere un cammino più lungo per raggiungere l'ascoltatore e perciò arriveranno dopo il suono diretto. Queste onde formano quello che viene definito **suono riflesso** il quale, oltre ad essere in ritardo, può arrivare da direzioni diverse rispetto al suono diretto.

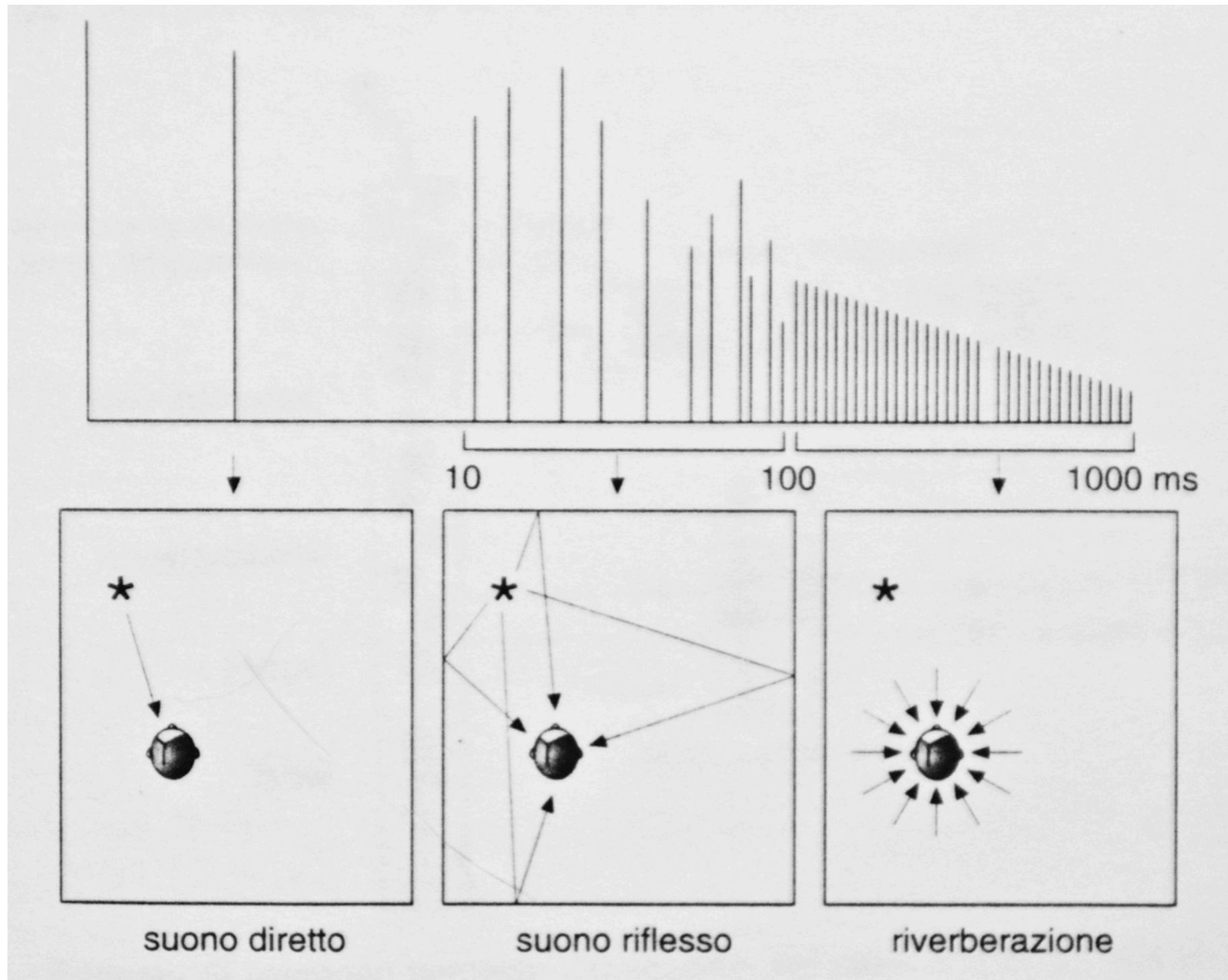
Come risultato di queste distanze aggiuntive percorse dal suono riflesso, l'orecchio percepisce un suono a volte anche **dopo** che la sorgente ha cessato di emetterlo (eco, riverbero).

