

1.	Lezione di acustica	forma d'onda, frequenza, periodo, ampiezza, suoni periodici, altezza, ottava
----	----------------------------	---

LA CATENA ACUSTICA

Il suono è una sensazione uditiva provocata da una variazione della pressione dell'aria.

L'onda sonora generata dalla vibrazione di un corpo elastico arriva al nostro orecchio dopo aver viaggiato lungo un altro materiale elastico (nella nostra esperienza più comune l'aria).

Gli elementi necessari perché si verifichi un suono sono dunque tre:

- la **sorgente sonora** (il corpo vibrante)
- il **mezzo di trasmissione** dell'onda sonora (l'ambiente, anche non omogeneo, dove il suono si propaga)
- il **ricevitore** (l' orecchio e il cervello)

Della natura delle vibrazioni e delle onde sonore e della loro propagazione nel mezzo si occupa la **acustica fisica**, del rapporto tra onda sonora e il ricevente (il sistema orecchio – cervello), e quindi di come l'uomo interpreta i segnali acustici, si occupa la **psicoacustica**.

VIBRAZIONE DI CORPI ELASTICI - MOTO ARMONICO SEMPLICE

Alla base del comportamento di gran parte dei corpi vibranti degli strumenti musicali c'è il moto armonico semplice, un tipo di movimento oscillatorio che si ripete regolarmente e di cui possiamo calcolare il periodo, ossia la durata (sempre uguale) dei singoli cicli. Il moto armonico semplice si verifica quando un corpo dotato di massa, sottoposto a una forza (nel nostro caso di tipo elastico) oscilla periodicamente intorno a una posizione di equilibrio. Gli esempi più comunemente riportati nei libri di fisica sono quello del sistema massa-molla (una massa attaccata a una molla), e quello del pendolo.



Per noi musicisti può essere più intuitivo pensare alla corda di una chitarra, adeguatamente tesa, fissata a due estremi: quando viene pizzicata, la corda si allontana fino a una distanza massima dalla posizione di equilibrio, quindi la tensione la riporta nella posizione iniziale, dopodiché, a causa dell'inerzia, prosegue il suo moto curvandosi nella direzione opposta (Pierce, fig. 2.17). Il movimento della corda può essere quindi semplificato in quattro momenti: posizione di riposo (a), curvatura (b), ritorno alla posizione di equilibrio (a), curvatura in direzione opposta (c). La successione di questi quattro momenti costituisce un intero ciclo o vibrazione. Nella figura riportata qui sotto ogni ciclo è racchiuso all'interno di un cerchio.

ONDE SONORE

Il suono prodotto dall'interazione tra il corpo vibrante e il corpo risonante si propaga nell'aria circostante, diventa cioè un'onda viaggiante che si propaga in tutte le direzioni (onda sferica, Fig. 1.1). Mentre la vibrazione della corda o di un'ancia produce un movimento chiaramente visibile, le onde sonore che viaggiano nell'aria non si vedono. Pertanto, se vogliamo capire il loro funzionamento, è necessario ricorrere ad analogie con altri fenomeni che si verificano in natura, come l'irradiarsi delle onde in una superficie d'acqua perturbata. Per avere una sensazione più concreta e fisica di cosa sia un'onda di pressione John Pierce suggerisce l'esperimento della lenza fissata ad un albero e pizzicata all'altra estremità. (Pierce fig. 2.13); un'altra sensazione fisica, questa volta di tipo acustico, che può aiutarci a darci un'idea della natura vibratoria del suono è l'ascolto dei suoni più gravi dell'organo o degli ottoni, suoni che ci consentono di percepire quasi separatamente le singole pulsazioni;

Nella figura 1.1 è illustrata l'onda sonora viaggiante nell'aria in tutte le direzioni, prodotta dal moto armonico semplice di un corpo elastico. Notiamo due cose: lo spostamento di pressione è uguale in tutte le direzioni, i gusci di pressione sono perfettamente equidistanti. La distanza tra un guscio e il successivo ci dà la misura del tempo impiegato per compiere un'intera vibrazione semplice.

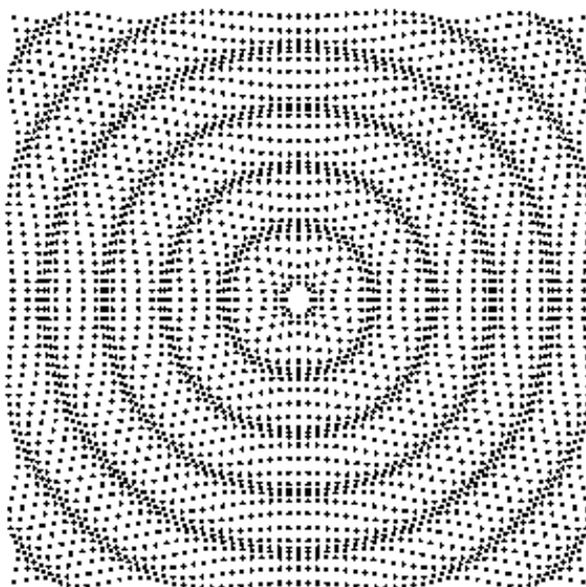


Fig. 1-1 Onda che si propaga in tutte le direzioni (onda sferica)

Semplifichiamo il movimento dell'onda incanalando il suono prodotto da un corpo che vibra secondo un moto armonico semplice (ad es. un diapason) all'interno di un tubo. In questo caso l'onda viaggia in una sola direzione (onda piana). Le vibrazioni della sorgente sonora (il diapason) vengono trasmesse all'aria all'interno del tubo e determinano uno spostamento delle molecole dalla loro posizione di equilibrio secondo quanto visualizzato nella figura 1.2. Si crea, in particolare, un'alternanza regolare di zone di maggiore e minore densità, determinata dal movimento locale delle singole molecole. (Nella figura un punto corrisponde a una molecola).

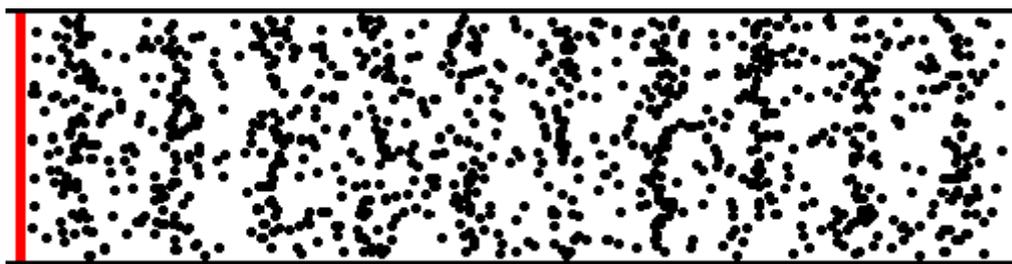


Fig. 1-2 Onda che si propaga lungo una sola superficie (onda piana), illustrazione estrapolata dall'animazione presente nel sito <http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/waves/wavemotion.html>

Per **movimento locale** s'intende che un'onda sonora non trasporta materia, ma che le singole molecole si muovono avanti e indietro solo intorno alla loro posizione di equilibrio con uno spostamento nell'ordine del millesimo di millimetro¹.

Le variazioni di densità corrispondono alle variazioni di pressione rispetto alla pressione atmosferica. Si può rappresentare (fig. 1.3) l'andamento di un'onda sonora misurando la variazione di pressione in funzione del tempo (o dello spazio percorso dall'onda nello stesso tempo). La misurazione viene riportata su un grafico bidimensionale con i valori dell'ampiezza lungo l'asse verticale e quelli del tempo lungo l'asse orizzontale. Il grafico così ottenuto prende il nome di forma d'onda.

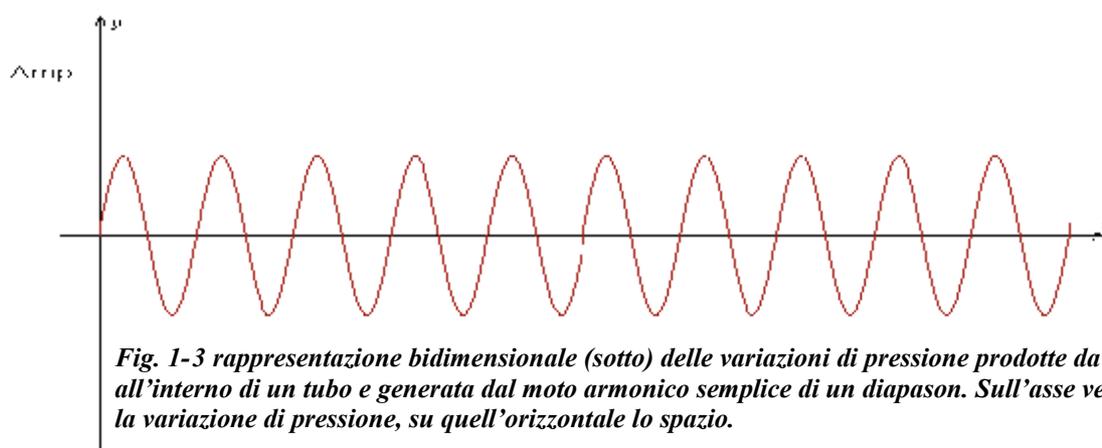


Fig. 1-3 rappresentazione bidimensionale (sotto) delle variazioni di pressione prodotte da un'onda acustica all'interno di un tubo e generata dal moto armonico semplice di un diapason. Sull'asse verticale è riportata la variazione di pressione, su quell'orizzontale lo spazio.

¹É molto utile, per capire questo concetto e anche il diverso moto molecolare nelle onde longitudinali, trasversali e miste, vedere le animazioni presenti nel sito di acustica del Prof. Russell dell'Università di Kettering (USA).

FORMA D'ONDA

Il grafico che abbiamo riportato rappresenta un'onda sinusoidale, una funzione con un andamento molto particolare e la cui natura i più curiosi potranno approfondire alla fine del capitolo. Tornando alla successione *abac* di cui abbiamo parlato all'inizio del capitolo e immaginiamo di collegare questi punti nel modo più semplice e lineare, ossia con dei segmenti di retta. Otteniamo una forma d'onda triangolare, molto semplice anche dal punto di vista matematico, perché ogni punto differisce dal precedente dello stesso valore, ma che non ha nulla a che fare col moto armonico semplice. Questo moto è infatti caratterizzato da un'alternanza di accelerazioni e rallentamenti, il cui andamento può essere descritto solo con una funzione di tipo sinusoidale.

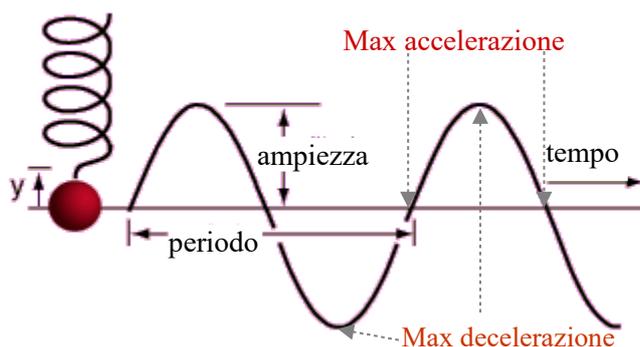


Fig. 1-4 Onda sinusoidale che rappresenta la deviazione rispetto alla posizione di equilibrio di una massa fissata a una molla. In prossimità degli zeri c'è la massima accelerazione, in prossimità dei valori massimi e minimi c'è il massimo rallentamento, ma il moto non è mai uniforme.

Nella realtà le onde sonore non hanno mai un andamento perfettamente sinusoidale, anche se alcuni suoni, ad es. i suoni di arpa nella fase di decadimento o i suono deboli del flauto possono avere un andamento molto simile. Nel caso delle onde sonore prodotte dalla vibrazione regolare di corpi elastici come corde, anche, colonne d'aria, membrane o piastre, le variazioni di pressione, dopo un momento iniziale di assestamento (l'attacco del suono), si ripetono in maniera regolare, ma secondo un modello di vibrazione che può essere molto più complesso di quello sinusoidale; in ogni caso l'andamento delle successioni di compressioni e rarefazioni delle molecole dell'aria si ripete periodicamente e la variazione di pressione può essere descritta da una sequenza di curve aventi un profilo simile.

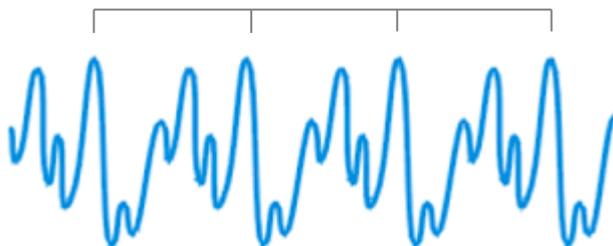


Fig. 1-5 Onda di pressione prodotta da uno strumento musicale. La periodicità si deduce dalla presenza di un modello di vibrazione.

Questo profilo prende il nome di **forma d'onda**² e rappresenta il modello di vibrazione dell'onda sonora. Le grandezze utili per descrivere la forma d'onda sono le seguenti:

- L' **ampiezza** – massima deviazione dalla posizione di equilibrio
- La **lunghezza d'onda (λ)** – distanza tra due massimi consecutivi dell'onda in una funzione ampiezza/spazio. Si indica in metri e rappresenta lo spazio attraversato dall'onda sonora in un periodo.
- Il **periodo (t)** – tempo necessario per compiere un'intera oscillazione (nel grafico corrisponde all'intervallo di tempo tra due massimi d'ampiezza consecutivi in una funzione ampiezza/tempo)
- La **frequenza (f)** – numero di oscillazioni in un secondo, è l'inverso del periodo. Si misura in Hertz (Hz)
- La **fase (φ)** – la distanza, misurata in gradi o radianti all'istante zero, rispetto all'inizio della vibrazione.

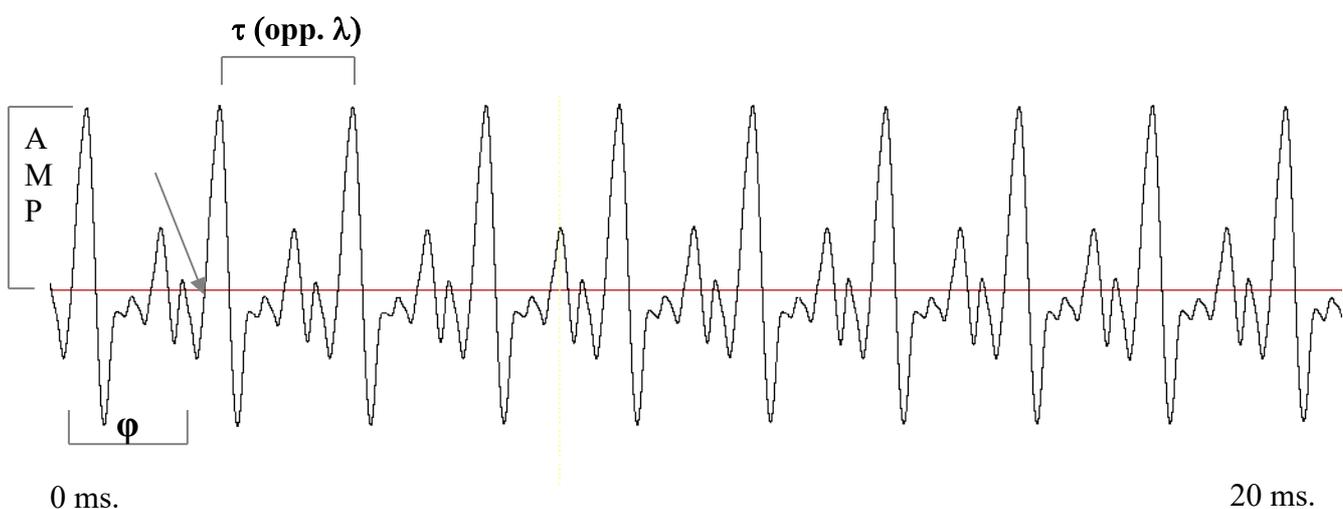


Fig. 1-6 Onda di pressione prodotta da un oboe. Il periodo t è la durata del singolo ciclo o modello di vibrazione, la lunghezza d'onda è lo spazio percorso dall'onda in un periodo, la frequenza è il numero di cicli (periodi) in un secondo, assumendo che nel grafico sia rappresentato un suono di durata pari a 20 ms, la frequenza del suono sarà 500 Hz. L'onda nel grafico non parte all'inizio della vibrazione (da noi scelto arbitrariamente nello 0 prima del picco d'ampiezza e indicato con la freccia) ma sull'ultima rampa negativa; questa differenza, espressa in gradi o radianti, è la fase.

Nel caso di vibrazioni irregolari la periodicità è assente, e il grafico che descriverà la forma d'onda non presenterà alcun modello di profilo.

La periodicità delle vibrazioni determina quasi automaticamente alcuni parametri del suono, in particolare l'armonicità e l'altezza.

Dell'armonicità parleremo più a lungo nella lezione dedicata al timbro, ora ci concentreremo sulla secondo parametro: l'altezza.

²Nel corso di questa dispensa l'espressione forma d'onda verrà usata con due significati: quello di forma del singolo periodo (es. forma d'onda quadra, dente di sega etc.) e quello di rappresentazione dell'ampiezza del suono in funzione del tempo.

ALTEZZA e FREQUENZA

Torniamo alle onde sonore e suggeriamo un'altra analogia, quella tra i picchi di ampiezza di un suono periodico e i suoni impulsivi.

I suoni impulsivi sono suoni caratterizzati dalla loro brevità; qualsiasi suono, di qualsiasi origine, che abbia una durata inferiore a quella sufficiente perché gli sia attribuita la proprietà dell'altezza (cioè al di sotto di un decimo di secondo circa), è un impulso. L'analogia con gli impulsi ci consente di citare degli esempi facilmente riproducibili e verificabili nella realtà quotidiana.

Pierce riporta due esempi: quello di Galileo che produceva suoni di altezza definita sfregando rapidamente un coltello attorno al bordo di una moneta zigrinata e quello di Mersenne che era in grado di stabilire il numero di battiti d'ala di una mosca in base alla nota del suono prodotto in volo. Benade fa un altro esempio, quello dello sfregamento rapido dei denti di un pettine, che, a seconda della velocità, produce sensazioni d'altezza diverse.

In tutti questi esempi sono individuabili tre elementi principali: 1) il suono isolato, l'impulso; sia esso il colpo d'ala della mosca o il salto del coltello sulla sporgenza della moneta o lo sbattere del dente del pettine; 2) la velocità del movimento e quindi la frequenza degli impulsi; 3) la sensazione d'altezza del suono prodotto. Questi tre elementi: impulso, frequenza e altezza ci suggeriscono l'idea di una pulsazione, rappresentata da un picco di ampiezza, che si ripete regolarmente con una certa frequenza (pari al numero di pulsazioni nell'unità di tempo) e, in conseguenza di questa, produce una determinata altezza.

L'intervallo fra due picchi d'ampiezza consecutivi è il periodo t , questa grandezza viene misurata in secondi; il numero di picchi, e quindi di modelli d'onda o cicli, in un secondo è la frequenza f , e questa viene misurata in Hertz¹.

$$f(\text{Hz}) = 1/T$$

$$T = 1/f(\text{Hz})$$

formule per il calcolo della frequenza e del periodo: la frequenza (f) è l'inverso del periodo (t)

La frequenza è una grandezza fisica misurabile con assoluta precisione; l'altezza è strettamente legata alla frequenza, tuttavia è un attributo soggettivo che può cambiare da individuo a individuo, e addirittura, per lo stesso individuo, può variare in funzione di altre variabili come l'intensità. All'altezza possiamo comunque attribuire una qualità universale, quella di far sì che i suoni a distanza di ottava siano considerati equivalenti, infatti in tutte le culture le note a distanza di ottava vengono indicate con lo stesso nome. L'ottava rappresenta quindi una sorta di unità di misura universale della altezza, unità di misura di una scala delle altezze sempre diversa nelle culture e nei secoli, ma che per noi moderni occidentali trova l'esemplificazione più chiara nella tastiera di un pianoforte. Tuttavia se ad ogni aumento di ottava corrisponde un incremento di pari entità in una ipotetica scala delle altezze, ad esso non corrisponde un incremento di pari entità anche in Hertz. L'altezza è infatti legata alla frequenza secondo un rapporto non lineare ma logaritmico², ciò vuol dire che il nostro orecchio percepisce come uguali non le variazioni ma i rapporti di frequenza. Ad esempio, una stessa differenza di cento Hertz viene percepita molto diversa se in una coppia di frequenze gravi o acute, mentre un rapporto 2 a 1 (es. $f_2 = 200$ Hz, $f_1 = 100$ Hz) viene **sempre** percepito come un intervallo di ottava.

¹ Hertz : da Heinrich Hertz (1857-1894), il fisico tedesco che ha scoperto le onde elettromagnetiche.

² Logaritmo: nella scala lineare ogni gradino corrisponde a un incremento di pari grandezza, nella scala logaritmica a un incremento lineare del logaritmo, cioè dell'esponente cui eleviamo la base del logaritmo (10 per i logaritmi naturali, 2 per i logaritmi in base 2 etc). Possiamo anche dire che mentre nella scala lineare delle frequenze ad ogni gradino corrisponde una uguale deviazione di frequenza ($f_2 - f_1$), nella scala logaritmica delle altezze ad ogni gradino corrisponde uno stesso rapporto (f_2/f_1).

Nella tabella sotto sono riportati i numeri d'ordine delle ottave della nota la e le rispettive frequenze. La differenza in Hertz tra una ottava e l'altra ha sempre un valore doppio rispetto a quello dell'ottava sotto, cioè ad ogni aumento di ottava corrisponde un raddoppio della frequenza.

Ottave	Hertz	Differenza (Hz)	Rapporto ($\Delta f/f$)
La 1	110		
		110	2
La 2	220		
		220	2
La 3	440		
		440	2
La 4	880		

I due grafici della fig. 1.7 rappresentano due spettri³ dello stesso suono: un suono complesso composto da quattro sinusoidi (la) a intervalli di ottava: il primo con i valori delle frequenze (asse orizzontale) disposti lungo una scala lineare, il secondo con i valori della frequenze lungo una scala logaritmica. L'equidistanza fra i suoni a distanza di ottava, nel secondo grafico, dà un'idea più rispondente alla nostra percezione dell'altezza.

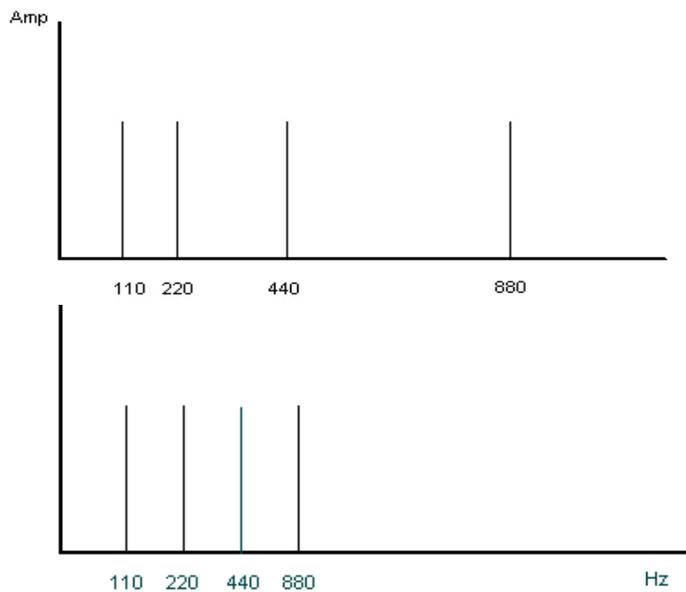
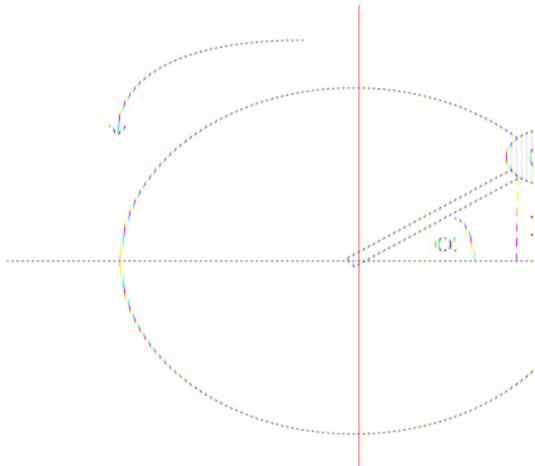


Fig. 1-7 Scala delle frequenze lineare (sopra) e logaritmica (sotto).

³ Spettro (detto anche spettro di Fourier o spettro delle frequenze): grafico bidimensionale che rappresenta il contenuto spettrale, ossia le componenti di frequenza, di un suono complesso. Lungo l'asse orizzontale viene riportata la frequenza, lungo l'asse verticale l'ampiezza.

Approfondimenti: matematica dell'onda sinusoidale

Immaginiamo di far ruotare la manovella in figura 1. Il movimento circolare del punto R può essere proiettato su un grafico cartesiano in cui il tempo è rappresentato sull'asse delle ascisse e l'altezza del punto R sull'asse delle ordinate. Chiamiamo α l'angolo formato dal braccio della manovella e y l'altezza del punto R . Spostiamo la manovella facendo quattro movimenti di 90 gradi: quando l'angolo α formato dal braccio della manovella è pari a 90° (in radianti $\pi/2$), l'altezza y è 1; quando l'angolo α è pari a 180° (cioè π), y è pari a 0; con $\alpha=270^\circ$ ($3/2 \pi$) y è uguale a -1 e, infine, con $\alpha=360^\circ$ (2π), $y = 0$.



$\alpha = 90^\circ$	$y = 1$
$\alpha = 180^\circ$	$y = 0$
$\alpha = 270^\circ$	$y = -1$
$\alpha = 360^\circ$	$y = 0$

Se, invece di procedere per salti di 90° , facessimo una rotazione continua e uniforme, la funzione disegnata dai valori dall'altezza y corrisponderebbe a un'onda sinusoidale, lo stesso tipo di onda che descrive l'andamento dell'ampiezza nel moto armonico semplice e, quindi, nelle vibrazioni che corrispondono ai suoni puri o suoni sinusoidali in acustica.

Il termine sinusoidale ha origine dalla funzione seno. Il seno è la funzione matematica che determina, al variare dell'angolo alfa, l'altezza di R , o meglio - detto con termini più appropriati: **il seno di un angolo è l'ordinata dell'estremo dell'arco sotteso dall'angolo stesso**. Per conoscere l'altezza y di un angolo α applichiamo dunque la formula:

$$y = \sin(\alpha)$$

Se, mentre ruotiamo la manovella, volessimo conoscere l'altezza y in un determinato istante t , dovremo conoscere l'ampiezza dell'angolo nell'istante t . Per fare questo abbiamo bisogno di indicare con quale velocità stiamo ruotando la manovella. La velocità di rotazione si calcola misurando l'angolo che il braccio della manovella (cioè il raggio della circonferenza) descrive in un secondo. Si parla infatti di **velocità angolare**. Questa viene simboleggiata con la lettera ω e si calcola moltiplicando l'angolo giro (2π) per la **frequenza** di rotazione f (il numero di rotazioni complete, o cicli, che facciamo fare alla manovella in un secondo, in realtà si misura in radianti, per cui ω indica i radianti per secondo).

$$\omega = 2\pi f$$

Per conoscere l'altezza y in un determinato istante t dobbiamo dunque applicare la seguente formula:

$$y(t) = \sin(2\pi ft)$$

Se l'inizio della rotazione avviene in un momento diverso dalla posizione di riposo (quando $\alpha = 0$ con la manovella sulla destra) bisogna considerare una nuova variabile, la **fase**. La fase si indica col simbolo ϕ ed è la misura (espressa in gradi o radianti) dell'angolo α formato dall'estremo dell'arco in un punto diverso da quello di riposo. L'equazione dell'onda sinusoidale diventa dunque:

$$y(t) = \sin(2\pi ft + \phi)$$

la sinusoide così ottenuta oscillerà tra un valore massimo pari a 1 e un valore minimo pari a -1. Ma nel considerare i suoni va considerata un'ultima variabile: l'**ampiezza** (A). L'ampiezza ci dà la misura dell'intensità del suono. Per ampiezza si intende il suo valore massimo, quello che va moltiplicato per i valori della funzione seno. Ecco, finalmente l'equazione completa della sinusoide:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

ESEMPI AUDIO

Torniamo agli impulsi e ascoltiamo una serie di suoni sinusoidali con una frequenza sufficientemente bassa da poter sentire la natura impulsiva del suono.

-  1.1 [sin20Hz](#)
-  1.2 [sin25Hz](#)
-  1.3 [sin30Hz](#)
-  1.4 [sin35Hz](#)
-  1.5 [sin40Hz](#)

Ora ascoltiamo un Fa pedale del trombone, la cui frequenza è di poco superiore all'ultimo suono sinusoidale della serie appena ascoltata.

-  1.6 [trbnfa0](#)

Ora isoliamo un singolo ciclo d'onda del suono pedale fa0 del trombone. La sua durata è pari a circa .0238", per una frequenza poco sopra i 42 Hz.

Facciamo un [loop](#) e suoniamolo ripetendolo dall'inizio più volte: il suono ha un timbro meno naturale dell'originale ma la percezione dell'altezza è la stessa.

-  1.7 [trbnfa0loop](#)

Suoniamo in loop una porzione di onda lunga esattamente la metà dell'onda usata nell'esempio precedente: il suono risulta all'ottava sopra (anche se la sensazione è di un'ottava calante);

-  1.8 [trbnfa1loop](#)

infine suoniamo, sempre in loop, soltanto $\frac{1}{4}$ del ciclo: abbiamo un suono due ottave sopra.

-  1.9 [trbnfa2loop](#)

Abbiamo modificato sensibilmente la forma d'onda alterando il timbro ma la sensazione di altezza si avvicina con una certa precisione a ciò che avevamo calcolato in base alla frequenza. Quest'esempio dimostra che la principale causa dell'altezza è la frequenza.

Abbiamo ascoltato i suoni puri nella regione più grave dell'area di udibilità degli esseri umani, e abbiamo constatato come il nostro orecchio comincia a percepire delle sensazioni uditive intorno ai 20 Hz. Per i suoni acuti l'area di udibilità si estende, con differenze molto sensibili tra i singoli soggetti, fino ai 17000Hz circa. Sentiamo alcuni esempi di suoni nella regione acuta.

-  1.10 [sin5000Hz](#)
-  1.11 [sin7500Hz](#)
-  1.12 [sin10000Hz](#)
-  1.13 [sin15000Hz](#)

2.	Lezione di acustica	onde stazionarie e modi di vibrazione, velocità del suono, teorema di Fourier, suoni complessi armonici e inarmonici, spettro, fondamentale, componenti armoniche e inarmoniche, intervalli
----	----------------------------	--

ONDE STAZIONARIE

Usciamo dal campo più strettamente teorico-sperimentale delle onde sinusoidali e anticipiamo alcuni aspetti delle onde sonore nei fenomeni musicali. Questi argomenti saranno trattati più approfonditamente nell'ottava lezione.

Le onde sonore possono essere trasversali o longitudinali, nel primo caso l'oscillazione delle particelle avviene in direzione perpendicolare rispetto a quella in cui l'onda si propaga, nel secondo caso in direzione parallela. Il primo caso si verifica nelle corde, il secondo nelle canne degli strumenti a fiato.

Le corde vibranti sono loro stesse onde sonore trasversali, nelle canne la propagazione del suono è assicurata da onde di pressione, dunque da oscillazioni longitudinali delle molecole del gas.

Le corde degli strumenti musicali sono fissate alle due estremità, questo determina la formazione di un'onda con due punti nodali, nei quali la vibrazione è nulla, agli estremi. In questo caso dal punto di sollecitazione si dipartono due vibrazioni progressive, queste onde, dopo aver viaggiato lungo la corda, si riflettono sui due punti nodali (gli estremi fissi della corda), invertono la fase e diventano onde regressive. Onde progressive e regressive continuano a viaggiare avanti e indietro lungo la corda, sovrapponendosi e creando la condizione di onde stazionarie, si crea cioè un regime di pulsazioni regolari all'interno di uno spazio confinato.

Per lo studio della riflessione delle onde vedi le animazioni nella pagina web:

<http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/reflect/reflect.html>

Le onde stazionarie si creano analogamente nella colonna d'aria all'interno delle canne. L'onda progressiva prodotta nell'imboccatura procede lungo la colonna d'aria fino all'apertura opposta, dove la differenza d'impedenza fra l'interno della canna e l'aria esterna determina una riflessione dell'onda con inversione di fase.

Nel caso delle canne aperte ai due estremi il punto nodale è a metà della canna, mentre i ventri (punti di massima vibrazione) si trovano alle due estremità del tubo.

Per quanto riguarda le canne chiuse a una estremità, abbiamo un nodo in corrispondenza dell'estremità tappata e un ventre in corrispondenza di quella aperta.

Approfondiremo più avanti il comportamento delle onde stazionarie nelle diverse tipologie di corde e di canne. Considerando che sia nelle canne aperte che nelle corde con estremi fissi abbiamo lo stesso rapporto tra lunghezza d'onda e lunghezza del corpo vibrante (vedi fig. 2.1), la discussione seguente, che viene fatta prendendo ad esempio la corda per ragioni di comodità, può essere estesa anche a gran parte degli strumenti a fiato.

VELOCITÀ DEL SUONO

Considerando che sia nelle canne aperte che nelle corde con estremi fissi abbiamo lo stesso rapporto tra lunghezza d'onda e lunghezza del corpo vibrante (vedi fig. 2.1), la discussione seguente relativa al calcolo della lunghezza del corpo vibrante, può essere estesa sia agli strumenti a corda che a gran parte degli strumenti a fiato.