Le superfici altamente riflettenti assorbono, ad ogni riflessione, una porzione di energia più piccola e consentono al suono di **persistere più a lungo** dopo che la sorgente cessa di emettere, rispetto a superfici più assorbenti che dissipano l'energia dell'onda.



# Suono in una stanza

Il suono che viene percepito in una stanza può essere suddiviso in tre categorie che si verificano in tempi successivi: suono diretto, prime riflessioni e riverberazione:



**Suono diretto:** determina la nostra percezione della posizione e della dimensione della sorgente sonora e trasmette il vero timbro della sorgente. L'ammontare di assorbimento che si verifica quando il suono viene riflesso da una superficie non è uguale a tutte le frequenze; perciò il timbro del suono riflesso è influenzato dalle caratteristiche della superficie che ha incontrato.

**Prime riflessioni:** raggiungono l'orecchio entro 50 millisecondi dal suono diretto; queste riflessioni sono il risultato di onde che hanno incontrato poche superfici prima di arrivare all'ascoltatore, e possono giungere da direzioni diverse rispetto al suono diretto.

**L'intervallo di tempo** che intercorre fra l'ascolto del suono diretto e l'inizio delle prime riflessioni fornisce informazioni sulla dimensione della stanza in cui si verifica l'evento sonoro. Più lontane sono le superfici rispetto all'ascoltatore, maggiore sarà il tempo che il suono impiega per raggiungerle e per venire poi riflesso verso l'ascoltatore stesso.

Il fenomeno acustico noto col nome di **effetto precedenza** o **effetto Haas** elimina la nostra percezione delle prime riflessioni fino ad un valore compreso fra gli 8 e i 12 dB, a seconda dell'intervallo di tempo che intercorre fra il loro arrivo all'orecchio e quello del suono diretto.

L'effetto Haas si applica in maniera uguale, sia che si prenda in considerazione una sorgente sonora e la sua riflessione, sia due sorgenti sonore separate - per esempio due monitor - che emettano lo stesso suono. Il suono apparirà generarsi nella prima sorgente anche se la sorgente ha un'intensità maggiore di 8-12 dB.

Un altro aspetto dell'effetto precedenza è detto fusione temporale. Le prime riflessioni che giungono all'orecchio umano entro 30 millisecondi dal suono diretto, oltre a non risultare udibili, sono effettivamente fuse con il suono diretto stesso.

L'orecchio umano non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo e considera le riflessioni come parte del suono diretto.

Il limite di tempo di 30 ms per la fusione temporale non è assoluto: dipende piuttosto dall'**involuppo** del suono.

La fusione si interrompe a **4 ms** nel caso di transienti, anche se può arrivare fino a **80 ms** nel caso di suoni che cambiano lentamente, come ad esempio il legato dei violini.

Nonostante le prime riflessioni siano soppresse e risultino amalgamate con il suono diretto, esse modificano la nostra percezione del suono, rendendolo più pieno e più intenso.

I suoni che raggiungono l'ascoltatore in un istante successivo a **50 ms** dopo il suono diretto, sono stati riflessi da un numero tale di superfici diverse che cominciano a raggiungere l'ascoltatore in un **flusso virtualmente continuo** e da **tutte le direzioni**.

Queste onde ravvicinate sono dette **riverberazione**: la riverberazione è caratterizzata da una **diminuzione graduale di ampiezza** e dal fatto che conferisce **calore** e **corposità** al suono; inoltre contribuisce anche alla sua **intensità**.

A causa delle molte riflessioni, il timbro della riverberazione è molto diverso rispetto al suono diretto, e la differenza principale è un taglio delle alte frequenze e una conseguente enfaticizzazione delle basse. Il tempo impiegato dal suono persistente per diminuire di 60 dB al di sotto del suo livello originale è detto **tempo di decadimento** o **tempo di riverberazione** ed è abbreviato **RT60**.

Le caratteristiche di riverberazione delle superfici di una stanza ne determinano il tempo di riverberazione. Il cervello percepisce il tempo di riverberazione e il timbro della riverberazione e usa queste informazioni per “costruire” un giudizio sulla qualità delle pareti, più riflettenti o più assorbenti.

L'intensità del suono diretto percepito dall'orecchio aumenta rapidamente se l'ascoltatore si avvicina alla sorgente sonora; nel frattempo l'intensità della riverberazione rimane la stessa essendo molto ben diffusa in tutta la stanza. La percezione del rapporto esistente fra suono diretto e suono riverberato permette all'ascoltatore di giudicare la distanza della sorgente sonora.

Per riassumere:

- il suono diretto fornisce le informazioni sulla **posizione**, sulla **dimensione** e sul **timbro**
- il tempo che intercorre fra la percezione del suono diretto e le prime riflessioni determina la nostra impressione sulle **dimensioni** della stanza di ascolto
- il tempo di decadimento della riverberazione ci dà info sulla **qualità delle pareti** della stanza
- la proporzione della riverberazione rispetto al suono diretto determina la nostra percezione della **distanza** dalla sorgente sonora.



# Effetto Haas

Negli anni '40 del secolo scorso il fisico **Helmut Haas** studiando la sensibilità del nostro udito, giunse alla constatazione di un'importante effetto: se da due sorgenti di suono, ad esempio due diffusori acustici, emetto due suoni in tutto uguali, ma dei quali uno emesso con un **ritardo** che va da **1 a 30 millisecondi** circa, **si percepirà il suono come proveniente unicamente dal diffusore che emette il suono senza ritardo.**

La spiegazione di questo fenomeno è da ricercarsi nella **fisiologia dell'apparato uditivo**. L'uomo possiede due orecchie proprio per localizzare la provenienza dei suoni. Un suono proveniente dalla nostra destra raggiungerà prima il nostro orecchio destro, successivamente il sinistro. Il nostro cervello riceve i due segnali provenienti dalle due orecchie, ne elabora il ritardo ed assegna la direzione della provenienza del suono.

**Introducendo dei ritardi artificiali**, noi riusciamo ad **ingannare il cervello**, che attribuirà la direzione di provenienza del suono verso quello dei due che gli arriva prima.

L'effetto Haas si verifica quando la **differenza di intensità** sonora fra le due fonti **non eccede i 10 dB**. È anche opportuno notare, per lo studio delle applicazioni, che il suono nell'aria percorre in 30 millisecondi (tempo di applicazione dell'effetto Haas) circa una distanza di 10 metri.

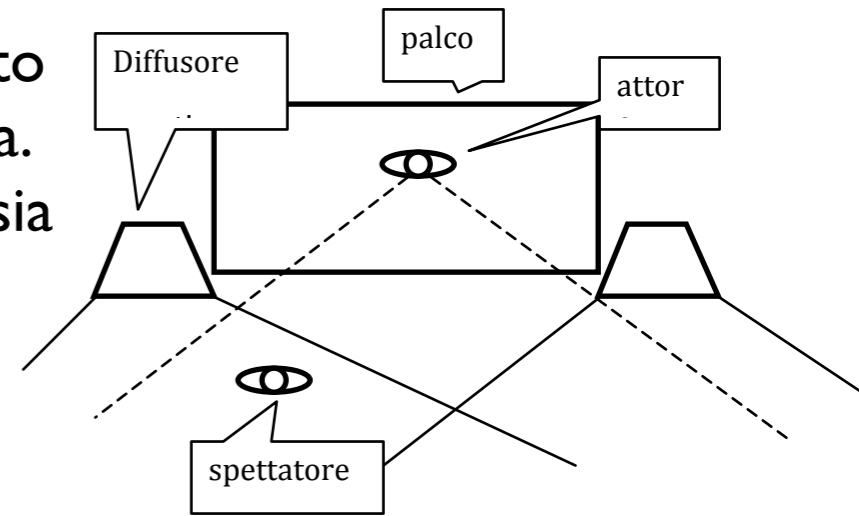
# Applicazioni dell'effetto Haas

## **I. Torri di rinforzo**

In molti spettacoli nei quali la partecipazione di pubblico è imponente, nei quali quindi molti spettatori si trovano ad una grande distanza dal palcoscenico. Per assicurare una copertura sonora il più possibile uniforme, è uso impiegare dei diffusori situati a circa metà della platea, di solito su torri metalliche. In ogni caso, per evitare che lo spettatore percepisca un “doppio suono” è necessario ritardare questi diffusori del tempo che il suono proveniente dai diffusori principali impiega per raggiungere e sommarsi a quello dei diffusori di rinforzo. Se noi a questo ritardo, sfruttando l'effetto Haas, aggiungiamo un tempo fino a 30 millisecondi, lo spettatore avrà l'impressione che il suono proviene solo dai diffusori principali.