Onda progressiva in una corda fissata alle due estremità o in un tubo aperto

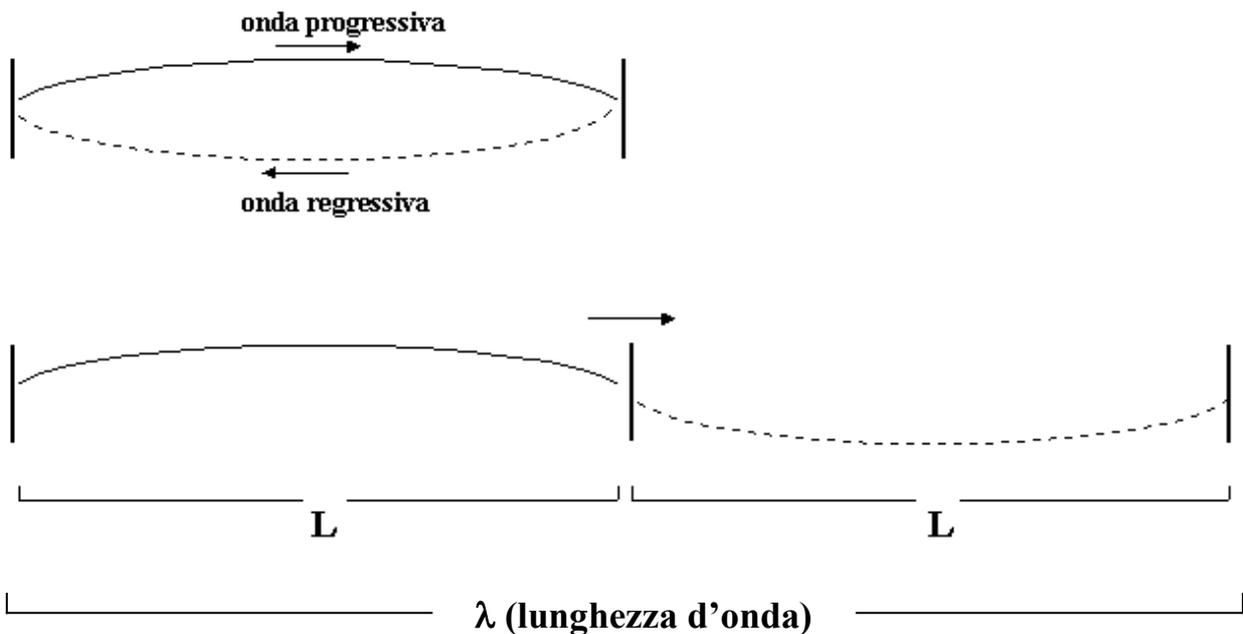


Fig. 2-1

CALCOLO DELLA FREQUENZA E DELLA LUNGHEZZA DEL TUBO:

La velocità del suono nell'aria è data in modo approssimativo dall'equazione:

$$v = 331.4 + 0.6 T_c \text{ m/sec.}^3$$

(T_c = temperatura Celsius)

considerato che la lunghezza d'onda è pari a due volte la lunghezza di un tubo aperto

$$\lambda = 2L$$

per calcolare la frequenza del suono fondamentale prodotto da un tubo con lunghezza L vale la seguente equazione

$$f = v/\lambda = v/2L$$

³ quindi la velocità del suono nell'aria aumenta di circa 60 cm. con l'aumento di un grado della temperatura (ad es. alla temperatura di 40 gradi centigradi la velocità del suono è di circa 355 metri al secondo, con un aumento della frequenza di circa 121 cent.!).

inversamente, per calcolare la lunghezza di un tubo che abbia come suono fondamentale la frequenza f , vale l'equazione

$$L = v/2f$$

Nel caso della corda la velocità dell'onda sonora è legata non solo alla lunghezza ma anche alle due variabili Tensione e Massa. La frequenza è proporzionale alla tensione della corda e inversamente proporzionale alla massa.

$$v = \sqrt{T/M}$$

Alcuni esempi di calcolo della frequenza e della lunghezza del tubo (si prende in considerazione la velocità dell'aria pari a 340 metri/sec.)

1. dato un tubo aperto lungo 1 metro il suono prodotto avrà una frequenza pari a $340/2 = 170$ Hz
2. per produrre un suono con frequenza pari a 100 Hz la lunghezza del tubo sarà $340/200 = 1.7$ metri

MODI DI VIBRAZIONE

Come si vede dalla figura 2.1, in una corda con estremi fissi un ciclo completo avviene in uno spazio pari a due volte la lunghezza della corda, pertanto la lunghezza d'onda λ è pari a $2L$.

Nel regime di onde stazionarie che si verifica normalmente in una corda fissata alle due estremità, all'onda prodotta dalla vibrazione che abbiamo descritto (primo modo di vibrazione), si aggiungono onde con modi di vibrazioni diversi, aventi frequenze pari a multipli interi della frequenza dell'onda fondamentale. Il meccanismo di questi modi si può esemplificare facendo ricorso a un modello fisico realizzato con un certo numero di masse unite da molle.

Immaginiamo di avere a disposizione quattro masse: i casi che si possono verificare sono i seguenti:

- 1) tutte le masse sono sincrone, la curvatura avviene in un'unica direzione;
- 2) le prime due masse oscillano in direzione opposta alle altre due;
- 3) la seconda e la terza massa oscillano in direzione opposta alle altre due;
- 4) la prima e la terza oscillano in direzione opposta alle altre due.

Nel primo caso abbiamo un modo di vibrazione corrispondente a quello fondamentale già visto nella *fig. 2.1* ($\lambda=2*L$); nel secondo caso abbiamo un'oscillazione completa ($\lambda=L$), nel terzo un'oscillazione e mezzo ($\lambda=2/3*L$), nel quarto caso due oscillazioni ($\lambda=1/2*L$),



Fig. 2-2 Primi quattro modi di vibrazione

Le caratteristiche di questi modi di vibrazione possono essere riassunte con le seguenti equazioni:

- 1 Nel primo modo di vibrazione ($m = 1$) la lunghezza d'onda (λ) è pari a due volte la lunghezza della corda ($2L$). Negli altri modi di vibrazione la lunghezza dell'onda (λ_m) è pari a $2L/m$.

$$\lambda m = 2L/m$$

- 2 La frequenza dei modi di vibrazione è pari al rapporto tra la velocità del suono (v) e la lunghezza d'onda (ossia 2 volte il tubo o la corda vibrante nel caso del primo modo di vibrazione, 1 volta il tubo nel caso del secondo modo di vibrazione etc.)

$$f m = v/\lambda m$$

TEOREMA DI FOURIER

Un'onda periodica è la somma di onde sinusoidali aventi ampiezze, frequenze e fasi appropriate, con le frequenze delle singole componenti sinusoidali multiple intere di una frequenza f . Quindi la frequenza della componente n è pari a $f * n$.

Tradotto in termini musicali possiamo dire che ogni suono complesso periodico è la somma di x suoni sinusoidali ognuno con la sua ampiezza, fase e frequenza con le frequenze tutte multiple intere del suono fondamentale f .

I suoni complessi con spettro armonico sono suoni periodici, questo ci permette di assegnare loro un'altezza, che corrisponde alla frequenza della fondamentale ($1/t_f$).

Nella fig. 2.3 l'onda in grassetto è l'onda risultante dalla somma delle quattro onde sinusoidali rappresentate con un tratto più sottile. Queste quattro onde semplici rappresentano le prime quattro armoniche di un suono complesso; in quest'esempio le onde hanno un'ampiezza inversamente proporzionale al numero d'ordine dell'armonica.

Il periodo dell'onda risultante coincide con quello della fondamentale (t_1). I periodi delle armoniche superiori (rappresentati dalle linee orizzontali) sono pari a t_f/n , quindi la seconda armonica ha un periodo pari alla metà di quello della fondamentale, il terzo armonico un periodo pari a un terzo...

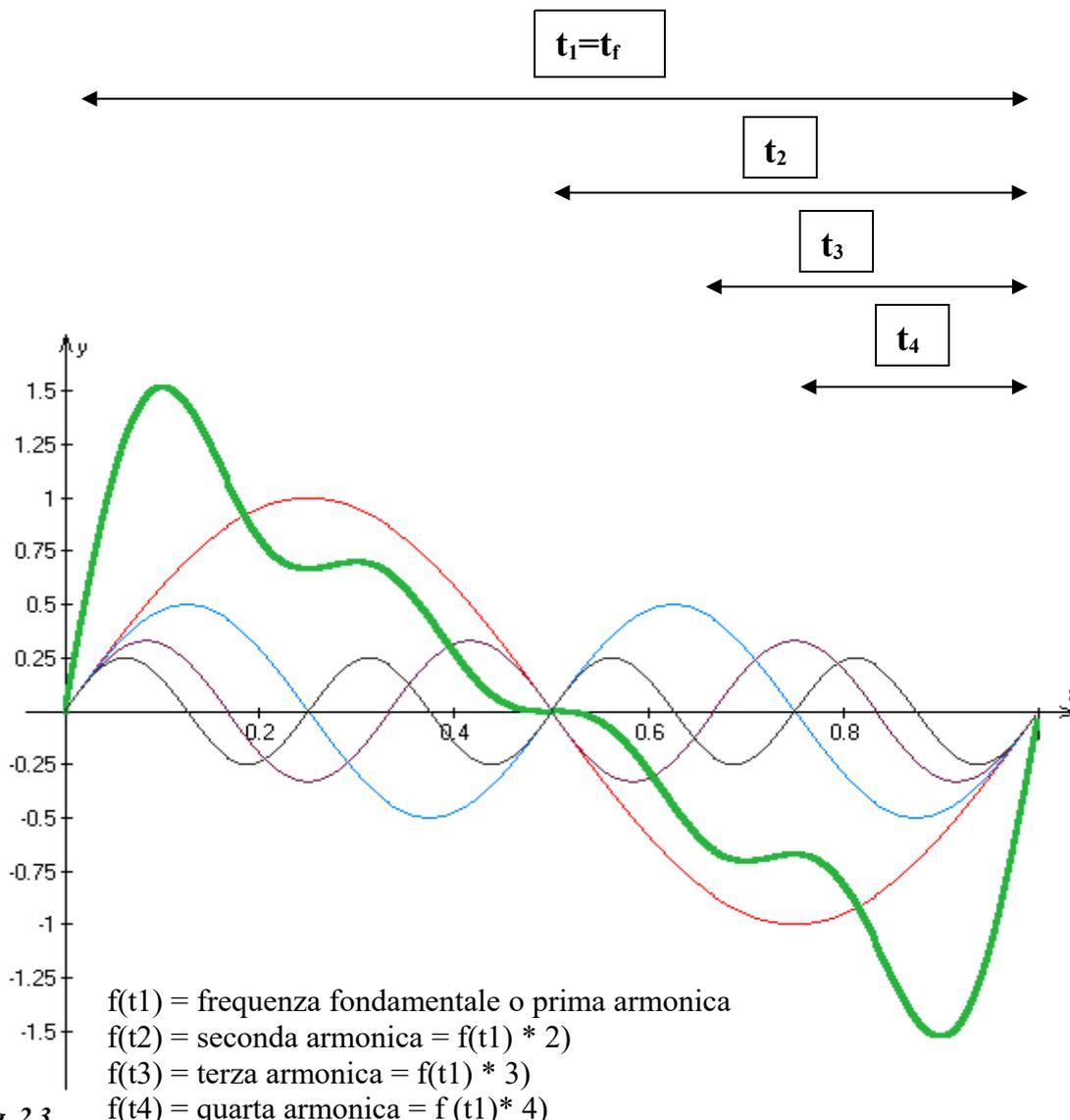


Fig. 2.3

Esempi di forme d'onda e correlazione con gli spettri.

Nella **fig. 2.4** sono riportati alcuni esempi di forme d'onda periodiche risultanti dalla somma di un numero finito di componenti secondo rapporti semplici fra il numero della componente e la sua ampiezza.

Questi esempi di forme d'onda sono conosciuti, oltre che per la semplicità (quindi economicità) della formula di sintesi, anche perché somigliano ad alcune tipologie di forme d'onda dei suoni strumentali: le onde a dente di sega presentano una somiglianza con le onde prodotte dagli strumenti ad arco, le onde quadre alle onde prodotte dai clarinetti nel registro chalumeau.

Sotto la forma d'onda sono riportati gli spettri corrispondenti. Lo spettro è una rappresentazione bidimensionale del suono che descrive l'ampiezza delle singole componenti di un suono complesso. Sull'asse verticale è riportata l'ampiezza, sull'asse orizzontale la frequenza. Dal momento che le forme d'onda riportate negli esempi appartengono a suoni periodici, le componenti sono equidistanti (componenti armoniche).

forme d'onda:

- dente di sega: $A(fn)=1/n$;
- quadra: contiene solo le componenti dispari, sempre con $A(fn)=1/n$,
- triangolare: contiene solo le componenti dispari, ma con $A(fn)=1/n^2$
- onda sinusoidale: contiene solo una componente

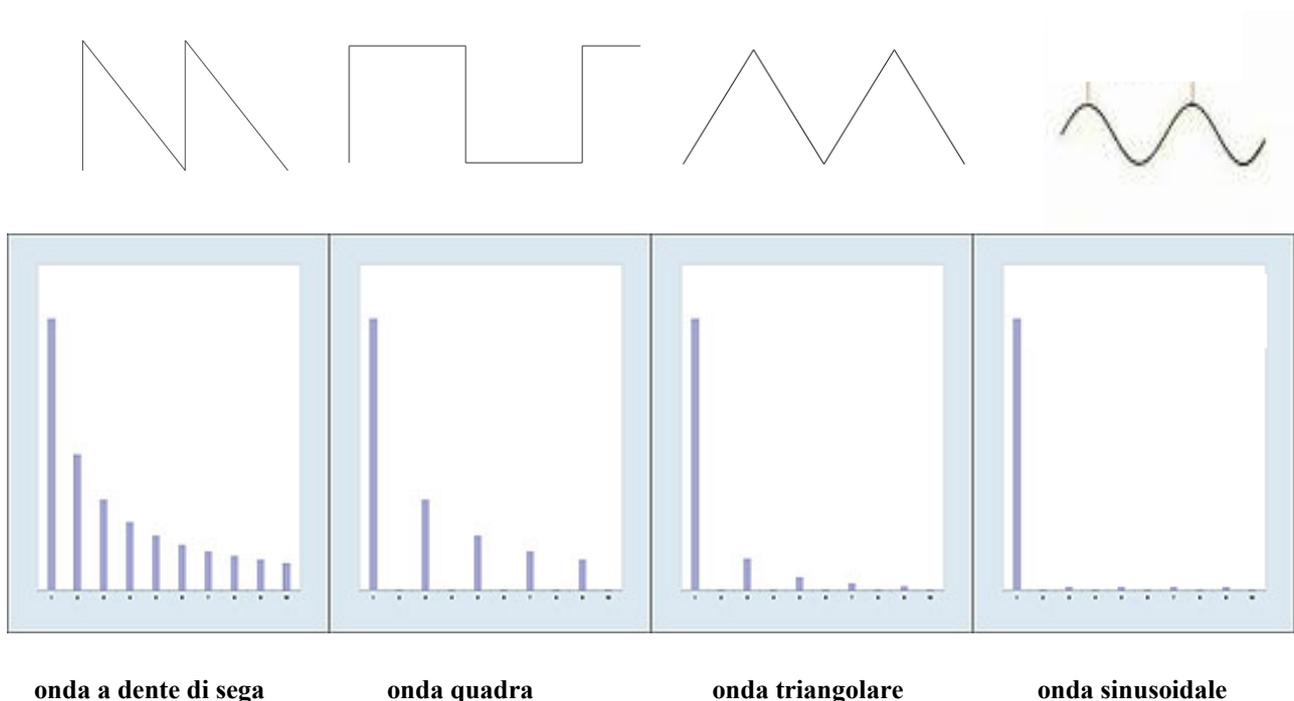


Fig. 2-4 Forma d'onda e spettro di frequenza dello stesso suono per quattro modelli di vibrazione

FUSIONE PERCETTIVA

Esempi di “costruzione del timbro”.

Il concetto di “fusione percettiva” è stato coniato dal ricercatore Stephens McAdams e indica la possibilità, da parte del nostro sistema percettivo, di sintetizzare, in un unico oggetto uditivo, le diverse componenti spettrali di un suono complesso. Maggiore è l’armonicità delle componenti spettrali, maggiore è la loro fusione. Per spiegare meglio questo concetto presentiamo due esempi di suoni complessi entrambi intonati su un si sotto il do centrale: il primo quasi perfettamente armonico (suono di chitarra), il secondo parzialmente inarmonico (campana).

1) In otto passaggi si costruisce lo spettro dei un suono di chitarra. Nei primi quattro passaggi si aggiunge un’armonica per volta, dal quinto in poi si aggiungono gruppi di armoniche. Trattandosi di un suono strumentale quasi perfettamente armonico, le armoniche si fondono in una unità sonora omogenea e non sono percepibili separatamente.



2.1 [armonicichitarra](#)

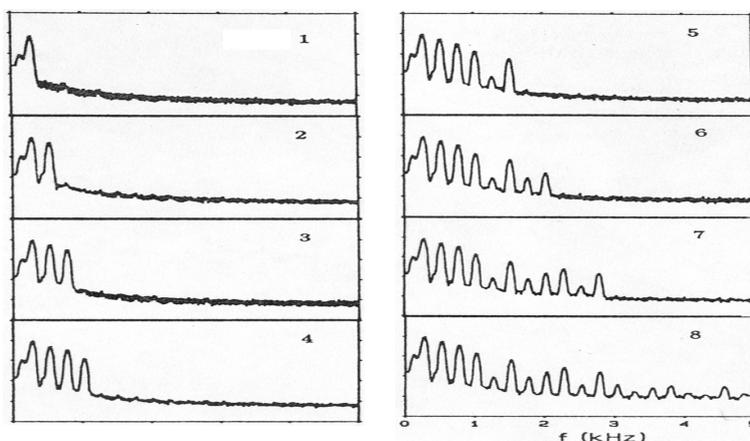


Fig. 2-5.

2) In otto passaggi si costruisce lo spettro di un suono di campana. Nei primi due passaggi si aggiunge un’armonica per volta, dal terzo in poi si aggiungono gruppi di armoniche. Trattandosi di un suono strumentale parzialmente inarmonico, le armoniche non si fondono completamente in una unità sonora omogenea e sono percepibili separatamente.

Nella tabella qui sotto sono riportati i rapporti delle prime nove componenti del suono di campana rispetto alla fondamentale percepita.



2.2 [armonicacampana](#)

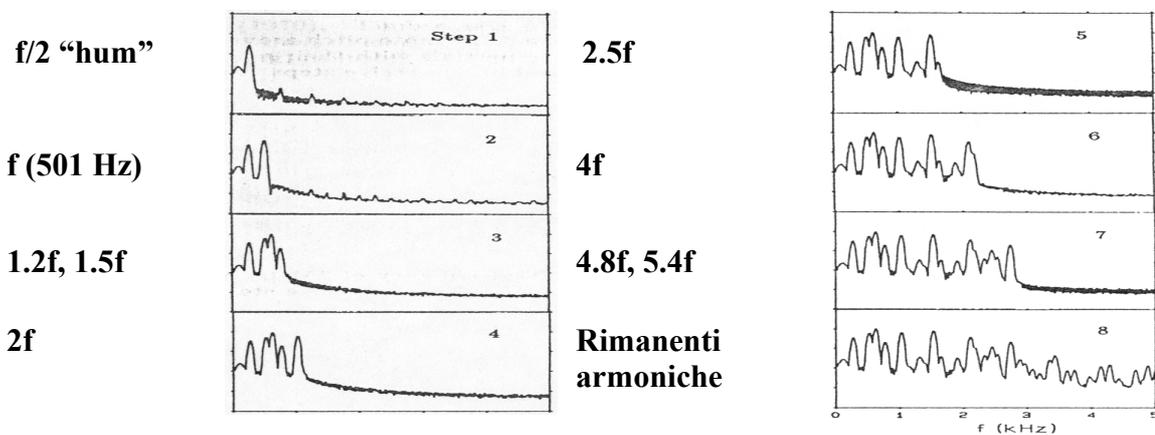


Fig. 2-6

ASCOLTO SINTETICO E ASCOLTO ANALITICO

La fusione percettiva non è solo dovuta a caratteristiche intrinseche del suono in esame (armonicità, presenza di modulazioni coordinate tra le parziali come vibrato e tremolo), ma anche al contesto in cui il suono viene percepito: in particolare si possono creare delle condizioni per cui il nostro orecchio invece di sintetizzare in un unico oggetto sonoro le varie componenti di un suono complesso (ascolto sintetico) è portato ad analizzare le singole componenti (ascolto analitico). Nell'esempio audio 2.3 un suono di campana viene fatto precedere dall'ascolto di ogni singola componente: se questa ha un'ampiezza significativa all'interno del suono complesso, la nostra attenzione sarà centrata su quella parziale, che potremo sentire in maniera distinta *dentro* il suono di campana. In questo caso la nostra percezione tenderà verso un tipo di ascolto analitico.



2.3 ascoltoanalitico

ARMONICI e INTERVALLI MUSICALI

Relazione fra i suoni della serie delle armoniche e i suoni musicali.

Nella fig. 2.7. è illustrata in notazione musicale la serie delle armoniche di un suono complesso con fondamentale 65 Hz (do₁ sotto la chiave di basso). Ogni "nota" rappresenta a sua volta non un suono complesso ma un suono semplice, un armonico. I rapporti tra i numeri d'ordine delle armoniche corrispondono agli intervalli "naturali" (vedi anche capitolo 6)

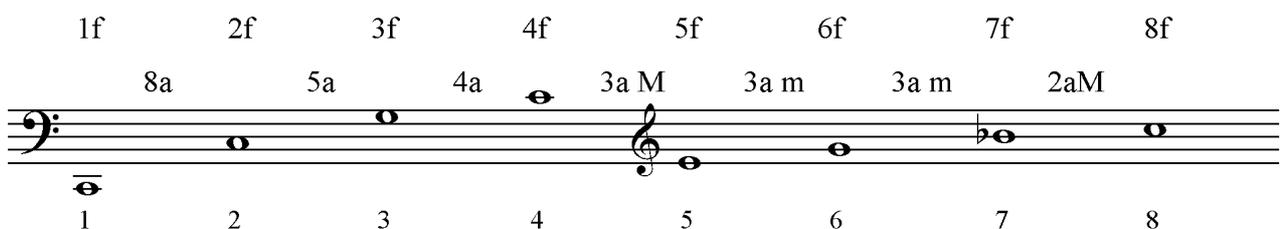


Fig. 2-7

2/1	3/2	4/3	5/4	6/5	7/6	8/7
2	1.5	1.333	1.25	1.2	1.166	1.143
Ottava	Quinta	Quarta	Terza maggiore	Terza minore	Terza minore	Seconda maggiore

Pierce. pagg. 54-64 (non studiare pagg. 65-69)

LUNGHEZZA D'ONDA NEI TUBI⁴ SONORI

Negli strumenti a fiato la divisione tra canne aperte alle due estremità e canne aperte a una sola estremità è esemplificata dal confronto tra flauto e clarinetto. Senza tener conto delle differenze relative al corpo vibrante (nel primo la colonna d'aria è eccitata direttamente dal fiato dell'esecutore, nel secondo dalla vibrazione dell'ancia) siamo di fronte a due strumenti sostanzialmente simili nella struttura essendo pressoché cilindrici e con una lunghezza poco superiore a 60 cm.

Nel flauto la deviazione di pressione ha due nodi in corrispondenza delle aperture dello strumento; nel clarinetto, chiuso a un'estremità, si ha un solo nodo di pressione in corrispondenza dell'apertura della campana, questo fa sì che ai modi di vibrazione corrispondano solo gli armonici dispari. Nella figura sono riportati i primi tre modi di vibrazione per canne aperte a due e una estremità. Si è preso in considerazione un tubo lungo 65 cm⁵.

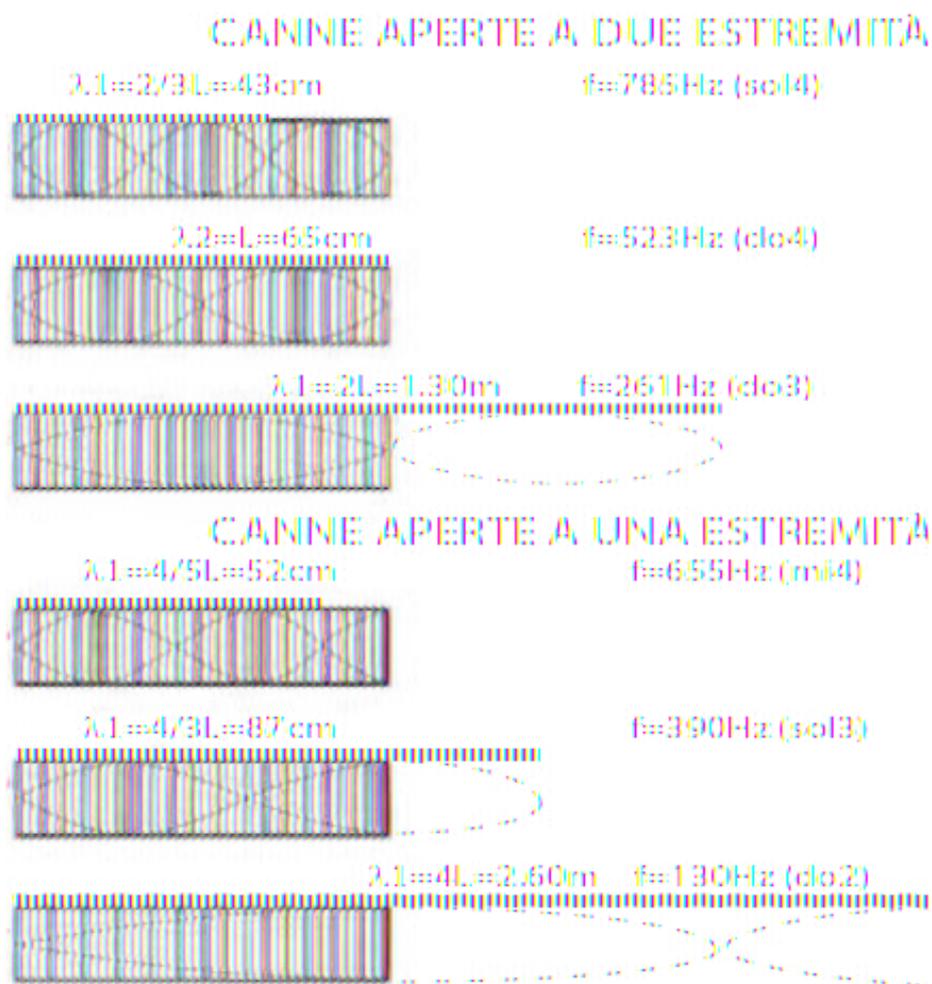


Fig. 2.8 Primi 3 modi di vibrazione in una canna aperta e in una canna chiusa a una estremità. I nodi si riferiscono ai punti in cui la deviazione di pressione è nulla (in questi punti la vibrazione, cioè lo spostamento delle particelle dell'aria, è invece massima). Non si producono le armoniche pari.

Per quanto riguarda gli altri strumenti a fiato chiusi a un'estremità (oboe, fagotto, sassofono e tutti gli ottoni), a causa della loro conicità più o meno pronunciata, il loro comportamento è sostanzialmente simile a quello delle canne cilindriche aperte a sue estremità; quindi anche per loro vale l'equazione: $f = v / 2L$.

⁴In questa dispensa useremo indifferentemente, i termini **tubo** e **canna** sonora a proposito degli strumenti a fiato

⁵In realtà la lunghezza del tubo non corrisponde esattamente alla parte vibrante. In molti casi bisogna tenere conto della cosiddetta **correzione di bocca**, che aggiunge qualche centimetro alla lunghezza dello strumento.

3.	Lezione di acustica	Livello di pressione sonora (SPL), Livello di intensità sonora (SIL), Decibel, Curve isofone, Livello di volume, Phon, Intensità soggettiva o sensazione sonora, Son
----	----------------------------	---

La sensazione di intensità sonora è legata alla pressione che l'onda sonora esercita sul timpano. È intuitivo che maggiore è la pressione più forte è la sensazione di intensità.

La variazione di pressione dipende dalla potenza della sorgente sonora, che si misura in watt/m².

Per un suono sinusoidale alla frequenza di 1000 Hz, il nostro sistema uditivo inizia a essere stimolato quando il valore della potenza sonora è pari a 10⁻¹² watt/m².

Considerando che la soglia del dolore corrisponde a un valore di potenza sonora pari a 1 watt/m², la scala dell'intensità è compresa approssimativamente tra un valore minimo di 0.000000000001 watt/m² e un valore massimo pari a 1 watt/m².

L'intensità di un suono esprime il rapporto tra la potenza sonora del suono in esame e la potenza sonora di un suono di riferimento, la soglia di udibilità. Questo rapporto è compreso tra 1 (se il suono ha un'intensità pari alla soglia di udibilità) e 10¹² (se il suono ha un'intensità pari alla soglia del dolore).

Nella grafico della figura 3.1 ho indicato sull'asse orizzontale i rapporti di potenza (I/I₀), su quello verticale il corrispondente livello di intensità espresso in decibel. La relazione tra le due grandezze è determinata dall'equazione:

$$I(\text{dB}) = 10 \text{ Log } (I/I_0)$$

Per es. a un rapporto di potenza pari a 1000 corrisponde una differenza di 30 dB; un suono un milione di volte più potente di un altro ha un livello di intensità di +60dB.

Dall'equazione precedente si può ricavare l'equazione che stabilisce, data la differenza in dB, il rapporto fra due intensità:

$$R = 10^{(\text{dB}/10)}$$

Ad es. una differenza di 25 dB corrisponde a un rapporto 316; un suono A con una intensità superiore di 3 dB rispetto a quella di un suono B ha una potenza sonora doppia; con un aumento di 6 dB l'intensità del suono viene quadruplicata.

Questi calcoli valgono per suoni sinusoidali con pari frequenza, per suoni di differente frequenza si possono utilizzare purché le frequenze dei due suoni non cadano all'interno della stessa banda critica.

Per i suoni complessi, ad es. i suoni degli strumenti musicali, questo discorso può tornare utile per calcolare l'intensità complessiva di un gruppo di strumenti omogenei che suonano all'unisono, ad es. la fila degli archi nell'orchestra. Immaginando che ciascun violino suoni con una intensità pari a 70 dB, una fila di 12 violini produrrà un suono con una potenza 12 volte maggiore. In base alla relazione rapporto di potenza-intensità vista sopra, l'intensità del suono prodotto dai 12 violini sarà pari a 70 + 10 Log12, cioè 80.8 dB.

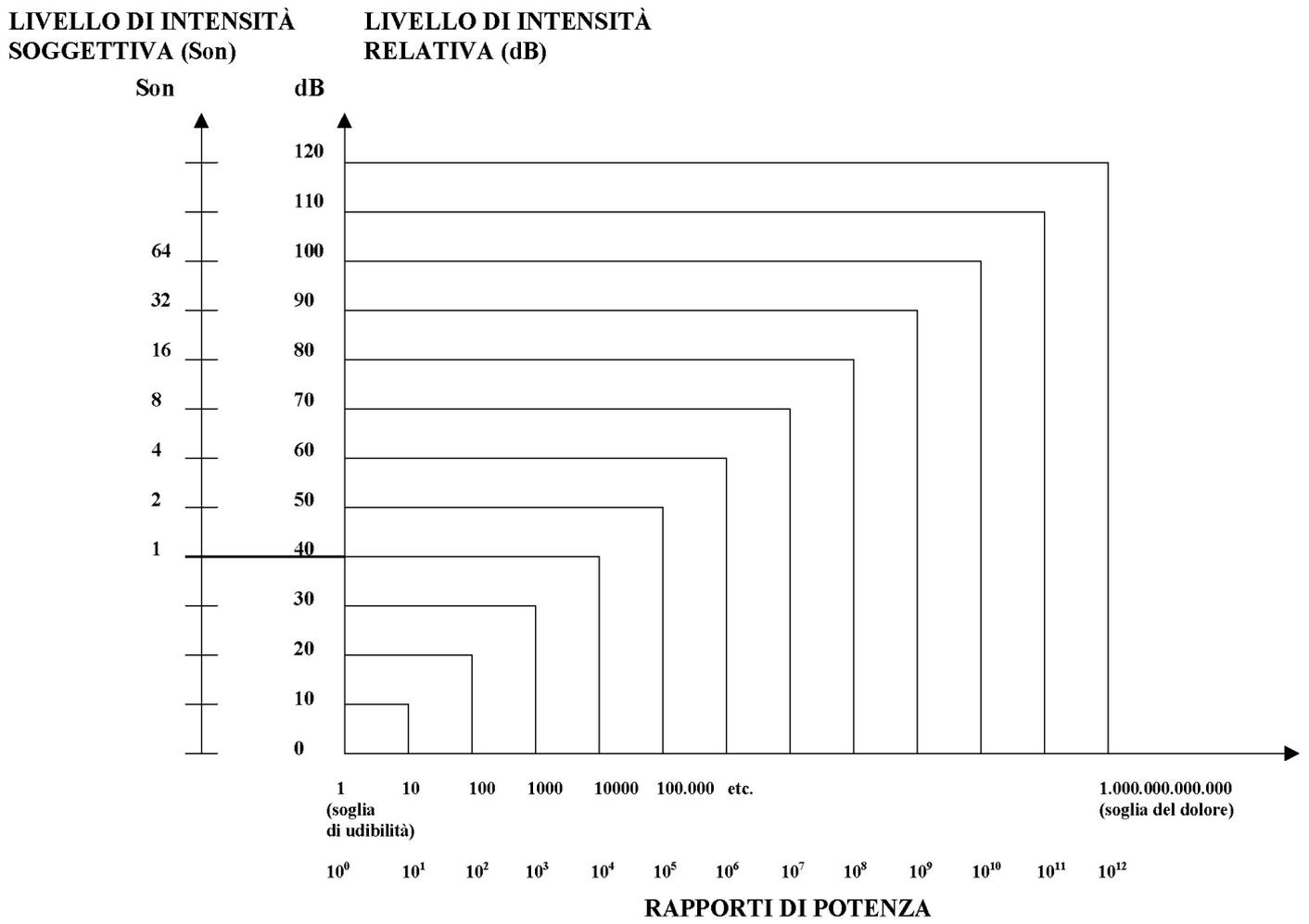


Fig. 3-1

Curve isofone e livello di volume

Il nostro orecchio non è sensibile allo stesso modo per tutte le frequenze. In modo piuttosto grossolano possiamo dire che man mano che ci si avvicina ai limiti estremi del nostro campo di udibilità diminuisce la sensibilità dell'orecchio, sensibilità che raggiunge il suo massimo intorno ai 3800 Hz, cioè la frequenza di risonanza del condotto uditivo (meato) dell'orecchio esterno.