## 2. Voce di un attore

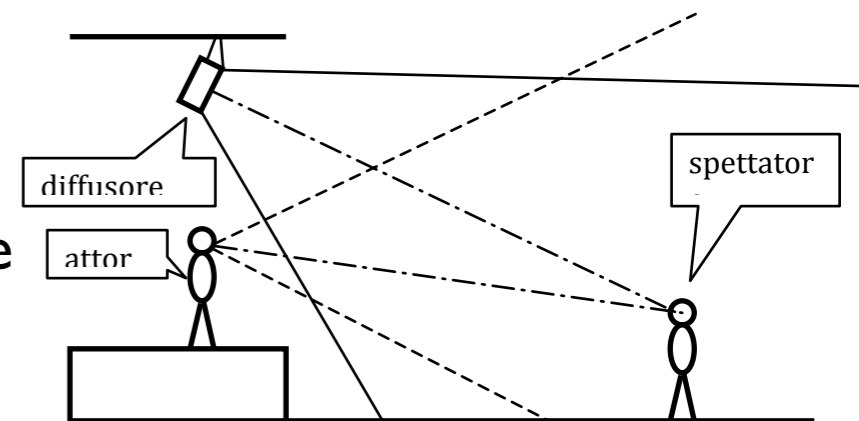
Il disegno a fianco fa riferimento alla classica disposizione di un impianto audio per la riproduzione amplificata della voce di un attore che recita. Lo spettatore ascolta sia la voce diretta dell'attore (linee tratteggiate) sia la stessa amplificata, dai diffusori acustici (linee continue). In queste condizioni lo spettatore ha l'impressione che la voce provenga unicamente dal diffusore poiché gli giunge in anticipo e con maggiore intensità rispetto alla voce diretta.



Se applichiamo ai diffusori un ritardo che oltre a compensare la distanza fisica dell'attore dai diffusori, aggiunga un tempo fino a 30 millisecondi, sfruttando l'effetto Haas, lo spettatore avrà l'impressione che il suono provenga interamente dalla bocca dell'attore.

Dal momento che probabilmente l'attore si muoverà in tutto lo spazio scenico, la scelta di aggiungere un tempo da 1 a 30 millisecondi dovrà essere tale da assicurare l'effetto Haas in qualunque posizione si trovi l'attore.

Un modo di applicare naturalmente, ossia senza far ricorso a linee di ritardo digitali, l'effetto che abbiamo appena visto, è quello di sospendere un unico diffusore al centro del palco, fissandolo ad esempio alla graticciata o ad una americana. In questo caso il suono che proviene dal diffusore dovrà percorrere una distanza maggiore per arrivare allo spettatore, rispetto a quello che proviene direttamente dalla bocca dell'attore (linee punto tratteggiate), giungendovi quindi in ritardo.



Si può osservare che l'efficacia di questa soluzione è tanto maggiore quanto è l'altezza del diffusore sospeso. L'azione combinata di una linea di ritardo digitale su un unico diffusore sospeso è quella che dà i migliori risultati.

### 3. Scatola di suono

In alcune forme moderne di teatro, si tende ad abbattere ogni barriera fisica, quale ad esempio il palcoscenico, fra gli attori e spettatori. Possono quindi capitare delle azioni teatrali che si svolgono in mezzo al pubblico. Qualora questo si svolga in spazi ristretti e richieda comunque l'amplificazione della voce degli attori, può essere utile applicare la cosiddetta scatola di suono.

Questa tecnica può essere applicata quando sia gli attori che il pubblico sono compresi in un quadrato ideale con il lato di max. 10 metri. In questo caso si dispongono 4 diffusori ai 4 angoli del quadrato ideale, e si invia loro un segnale con la voce degli attori ritardata da 1 a 30 millisecondi. Ogni spettatore ascolterà il suono diretto dall'attore, e il suono amplificato dal diffusore alle proprie spalle, ma a causa dell'effetto Haas percepirà il suono come proveniente dall'attore, e non sentirà gli altri 3 diffusori in quanto a causa della distanza di 10 metri l'uno dall'altro, l'effetto Haas si applicherà anche a loro.