Questo vuol dire che due suoni sinusoidali che giacciono rispettivamente nella zona di maggiore sensibilità (1000-5000 Hz ca.) e nelle zone di minore sensibilità (le zone estreme del campo di udibilità), per darci la stessa sensazione di intensità devono avere un livello di intensità (dB) diverso.

Questa differenza di sensibilità non è costante per tutti i livelli di volume: intorno alla soglia di udibilità le differenze fra due sinusoidi possono raggiungere anche i 60 dB, mentre intorno a un fortissimo le differenze non superano i 15 dB.

Negli anni '40 due scienziati americani, Fletcher e Munson, dopo una accurata serie di test psicoacustici fatti prendendo come livello di riferimento i valori di intensità soggettiva di un suono sinusoidale a 1000 Hz, disegnarono le curve di uguale volume, meglio conosciute come curve isofone.

I punti che giacciono sulla stessa curva rappresentano valori di uguale sensazione di intensità e pertanto hanno lo stesso valore in Phon, che è appunto l'unità di misura del volume percepito (Loudness Level).

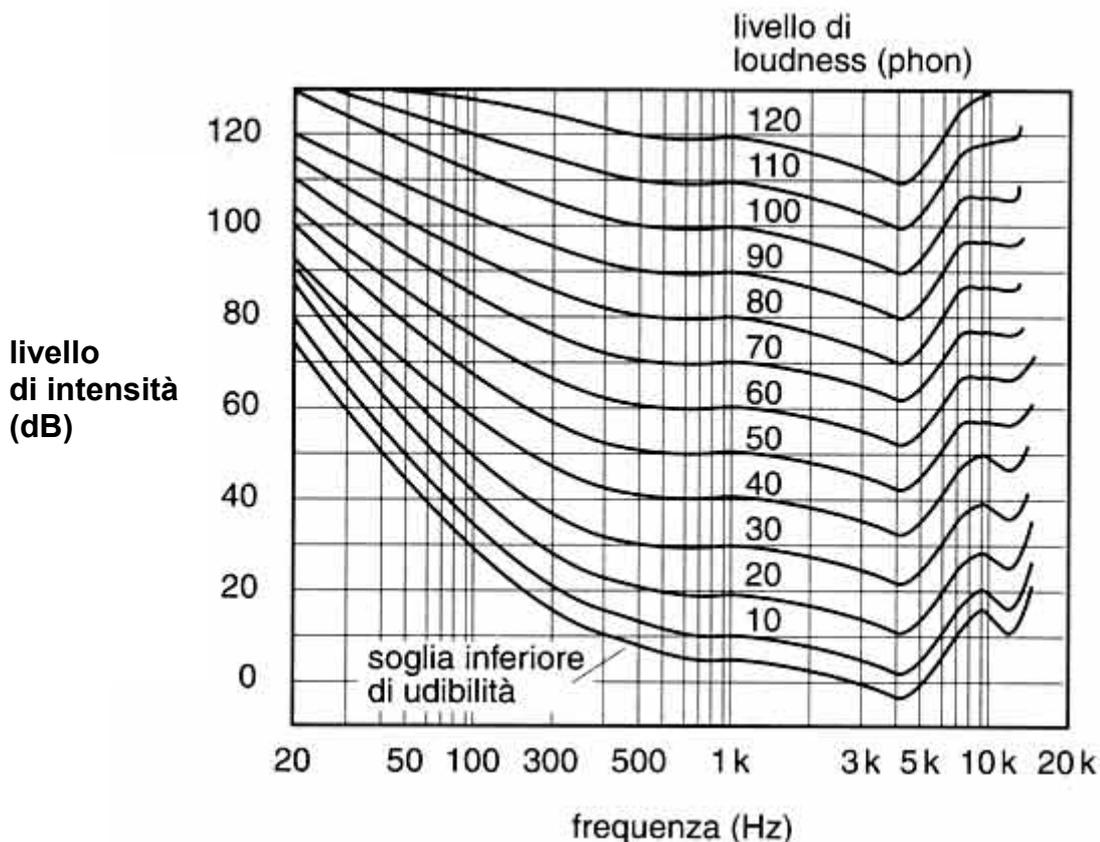


Fig. 3-2

dB vs dBA

Lo strumento usato per rilevare l'intensità di un suono è il fonometro. Normalmente il rivelamento dell'intensità viene operato con un filtro che segue una curva di tipo A, che simula la risposta del nostro sistema uditivo. La misurazione dell'intensità con questa curva viene indicata in dBA



Fig. 3.3 Il fonometro

Scala dell'intensità soggettiva (o sensazione sonora)

Il nostro sistema uditivo presenta delle analogie per quanto riguarda la percezione dell'altezza e dell'intensità. Entrambe sono grandezze psicofisiche che hanno una relazione logaritmica con le grandezze fisiche: l'altezza è in relazione logaritmica con la frequenza, l'intensità con la potenza sonora. Tuttavia se per l'altezza esistono delle unità di misura universalmente accettate e storicamente consolidate (l'ottava, gli intervalli basati sulle relazioni tra gli armonici naturali), per l'intensità il discorso è molto più vago.

Nel 1936, il fisico americano S. Stevens col fine di ottenere una unità di misura lineare della sensazione soggettiva di intensità ha creato una scala di sonorità avente per unità di misura il **son**. 1 son corrisponde alla sensazione di volume sonoro prodotto da un suono sinusoidale con frequenza 1000 Hz e di intensità 40 dB, quindi con intensità soggettiva pari a 40 Phon, un suono che venga giudicato n volte più forte vale n son. Vari test psicoacustici hanno condotto alla conclusione che a ogni aumento di 10 Phon corrisponde un raddoppio dei son, quindi dell'intensità soggettiva.

Nella fig. 3.1. a fianco della scala in dB ho posto la scala dei son.

Livello di dinamica	Phon	Sone
<i>fff</i>	100	64
<i>ff</i>	90	32
<i>f</i>	80	16
<i>mf</i>	70	8
<i>p</i>	60	4
<i>pp</i>	50	2
<i>ppp</i>	40	1

Fig. 3.4 Corrispondenza dinamiche/Son

Intensità e pressione sonora.

L'intensità (Sound Intensity Level o SIL) è una grandezza che, analogamente a quanto accade per le onde luminose, misura la quantità di energia trasportata dall'onda sonora. Il calcolo dell'intensità di un suono viene fatto, con riferimento alla soglia di udibilità, moltiplicando il logaritmo del rapporto tra le due intensità per 10.

Più frequentemente dell'intensità viene misurato il livello di pressione sonora (SPL = Sound Pressure Level) dell'onda sonora, cioè la deviazione di pressione che l'onda sonora determina rispetto alla pressione atmosferica⁶

Dal momento che l'energia misurata dall'intensità è proporzionale al quadrato della pressione, il calcolo della pressione viene fatto moltiplicando il rapporto tra il livello di pressione del suono in questione e il livello di riferimento per 20 invece che per 10.

Nei sistemi di riproduzione del segnale audio (sia analogico che digitale: mixer, amplificatori di potenza, registratori, editor audio, strumenti per l'hard disk recording e via dicendo) questo livello di riferimento corrisponde non più alla soglia di udibilità ma alla soglia del rumore, ossia il livello

⁶In realtà si calcola la pressione quadratica media o RMS (root mean square)

di pressione al quale il sistema audio non è più in grado di rispondere linearmente e nel quale si inizia a produrre la distorsione del suono in ingresso.

Tale livello è tarato a 0 dB; i valori in dB degli altri suoni vengono indicati in una scala negativa, dove, ad ogni abbassamento di 6 dB, corrisponde un dimezzamento dell'intensità.

Riassumendo:

Livello di intensità dell'onda sonora (SIL) =

$$10 \cdot \text{Log} (W1/W2)$$

Livello di pressione dell'onda sonora (SPL) =

$$20 \cdot \text{Log} (P1/P2)$$

LEGGE DELL'INVERSO DEL QUADRATO

Per quanto riguarda un'onda sonora che si propaga liberamente nell'aria, il rapporto tra la distanza dalla sorgente sonora e l'intensità segue la legge dell'inverso del quadrato.

Se il rapporto tra le due distanze è 10, il rapporto tra le due intensità sarà 100. Si può seguire la seguente regola pratica: a ogni raddoppio della distanza l'intensità diminuisce quattro volte.

Il rapporto tra due intensità (R_i) trasportate dall'onda sonora a distanze diverse è pari al rapporto tra le due distanze (R_d) elevato al quadrato.

Nella figura le aree in grigio si riferiscono alle superfici in cui si propaga l'onda alla distanza d_1 e alla distanza d_2 . Il rapporto R_i è uguale a $(d_2/d_1)^2$. La differenza di intensità nei due punti è : $10 \text{ Log} (d_2/d_1)^2$

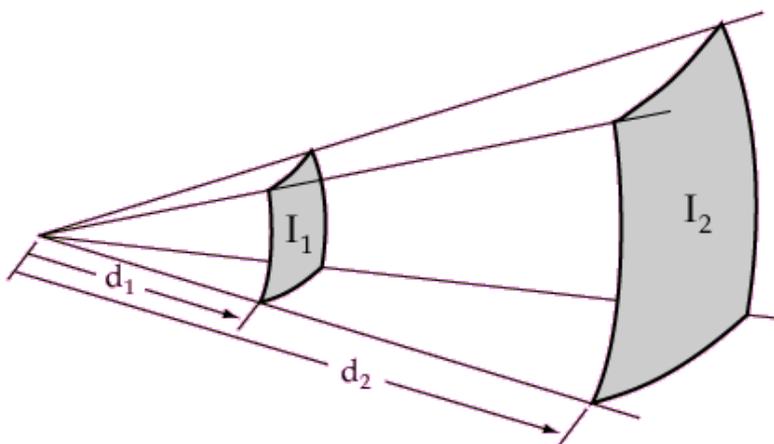


Fig. 3.5 Rapporto intensità/distanza: la superficie coperta dall'onda sonora alla distanza d_2 è 4 volte quella coperta alla distanza d_1

4.	Lezione di acustica	L'orecchio umano, struttura e funzioni delle varie parti. La coclea, la membrana basilare e la teoria posizionale della frequenza. Banda critica, Discriminazione, Asprezza, Battimenti. Mascheramento acustico.
----	----------------------------	---

STRUTTURA

L'orecchio è diviso in tre parti: orecchio esterno, medio e interno.

L'orecchio esterno comprende il **padiglione**, il **condotto uditivo** e il **timpano**.

Il padiglione è caratterizzato dalla presenza di pieghe e protuberanze della cartilagine (elice, antielice, trago e antitrago) che formano canali e cavità (concia, fossa) utili a "colorare" il suono in arrivo; il condotto uditivo (o **meato**) è un canale lungo circa 2,4 cm che collega il padiglione al timpano. Il timpano è una membrana con una superficie pari a circa 80 mm².

L'orecchio medio è composto da tre ossicini: il **martello**, l'**incudine** e la **staffa**, le ossa più piccole presenti nel nostro corpo.

L'orecchio interno ospita la coclea e il labirinto, una struttura che ha funzione di equilibrio ma che non interessa il senso dell'udito. (fig. 4.1 struttura dell'orecchio).

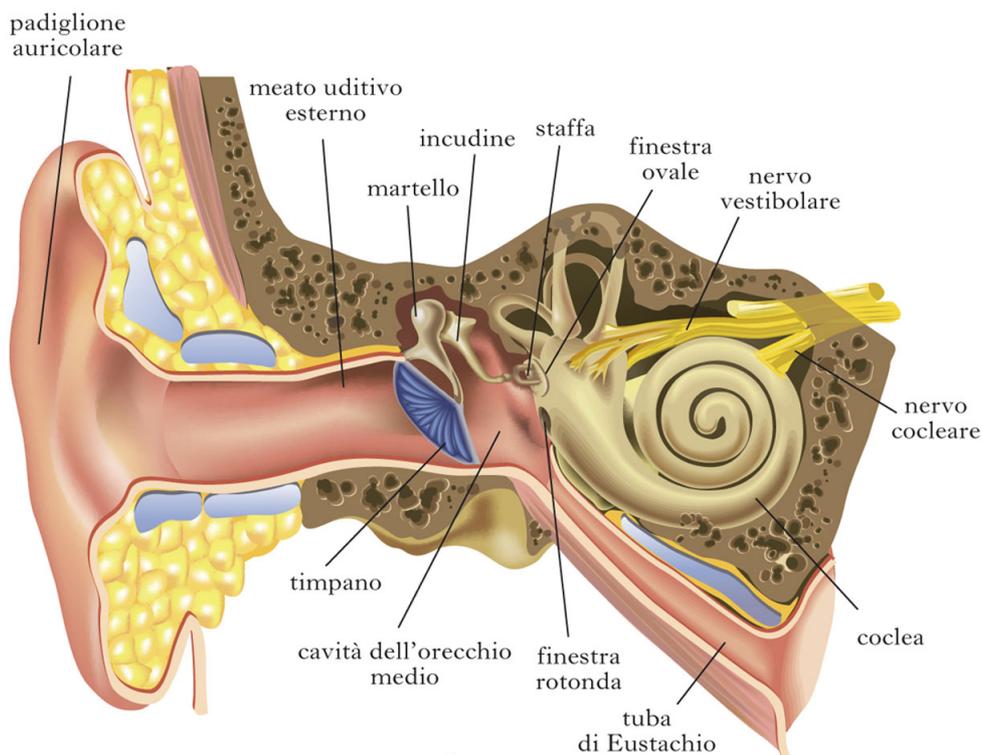


Fig. 4-1 Struttura dell'orecchio

La coclea, come suggerisce il nome latino, è un tubicino a forma di una chiocciola lungo circa 3,5 cm. che si avvolge a spirale compiendo tre giri e mezzo. Immaginando di poterla srotolare potremmo rappresentarla come segue:

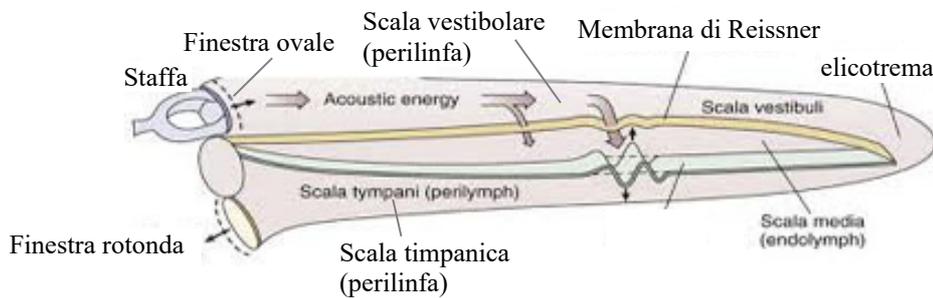


Fig. 4-2 Coclea “srotolata”

La coclea è divisa in due semicavità, la **scala vestibolare** e la **scala timpanica**, che comunicano fra di loro attraverso un minuscolo forellino situato in prossimità dell’apice della coclea. Questo foro prende il nome di **elicotrema**. I due canali sono pieni di un fluido denso chiamato **perilinfia** e si comportano come un unico sistema idrodinamico: il fluido non è compressibile e ha una sua inerzia, proprietà che consentono al fluido di far viaggiare onde di pressione tra la finestra ovale, a contatto con la staffa, e la finestra rotonda all'estremità della coclea. Tra i due canali troviamo un canale centrale, diviso dalla scala vestibolare dalla **membrana di Reissner**, denominato scala media o condotto cocleare, pieno di un fluido chiamato **endolinfia**. Alla base della scala media si distende, per quasi tutta la lunghezza della coclea (circa 34 mm) una membrana elastica. Questa membrana, detta **membrana basilare**, ospita diverse migliaia di cellule (circa 24000) le cui terminazioni superiori (**stereocilia**) sono immerse nell'endolinfia e inserite in un tessuto gelatinoso detto membrana tectoria. Queste terminazioni hanno una forma che ricorda vagamente quella delle ciglia, da qui il nome **cellule ciliate** con cui vengono chiamate queste cellule. Le cellule ciliate sono i ricettori del senso dell'udito.

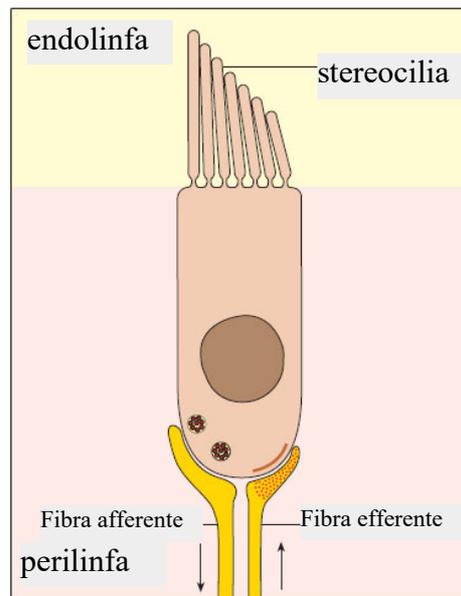


Fig. 4-3 Cellula ciliata. Il numero delle stereocilia in una singola cellula varia a seconda della posizione di questa lungo la MB. I due sostegni in basso rappresentano le fibre nervose che raccolgono il segnale dalla cellula (fibre afferenti) e quelle che invece inviano in segnale alla cellula (fibre efferenti).

La membrana basilare è più stretta (0,04 mm) in prossimità della finestra ovale e si ispessisce e si allarga (0,5 mm) avvicinandosi all'elicotrema. A causa del graduale cambiamento in larghezza e spessore c'è un incremento pari a 10000 volte della rigidità della membrana; queste differenze di massa e tensione consentono alla membrana basilare di svolgere la sua funzione primaria di analizzatore delle frequenze.

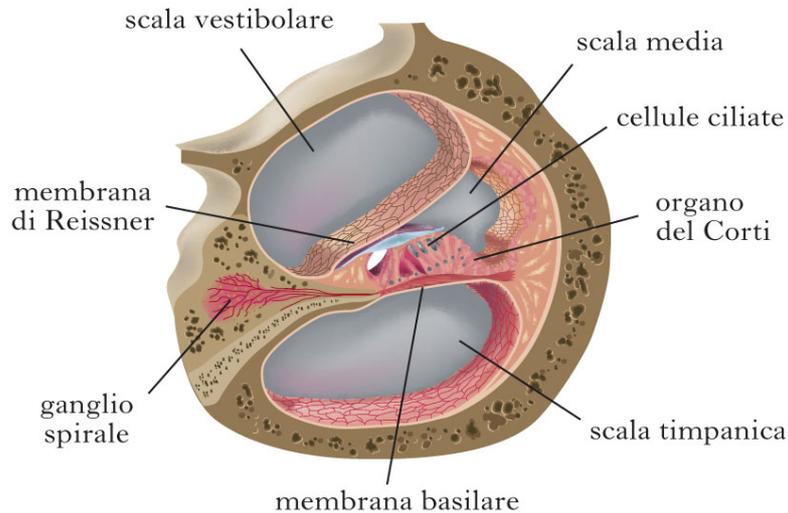


Fig. 4-4 sezione della coclea

Le cellule ciliate sono disposte in 4 file (fig 4.5): tre file di cellule ciliate esterne e una fila di cellule ciliate interne, ciascuna fila conta diverse migliaia di cellule. Tutte le cellule sono connesse a fibre del nervo uditivo, ma il 95% delle fibre nervose del nervo uditivo che raccolgono segnali dalle cellule (fibre afferenti) riceve informazioni solo dalle cellule interne, che possono essere considerate le cellule che svolgono la funzione primaria di riconoscimento delle altezze. D'altra parte le cellule interne svolgono un'importante funzione di amplificazione della vibrazione della membrana basilare, una funzione che consente al nostro sistema uditivo di essere particolarmente sensibili anche alle onde sonore di intensità molto bassa.

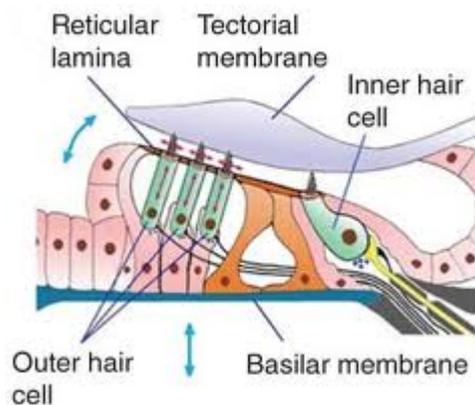


Fig. 4-5 L'organo di Corti in sezione, le cellule ciliate sono distribuite in tre file di cellule esterne, con funzione di amplificazione della vibrazione della MB, e una fila di cellule ciliate interne. A ogni cella afferiscono dalle 10 alle 50 fibre nervose. Il Marchese Alfonso Corti studiò per primo la struttura e il funzionamento di quest'organo nel 1851.

FUNZIONI

Il padiglione

Il padiglione ha la funzione di localizzare la sorgente sonora. Questa funzione, particolarmente visibile negli animali predatori e ancor più nelle prede, dove questo elemento oltre che essere molto più esteso è anche mobile, ha una funzione importante anche per gli uomini, in particolare per la localizzazione laterale (che può essere determinata grazie ad un eventuale ritardo d'arrivo dell'onda sonora in un orecchio rispetto all'altro), posteriore (i suoni provenienti da dietro vengono opportunamente filtrati dal padiglione) e verticale. Il sistema con cui il padiglione è in grado di modificare il contenuto spettrale di un suono in arrivo al nostro orecchio è rappresentato dalle cavità del padiglione che fungono da risuonatori delle frequenze intorno ai 5000 Hz.

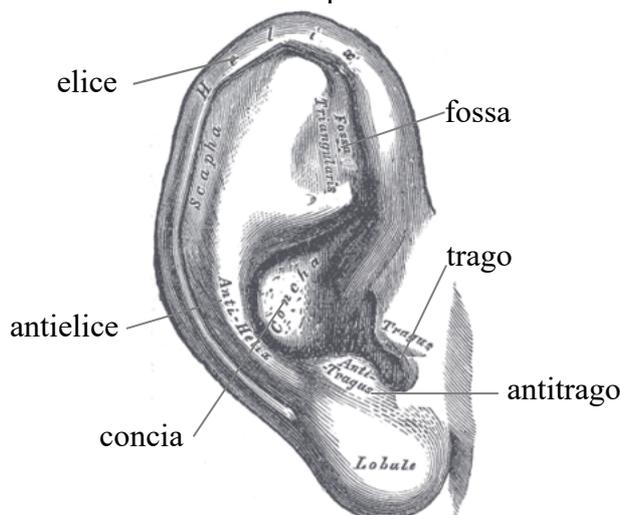


Fig. 4-6 Il padiglione auricolare

Il condotto uditivo o meato

Il condotto uditivo ha la funzione di incanalare l'onda di pressione verso il timpano. Il condotto è lungo circa 2,4 cm, si comporta come un tubo aperto a una estremità (dove la lunghezza d'onda è pari a 4 volte la lunghezza del tubo) e ha una frequenza di risonanza intorno ai 3800 Hz, questo spiega la maggiore sensibilità del nostro orecchio in questa zona di frequenze.

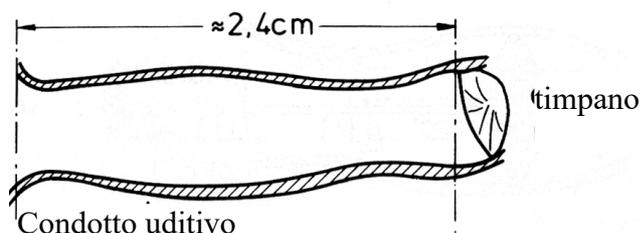


Fig. 4-7 Il meato ha una frequenza di risonanza che è pari a $V/4L$ (ca. 3800 Hz)

Il timpano

Il timpano è una membrana che, similmente alla membrana di un altoparlante, viene posta in vibrazione dall'onda sonora. Il timpano trasforma in vibrazioni meccaniche le oscillazioni di pressione dell'onda acustica e le trasmette al martello.

Gli ossicini e la finestra ovale

La vibrazione meccanica del timpano viene raccolta dai tre ossicini che formano l'orecchio medio, e trasmessa, per ultima dalla staffa e attraverso la finestra ovale, all'interno della coclea. La

finestra ovale è la porta d'accesso all'orecchio interno, ha funzione e struttura analoghe a quelle del timpano ma una superficie 25 volte inferiore. La differenza di area fra timpano e finestra ovale (80 mm^2 contro 3 mm^2) determina un aumento della pressione di circa 25 volte, questo aumento della pressione compensa la perdita di intensità dell'onda acustica dovuta alla forte resistenza del fluido cocleare nell'orecchio interno, in questo caso gli ossicini funzionano quindi come adattatori di impedenza.

Se al nostro orecchio arriva un suono troppo forte gli ossicini sviluppano un sistema di protezione nei confronti nell'orecchio interno: il muscolo del timpano si irrigidisce mentre la staffa si allontana dalla finestra ovale riducendo il trasferimento della vibrazione. Questo movimento prende il nome di riflesso di Stapedio.

Riassumendo gli ossicini hanno due funzioni: amplificare la vibrazione e proteggere l'orecchio interno in caso di suoni molto forti.



Fig. 4-8 I tre ossicini che formano l'orecchio medio

La coclea

Nella coclea la vibrazione della staffa sulla finestra ovale determina, nella perilinfa, un'onda di pressione viaggiante tra le estremità della coclea (finestra ovale e finestra rotonda). Quest'onda causa, a sua volta, un'oscillazione trasversale della membrana basilare, che, spinta dal basso (scala timpanica) dalla pressione del fluido, si flette su e giù secondo un movimento che somiglia a quello di una bandiera al vento.



Fig. 4-9 vibrazione della membrana basilare

Man mano che l'onda viaggia verso l'apice la sua ampiezza aumenta fino a un punto di massima vibrazione in corrispondenza della frequenza di oscillazione della staffa, quindi l'onda muore rapidamente verso l'apice. Per un suono puro di una data frequenza il punto di massima vibrazione della MB si ha in una regione molto limitata in un punto che dipende dalla frequenza del tono: se la frequenza è acuta, questo punto è vicino alla staffa, se la frequenza è grave, questo punto cade vicino all'apice.

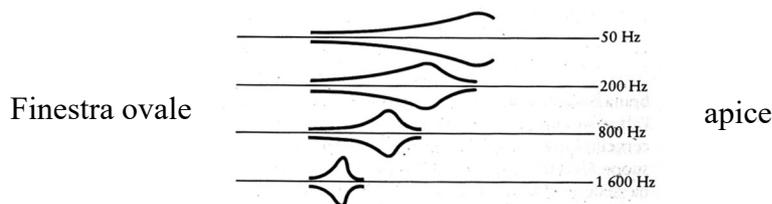


Fig. 4-10 punti di massima oscillazione lungo la membrana basilare. A frequenze acute corrispondono punti di massima vibrazione vicino alla finestra ovale. Si noti l'asimmetria dell'onda, che cresce gradualmente fino al massimo d'ampiezza per poi decadere rapidamente in direzione dell'apice.

In corrispondenza del punto di massima vibrazione della membrana basilare, si ha una sollecitazione delle cellule cigliate disposte in quella regione. Le stereocilia, spinte dal basso verso l'alto sempre più a contatto con la membrana tectoria, si flettono e attivano dei segnali elettrici che vengono trasmessi dalle cellule ciliate prima alle fibre del nervo uditivo e poi alle cellule del cervello.

Secondo questa teoria il riconoscimento delle altezze è dovuto al punto di massima deformazione della membrana, e quindi alla posizione, lungo la membrana, delle cellule che vengono sollecitate.

Queste cellule, un po' come i tasti di un pianoforte, inviano informazioni su una determinata frequenza, più sono vicine alla finestra ovale più acuta è questa frequenza.

Questa teoria prende il nome di **teoria posizionale** o **tonotopica** e si deve ancora alle intuizioni dello scienziato tedesco Hermann von Helmholtz (1863) e alle ricerche del premio Nobel ungherese Georg von Békésy (1957). Il primo, autore del fondamentale *Sulla sensazione del suono*, diede un modello di funzionamento dell'orecchio interno ancora oggi valido nei suoi aspetti principali. Per H. l'orecchio funziona come un analizzatore di frequenze. I suoni che arrivano al nostro orecchio sono onde che hanno modelli di variazione di pressione relativamente semplici e provengono da ben determinate sorgenti sonore. Il concetto di suono complesso, cioè composto da tanti suoni semplici, non ha senso se non per la teoria matematica e per il nostro sistema uditivo. E' infatti il nostro orecchio a scindere un suono complesso nei suoni puri che lo compongono, grazie a un fenomeno di risonanza simile a quello che permette alle corde di un pianoforte di risuonare se cantiamo o suoniamo uno strumento molto vicino alla tavola armonica ⁷ con gli smorzatori sollevati. *“Supponiamo di collegare ogni corda del pianoforte alle fibre nervose, in modo tale che queste fibre siano eccitate ogni volta che la corda viene messa in vibrazione. Ogni suono musicale prodotto all'interno dello strumento provocherà una serie di sensazioni che corrisponderanno esattamente alle vibrazioni pendolari in cui il movimento originale dell'aria può essere analizzato.”*

D'altra parte il nostro orecchio può percepire separatamente le singole armoniche di un suono strumentale solo in circostanze estremamente particolari, che abbiamo descritto nel secondo capitolo parlando dell'ascolto analitico. In realtà il sistema uditivo funziona come un analizzatore di frequenze a un livello periferico (orecchie), mentre al livello centrale (cervello) i dati in arrivo dal nervo uditivo vengono elaborati e confrontati per una resintesi del suono complesso originale. Solo un doppio processo di analisi (sistema uditivo periferico) e resintesi (sistema uditivo centrale) permette di spiegare come mai non siamo in grado di percepire separatamente armoniche molto lontane in frequenza appartenenti allo stesso suono, ma siamo in grado di separare armoniche vicine appartenenti a suoni diversi (ad es. il suono di un oboe e il suono di un clarinetto).

Bande critiche e mascheramento

Il modello fisico proposto da Helmholtz presuppone che la coclea agisca come analizzatore meccanico dello spettro di frequenze. Possiamo quindi immaginare la coclea come la sovrapposizione di filtri aventi una larghezza di banda che chiameremo banda critica. All'interno di queste bande di frequenze si verificano tutta una serie di fenomeni psicoacustici. Ne studiamo due particolarmente importanti:

- 1) due suoni puri non sono percepibili distintamente ma in modo confuso;
- 2) un suono forte maschera un suono debole in modo più efficace rispetto a quanto accadrebbe se i due suoni giacessero su bande critiche diverse.

⁷ Nella sequenza X per tromba in do e risonanze del pianoforte, Luciano Berio prevede che l'esecutore produca determinati suoni con la campana dentro il pianoforte, con il pianista che ha la sola funzione di cambiare il pedale di risonanza e di premere, senza suonarli, i tasti che corrispondono alle corde che l'autore vuole far risuonare. Chissà che l'ispirazione non sia venuta a Berio dalla lettura del lavoro di Helmholtz.

Il campo delle frequenze udibili comprende circa 24 bande critiche che non vanno pensate come 24 filtri indipendenti, in quanto qualsiasi suono corrispondente a una frequenza udibile troverà una banda critica centrata su di essa. Un equalizzatore grafico normalmente usato nei programmi di editing audio può dare l'idea del funzionamento della coclea.

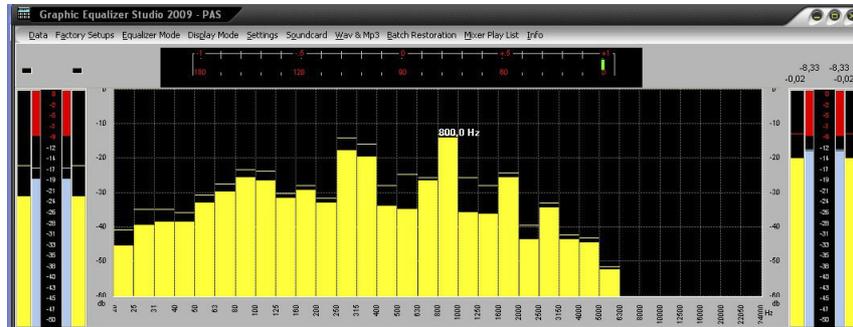


Fig. 4.11 Equalizzatore grafico usato in fase di editing audio per attenuare o enfatizzare determinate zone di frequenza. L'equalizzatore è composto da 30 filtri con una larghezza di banda pari a un terzo di ottava. La coclea può essere immaginata, analogamente, come un insieme di 24 filtri passabanda, con la differenza che ogni frequenza può essere pensata come frequenza centrale di un filtro.

Per le frequenze gravi e medie, all'incirca fino ai 500 Hz, la larghezza della banda critica è costante e si aggira intorno ai 100 Hz; per le frequenze superiori ai 500 Hz la banda critica cambia ma in funzione della frequenza, mantenendosi intorno a un intervallo poco inferiore alla terza minore.

Semplificando molto, possiamo dire che; per calcolare la larghezza di una banda critica centrata a una frequenza f , basta moltiplicare f per un fattore 0.18.

Ad es., considerando una frequenza centrale a 1000 Hz, la banda critica ha una larghezza di circa 180 Hz. Pertanto due suoni puri in questa zona dello spettro devono essere separati da almeno 180 Hz per essere percepiti distintamente.

Illustriamo ora con maggiore attenzione i due principali fenomeni psicoacustici che si verificano in una banda critica, fenomeni che abbiamo già elencato:

1 - Due suoni puri non sono percepibili distintamente ma in modo confuso.

Nella fig. 4.5. ho immaginato di rappresentare gli involuipi di ampiezza della deformazione della membrana basilare per due suoni puri inviati contemporaneamente al nostro orecchio.

Se i suoni hanno frequenze molto diverse (casi a e b) i punti di sollecitazione sono lontani e gli involuipi d'ampiezza non si sovrappongono in modo significativo; se i due suoni hanno valori di frequenza vicini si avrà invece un accavallamento dei due involuipi. Questo accavallamento produce un disturbo nella trasmissione dei segnali che arriveranno confusi al nostro cervello. Questa grossolana descrizione del comportamento della membrana basilare trova una parziale conferma nei test di psicoacustica.

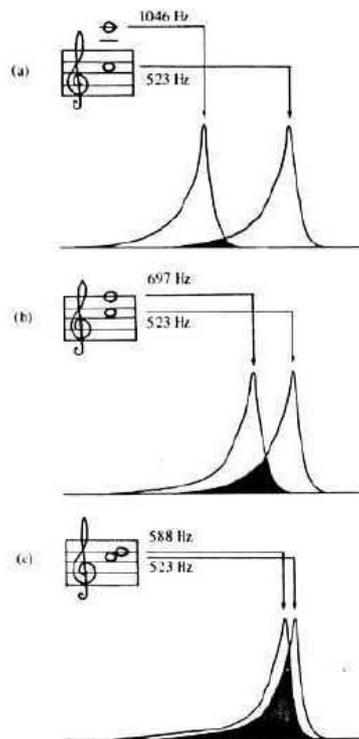


Fig. 4.12 punti di massima vibrazione della MB per due suoni puri via via più ravvicinati.

Nella fig. 4.6. ho descritto il seguente esperimento: due suoni puri vengono trasmessi ad un ascoltatore. Il primo suono f_1 ha frequenza fissa; il secondo f_2 parte da una frequenza molto più bassa (ad es. un'ottava sotto $f_1/2$) e si muove, glissando in direzione ascendente, fino ad arrivare all'unisono ($f_2=f_1$) a metà del tempo, per poi continuare a salire fino all'ottava sopra f_1 .

Nella tabella sotto ho riportato le sensazioni uditive prodotte da questa sovrapposizione, che, come si può vedere, cambiano a seconda della differenza in frequenza fra i due suoni. Passiamo da una percezione distinta dei due suoni a una percezione di **asprezza**, poi sentiamo una sola frequenza modulata in ampiezza (**battimenti**) e quindi un unisono a metà dell'esperimento (es. audio 4.1)

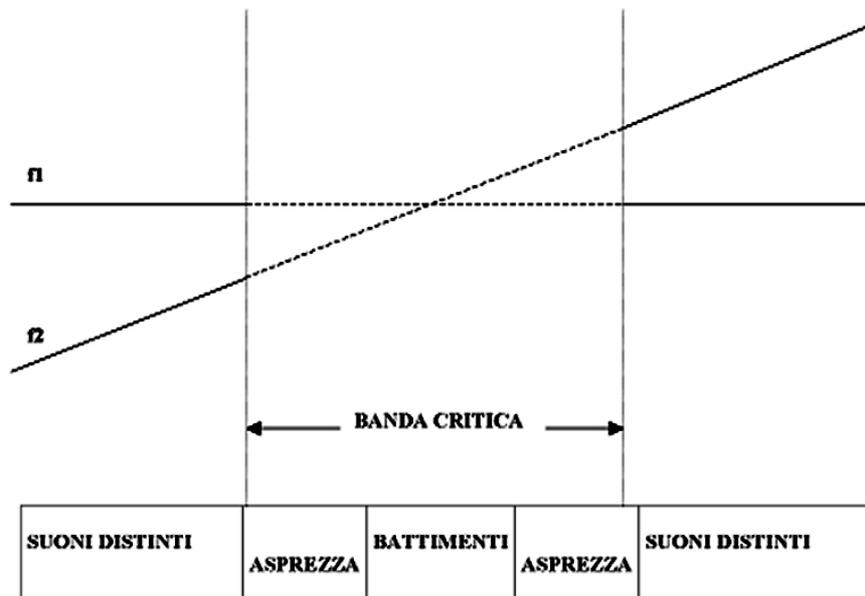


Fig. 4-13 - effetti percettivi prodotti dalla sovrapposizione di due sinusoidi: discriminazione, asprezza, battimenti.

2 - Un suono forte maschera un suono debole in modo molto più efficace rispetto a quanto accadrebbe se i due suoni giacessero su bande critiche diverse.

Chi vive in città ha una continua esperienza del mascheramento acustico: l'alto volume della televisione ci impedisce di sentire cosa dice nostra madre dalla stanza vicina; il passaggio dell'autobus nasconde la voce del nostro amico che ci parla al cellulare. In presenza di un suono mascherante aumenta la nostra soglia di udibilità: per farsi sentire nostra madre e il nostro amico dovranno urlare. Lasciamo l'esperienza quotidiana per chiuderci in laboratorio. Gli studi sul mascheramento, così come la maggior parte degli esperimenti di psicoacustica classica, sono stati fatti dagli scienziati utilizzando dei suoni puri. Uno dei primi esperimenti sul mascheramento è stato quello di tracciare nuove soglie di udibilità in presenza di suoni puri mascheranti a diverse altezze, queste soglie prendono il nome di **soglie di mascheramento**. Studiando i dati ottenuti si è giunti a

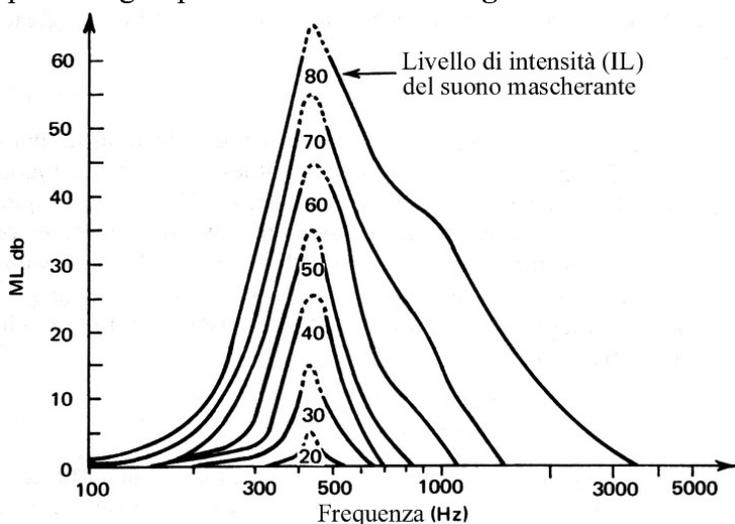


Fig. 4.14
Soglie di mascheramento in presenza di un suono puro mascherante a 415 Hz

queste conclusioni:

- 1) Più vicini sono le frequenze più efficace è il mascheramento.
- 2) Maggiore è l'intensità del suono mascherante, maggiore è l'intervallo di suoni mascherati.

- 3) Suoni deboli mascherano solo suoni con frequenze molto vicine. Il mascheramento avviene allo stesso modo per le frequenze più gravi e per quelle più acute.
- 4) Suoni forti mascherano anche frequenze molto lontane ma solo se queste sono più acute. Per suoni a forte intensità possiamo quindi dire che i suoni gravi mascherano meglio i suoni acuti che non viceversa. Questo fenomeno prende il nome di **asimmetria del mascheramento**. (esempio audio 4.2)

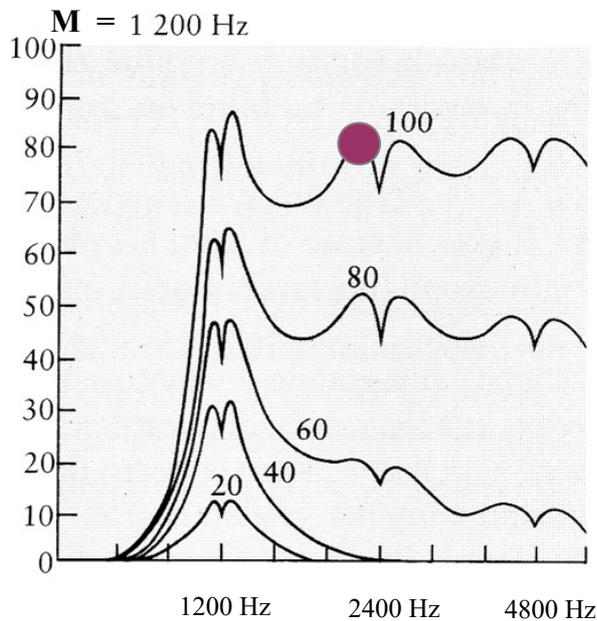


Fig. 4.15

Soglie di mascheramento in presenza di un suono puro mascherante a 1200 Hz con diversi livelli di intensità.

In presenza di un suono mascherante debole (20 o 40 dB) la soglia di mascheramento interessa, allo stesso modo, solo le frequenze molto vicine.

In presenza di un suono mascherante forte (100 dB) la soglia di mascheramento si estende, per una larga fascia di frequenze, solo verso l'acuto. Ad es. un suono a 2200 Hz (cerchietto viola), per essere udibile, deve avere un'intensità non inferiore a 80 dB

Esperimenti sul mascheramento sono stati fatti anche utilizzando come suoni mascheranti delle bande di rumore. Si è visto in questo caso che solo una stretta banda di rumore intorno al suono puro causa il mascheramento del suono. Una banda di rumore di grande intensità ma uniformemente distribuita su tutto lo spettro maschera il suono puro allo stesso modo di una banda di rumore con un'intensità molto minore ma con una larghezza di banda concentrata all'interno della banda critica (es. audio 4.3).

Un altro esperimento che consente di verificare la larghezza della banda critica è il confronto di livelli di volume per bande di rumore aventi la stessa intensità ma distribuite su bande di frequenza sempre più larghe. Non appena la larghezza di banda del rumore supera quello della banda critica percepiamo una drastica diminuzione del volume (es. audio 4.4).

Esperimenti condotti a partire dagli anni '50 hanno messo in luce un fenomeno di "illusione uditiva" che, in analogia a fenomeni simili nel campo visivo, è stato chiamato "effetto uditivo figura-sfondo". Alternando rapidamente una banda di rumore a un suono puro si è notato che, a bassi livelli di intensità del suono, questo non viene più percepito come suono intermittente, come nella realtà fisica, ma come un suono continuo. Il livello di intensità al di sotto del quale si verifica questo fenomeno è detto soglia di pulsazione. Le soglie di pulsazione sono molto simili a quelle di mascheramento e sono anch'esse una conferma del fatto che il nostro sistema uditivo periferico ha una funzione primaria di analizzatore di frequenze (es. audio 4.5).

La banda critica, a partire dagli anni '40, quando il fisico Harvey Fletcher fece i primi esperimenti che lo portarono a ipotizzarla, è una conferma del modello fisico di funzionamento dell'orecchio già

ipotizzato da Helmholtz. Oggi è un concetto alla base di un'infinità di studi e applicazioni, il cui esempio più attuale e di maggior successo consiste nella compressione audio usata nel mondo digitale. Le codifiche di compressione sviluppate come standard MPEG (fra questi il più importante è il notissimo mp3, brevettato dall'istituto Fraunhofer di Norimberga) hanno alla base lo stesso principio di funzionamento: nella fase di decodifica il segnale audio viene analizzato da un banco di filtri (qualcuno di più rispetto alle bande critiche, se ne usano infatti 32), per ciascuna banda di frequenze si stabilisce quali sono le informazioni percettivamente significative, pertanto vengono scartati i valori di ampiezza al di sotto della soglia di mascheramento, in questo modo si riduce drasticamente il numero di bit necessario a rappresentare il suono in quella fascia di frequenze.

Esempi audio

es. 4.1 – Banda critica: battimenti, asprezza e discriminazione.

Viene riprodotta una serie di 10 coppie di suoni sinusoidali simultanei: il suono f_1 è fisso, mentre f_2 sale a gradini da $f_1/1.5$ fino a $f_1/1$ (unisono) con i rapporti di frequenza indicati nella tabella; concentriamoci per sentire in corrispondenza di quale coppia iniziamo ad avere una percezione confusa dei due suoni. (n.b.: ascoltando questi esempi ad un volume alto si sentiranno chiaramente i suoni di combinazione, vedi cap.VII). L'esperimento viene ripetuto 4 volte su frequenze di f_1 pari a 150, 300, 500 e 1000 Hz.

N. coppia	Frequenza f_2
1	$f_1/1.5$
2	$f_1/1.4$
3	$f_1/1.3$
4	$f_1/1.2$
5	$f_1/1.1$
6	$f_1/1.05$
7	$f_1/1.025$
8	$f_1/1.01$
9	$f_1/1.0025$
10	$f_1/1$



4.1 [Bandacritica150Hz](#)



4.2 [Bandacritica300Hz](#)



4.3 [Bandacritica500Hz](#)



4.4 [Bandacritica1000Hz](#)

es. 4.2 - Asimmetria del mascheramento

es. 4.3 – Bande critiche e mascheramento

es. 4.4 – Bande critiche e comparazione del volume di bande di rumore

es. 4.5 – Soglie di pulsazione

5.	Lezione di acustica	Timbro, Teoria classica del timbro, Spettro, Inviluppo spettrale, Tratto vocale, Risonanza, Formanti.
----	----------------------------	--

“Senza il loro aiuto non sarei mai riuscito a fare le osservazioni che ho descritto con tale precisione e certezza”. In assenza di microfoni, oscilloscopi analogici e computer, gli scienziati dell'ottocento studiavano il suono musicale facendo ricorso a congegni ingegnosi: diapason fissati a piccole casse di risonanza, bottiglie prive di fondo e membrane cosparse di sabbia. Nella frase citata lo scienziato tedesco Hermann von Helmholtz fa riferimento ai risuonatori da lui stesso inventati, delle sfere cave di vetro o ottone con due aperture ai lati opposti della sfera: quella più piccola, a forma di piccolo imbuto, che veniva infilata nel padiglione auricolare, e l'altra, a forma di collo di bottiglia, che era destinata ad accogliere il suono che lo scienziato desiderava studiare. Il risuonatore di Helmholtz aveva una frequenza tipica di risonanza che dipendeva dal volume della sfera e dalla sezione del collo di bottiglia. Se il suono prodotto conteneva una componente armonica con una frequenza uguale a quella di risonanza della sfera, quest'ultima entrava in vibrazione amplificando l'armonico in questione. Avendo a disposizione un set completo di risuonatori “intonati” sulle armoniche di una certa fondamentale, era possibile studiare e comparare la “qualità” sonora di suoni strumentali o vocali che avessero in comune quella fondamentale. Si trattava di un'analisi fatta “a orecchio” che veniva trascritta in forma di tabella. Nella figura 5.1 è riportata una di queste analisi, fatta su tre suoni gravi di clarinetto da uno studioso inglese nel 1877.

	Armoniche	1	2	3	4	5	6	7	8
Altezza									
Fa		<i>f</i>	Appena udibile	<i>f</i>	...	<i>mf</i>	<i>p</i>	<i>mf</i>	<i>pp</i>
Mi ₁		<i>f</i>	Appena udibile	<i>mf</i>	...	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>mf</i>	<i>pp</i>
Re		<i>f</i>	Appena udibile	<i>mf</i>	<i>p</i>	<i>mf</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>pp</i>

Fig. 5.1 Tabella del peso dinamico delle armoniche di tre suoni gravi del clarinetto. Le dinamiche sono indicate con i simboli in uso nella pratica musicale. Sta in Helmholtz, cit. ed. Dover, p.99

Sulla base di questi studi e osservazioni, von Helmholtz arrivò alla conclusione che “la qualità dei suoni musicali deve dipendere dalla forma della vibrazione nell'aria”, forma che, se “trasformata” nel dominio della frequenza, dà luogo allo spettro del suono. Oggi queste analisi possono essere fatte rapidamente e con precisione registrando il suono da studiare e convertendo l'onda di pressione in segnale digitale. Un software analizza la forma d'onda operando su di essa la **trasformata di Fourier**, un procedimento matematico che, data una rappresentazione del segnale nel dominio del tempo, restituisce una rappresentazione nel dominio della frequenza. Questa rappresentazione prende il nome di **spettro di Fourier** o, più semplicemente, di **spettro**.

Lo spettro è quindi una rappresentazione bidimensionale che ci offre una “istantanea” delle ampiezze delle componenti. Trattandosi appunto di una istantanea, questa immagine non rende conto dell'evoluzione nel tempo dell'ampiezza delle parziali.

Per alcune tipologie d'inviluppo d'ampiezza della forma d'onda questo “equilibrio dinamico” può variare in maniera molto significativa a seconda del momento in cui la nostra istantanea viene

scattata. Del resto è abbastanza intuitivo che per alcuni tipi di strumenti il timbro può subire una vera e propria trasformazione in particolare dal momento dell'attacco al momento della tenuta o del decadimento. Una dimostrazione abbastanza elementare che l'andamento dinamico delle ampiezze può essere determinante per il riconoscimento del timbro, si può ricavare dalla riproduzione rovesciata (dalla fine all'inizio) di un suono impulsivo (es. di pianoforte), oppure tagliandone l'attacco: in entrambi i casi lo strumento che ha generato quel suono non sarà più riconoscibile.

Altre esperienze quotidiane che mettono in dubbio la solidità della teoria classica del timbro sono legate ai moderni strumenti di riproduzione e di trasmissione del segnale audio. Una riproduzione di una sinfonia registrata negli anni '30 oppure l'ascolto di un brano musicale da una vecchia radio o ancora, una comunicazione via telefono, tutti strumenti con limitate risposte in frequenza (si pensi che il telefono taglia le frequenze sotto i 300 Hz) non ci impediscono di riconoscere la sorgente sonora: lo strumento musicale che fa il tema della sinfonia o la persona che ci parla al telefono.

La teoria classica del timbro andrebbe quindi integrata sottolineando l'importanza del comportamento dinamico, nel tempo, dello spettro⁸. L'evoluzione temporale del contenuto spettrale, può avere differenze significative non solo nei suoni impulsivi (ad es. i suoni dell'arpa o della chitarra), ma anche nei suoni tenuti (per fare un esempio, nei suoni in *forte* della tromba le armoniche superiori entrano con un certo ritardo rispetto alle armoniche inferiori)⁹.

Un altro aspetto che rende particolarmente difficile una definizione di timbro è il fatto che questo, oltre a essere una qualità percettivamente **multidimensionale** (cioè legata all'incrocio di vari parametri: frequenza, intensità e tempo), è anche fortemente legato al **contesto** in cui il suono viene percepito. Tolto dal contesto musicale il suono perde tutta una serie di marcatori che consentono al nostro cervello di riconoscerlo. Se ascoltiamo un solo secondo di un suono di oboe o di un altro legno abbiamo alte possibilità di errore di riconoscimento anche per chi ha esperienze musicali. Il fatto che l'acuto di un soprano venga percepito su una certa vocale non dipende solo da quel suono, ma anche dai suoni che l'hanno preceduto. Il riconoscimento del timbro richiede quindi, rispetto all'altezza e al volume, un maggiore coinvolgimento delle funzioni cerebrali superiori come la memoria, la capacità di fare associazioni etc.

Queste integrazioni nulla tolgono alla validità delle intuizioni di Helmholtz: il timbro di un suono è comunque una conseguenza della struttura fisica di risonanza (dimensioni, materiali e forma della cassa armonica nei cordofoni o del tratto vocale nel caso della voce), che enfatizza particolari zone di frequenza (zone di risonanza) a scapito di altre (zone di antirisonanza).

RISONANZA

La risonanza è l'aumento di vibrazione che risulta ogni volta che la frequenza di una forza esterna corrisponde alla frequenza del sistema su cui agisce.

Un qualsiasi corpo vibrante in grado di ospitare, per le sue caratteristiche di elasticità, onde stazionarie (parliamo non solo dei corpi vibranti degli strumenti musicali come : corde, anse, colonne d'aria, membrane e piastre; ma anche delle parti dello strumento che formano la struttura di risonanza (nel pianoforte la tavola armonica, negli archi: il fondo, le fasce, la tavola), possono essere messe in vibrazione simpateticamente quando vengono perturbate da vibrazioni che hanno un periodo corrispondente a quello loro proprio.

Il meccanismo fisico non è diverso da quello che si verifica spingendo un'altalena. Questa funziona come un pendolo e ha una sua frequenza di vibrazione che dipende, sostanzialmente, dalla lunghezza della fune. Per aumentare l'ampiezza dell'oscillazione con una successione di spinte anche leggere, è necessario che la frequenza di queste spinte sia la stessa di quella dell'altalena,

⁸ Lo stesso Helmholtz affermava che:

⁹ L'evoluzione temporale del contenuto spettrale può essere analizzata grazie ad una rappresentazione tridimensionale dello spettro, o, ancora meglio, grazie al **sonogramma**, un'altra forma di rappresentazione in grado di descrivere l'andamento della dinamica delle singole parziali in funzione del tempo.

(presumibilmente l'altalena compie un'oscillazione completa in 2 secondi circa, per cui la frequenza sarà pari a 0.5 circa).

Nella nota a pagina x abbiamo parlato della Sequenza X per tromba e risonanze di pianoforte di Luciano Berio. Il trombetta suona alcune note volgendo la campana del suo strumento verso l'interno del pianoforte, facendo così entrare in vibrazione le corde che hanno la stessa frequenza delle armoniche contenute in quei suoni. In effetti un'esperienza molto semplice di risonanza la possiamo fare cantando e indirizzando la nostra voce nella cassa di risonanza di uno strumento a corde. Una voce di baritono non ha difficoltà a fare vibrare la cassa armonica di una chitarra (anche priva di corde!), perché la frequenza di risonanza dell'aria nella cassa armonica cade poco sopra i 100 Hz (tra il sol e il la).

Le strutture risonanti di cui parleremo nei prossimi capitoli non rispondono solo a una frequenza, un risonatore può avere molte diverse frequenze di risonanza. Ma come si individuano le frequenze di risonanza di un determinato sistema? Si può usare come forza guida un oscillatore elettrico collegato alla struttura in esame. L'oscillatore sinusoidale viene messo in vibrazione a tutte le frequenze e con un'ampiezza costante. Il grafico ottenuto misurando l'intensità della vibrazione in risposta al variare della frequenza della sinusoide prende il nome di **curva di risonanza** o **curva di risposta**.¹⁰ Nel caso di elementi di legno l'entità della vibrazione può essere studiata attraverso il metodo della interferometria olografica.

Le frequenze di risonanza possono essere ben definite oppure diffuse lungo una larga banda di frequenze. Una larga zona di risonanza attorno alle armoniche più forti che giacciono in una banda fissa di frequenze è detta **formante**. Uno strumento musicale può avere diversi formanti, Si ritiene che i formanti, cioè il rinforzo delle armoniche in determinate, e sempre fisse, zone di frequenza, siano una sorta di “firma” che il suono complesso porta con sé nel processo di identificazione effettuato dal cervello.

IL VIOLINO

Negli archi la vibrazione generata dallo sfregamento della corda con l'arco produce una forma d'onda triangolare¹¹, con il vertice del triangolo che si sposta in funzione del punto di sfregamento. Più questo è vicino al ponticello più il vertice del triangolo tende ad arretrare e un lato del triangolo tende a inclinarsi verso la perpendicolare. Suonando vicinissimo al ponticello si produce un'onda con una forma molto vicina al dente di sega. Per semplificare possiamo quindi dire che la forma d'onda prodotta negli archi dal corpo vibrante soggetto a sfregamento è un'onda a dente di sega contenente tutte le armoniche con ampiezza decrescente.

L'onda sonora definitiva irradiata dal corpo di un violino ha però una forma che è ben diversa da quella a dente di sega che si produce nella corda. Cosa è cambiato? Possiamo rispondere che la vibrazione della corda, prima di trasmettersi all'aria circostante, ha fatto un viaggio lungo e complesso. Se infatti negli strumenti a fiato lo strumentista eccita direttamente l'aria, negli strumenti

¹⁰ Oggi l'entità della vibrazione in una struttura vibrante può essere studiata attraverso il metodo della interferometria olografica. Prima del laser i modi di vibrazione propri di queste strutture (dalle membrane alle piastre, dalla tavola al fondo degli archi) venivano messi in evidenza col metodo usato dal fisico tedesco Ernst Chaldni (1756-1827), ossia spargendo della sabbia uniformemente lungo la tavola.

¹¹ Questo è dovuto al fatto che l'arco trascina con sé la corda per larga parte del periodo ma non per tutto; per una piccola porzione di questo la corda si “stacca” dall'arco per poi essere recuperata subito dopo e iniziare un nuovo ciclo. In inglese questo fenomeno è chiamato “stick and slip”, che noi potremmo tradurre come: “attacca e stacca”. Lo slip è rappresentato dal lato corto del triangolo, lo stick da quello lungo. Suonando con l'arco al centro della corda le due porzioni si equivalgono.

ad arco abbiamo una sequenza piuttosto complessa di passaggi: 1) l'arco mette in vibrazione la corda; 2) la corda mette in vibrazione una cassa di risonanza di legno; 3) la cassa di risonanza irradia l'onda sonora all'esterno dello strumento. Abbiamo dunque una catena di tre sistemi, ciascuno con una sua impedenza specifica, cioè con caratteristiche diverse di velocità e di propagazione dell'onda. In particolare, l'impedenza della corda è molto inferiore (1/10) a quella della tavola. Per consentire una corretta trasmissione di energia acustica fra due sistemi così diversi è necessaria la presenza di un mezzo con caratteristiche intermedie. Questo mezzo prende il nome di **adattatore di impedenza**. La funzione di adattatore di impedenza tra corda e cassa di risonanza è assolta dal ponticello di legno su cui le corde sono tese. Il ponticello è un pezzo di legno di abete molto leggero e rigido, capace di vibrare a frequenze molto acute. Il ponticello riceve la vibrazione delle corde e fa leva con i suoi due piedini sulla tavola, consentendo di trasformare le oscillazioni trasversali in una sola dimensione della corda, in oscillazioni in due dimensioni nella tavola. Il ponte ha una particolare efficienza di trasmissione per le frequenze tra i 1000 e i 4000 Hz.¹²

Un altro elemento, piccolo ma fondamentale, la cui funzione è di rendere più efficiente la il passaggio dell'onda sonora tra tavola superiore dello strumento e il fondo, è l'**anima**, un cilindretto di legno che si posiziona sotto la tavola all'altezza del ponticello e funziona anch'esso come adattatore di impedenza.

Anche la tavola e il fondo, considerate separatamente, hanno loro precise frequenze di oscillazione, tuttavia, per semplificare, si parla comunemente di una risonanza complessiva delle parti in legno: la risonanza del legno, che cade tra i 440 Hz e i 550 Hz Oltre a questa il violino ha un secondo tipo di risonanza principale: quella dell'aria all'interno del corpo, o risonanza di Helmholtz. La risonanza dell'aria è pari a 280 Hz circa e corrisponde approssimativamente alla frequenza della terza corda.

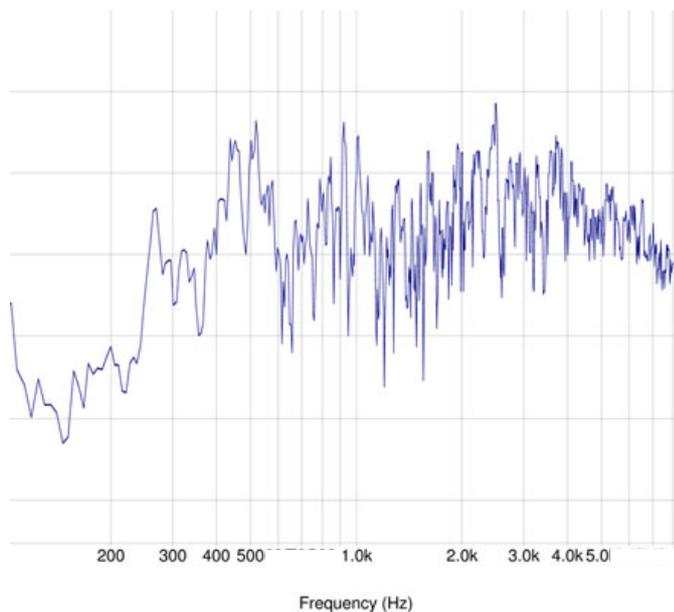


Fig. 5.2 Curva di risposta di un violino, si notino la risonanza dell'aria intorno ai 280 Hz, le risonanza del legno intorno ai 450 Hz e ai 550 Hz e una zona di risonanza più marcata intorno tra i 2000 e i 3000 hz che risulta da modi di oscillazione del legno localizzati in un area intorno all'anima e al ponte.

¹² Si può ridurre questa efficienza collocando sul ponticello una sordina.

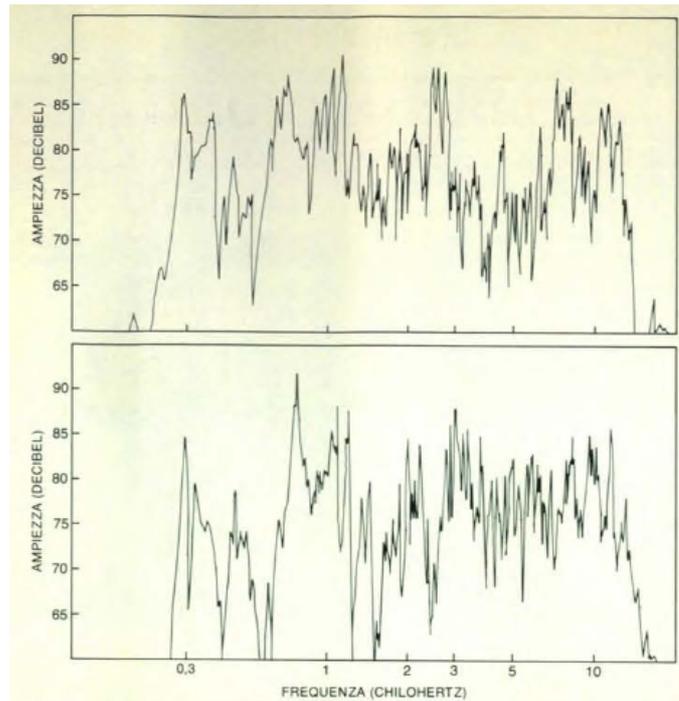


Fig. 5.3 Curve di risposta di uno Stradivari (in alto), e di un violino moderno, si notino la risonanza dell'aria intorno ai 280 Hz, le risonanza del legno intorno ai 450 Hz e ai 550 Hz e una zona di risonanza più marcata intorno tra i 2000 e i 3000 hz che risulta da modi di oscillazione del legno localizzati in un area intorno all'anima e al ponte.

LA VOCE

Nella figura 5.1 è illustrato l'organo vocale, le cui parti principali sono la laringe, la faringe e la cavità orale.

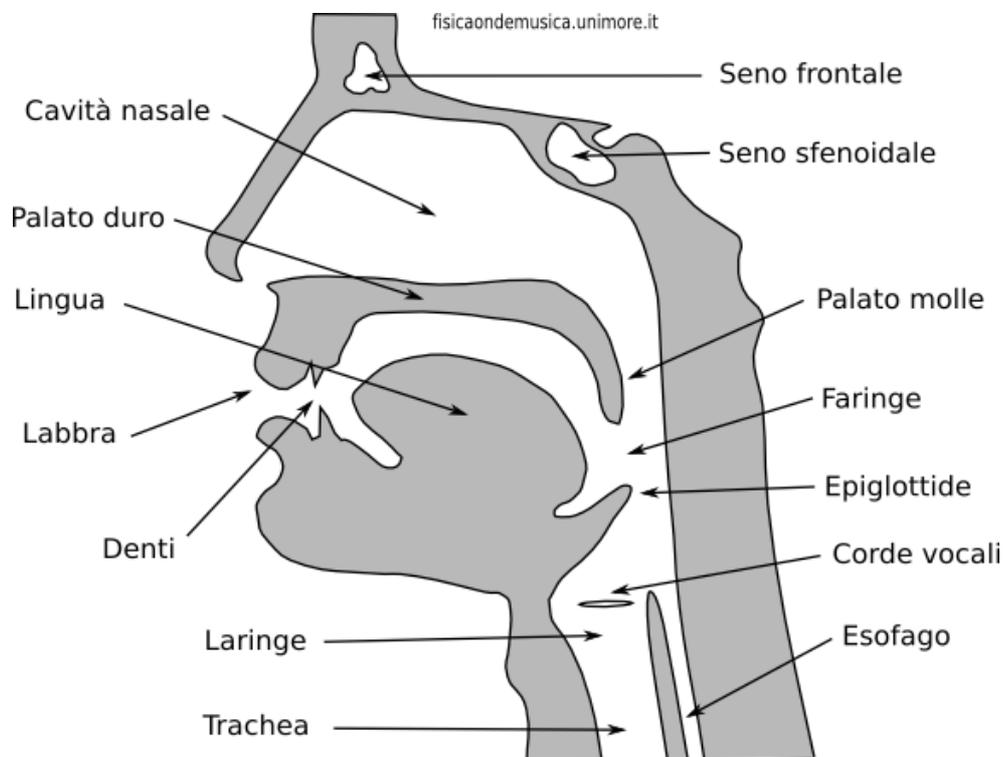


Figura 5-4

L'organo vocale è formato, come gli altri strumenti musicali, da un corpo vibrante e da una struttura di risonanza.

Il corpo vibrante sono le corde vocali, due pieghe di tessuto collocate nella laringe che durante l'emissione vocale tendono ad avvicinarsi occludendo la glottide.

La causa della vibrazione dipende dalla contrapposizione tra la pressione dell'aria che fuoriesce dai polmoni, che tende a divaricare le corde, e la tensione muscolare, che tende a chiuderle. Maggiore è la tensione maggiore è la frequenza del suono prodotto.

L'altezza del suono vocale dipende principalmente dalla tensione delle corde vocali

La struttura di risonanza è costituita dal cosiddetto **tratto vocale**, che comprende la cavità laringo-faringea, la cavità orale e la cavità nasale. Minore importanza, per la definizione dei formanti vocali, hanno i seni frontali e sfenoidali.

Il tratto vocale ha la stessa funzione della cassa di risonanza di uno strumento musicale, le armoniche che hanno frequenza coincidente con i modi di vibrazione della colonna d'aria costituita dal tratto vocale vengono rafforzate, mentre le altre vengono attenuate.

La peculiarità del tratto vocale, rispetto alla struttura di risonanza degli altri strumenti, è la sua mobilità.

Modificando la posizione della mascella, della lingua e delle labbra, si possono articolare tratti vocali con caratteristiche sensibilmente diverse, un po' come se passassimo da un flauto a un oboe

Per ogni vocale il tratto vocale cambia, dando luogo a una struttura di risonanza, e quindi a caratteristiche timbriche e spettrali, diverse.

Nelle voce è particolarmente visibile il fenomeno delle formanti, quelle zone dello spettro in cui si concentra, in maniera molto selettiva, l'energia.

Fondamentale, per il riconoscimento della vocale, è la frequenza delle prime due formanti

Nella figura 5.5 è riportato il sonogramma relativo ai suoni vocali intonati dal sottoscritto su una stessa fondamentale (sib2), ma con le cinque vocali standard della lingua italiana.

Saltano subito all'occhio alcune importanti differenze fra a, e ed i: la zona di antirisonanza intorno alla nona armonica della a si amplia in maniera molto netta nella vocale e e si allarga enormemente nella vocale i, dove arriva a interessare una zona di quasi 1000 Hz.

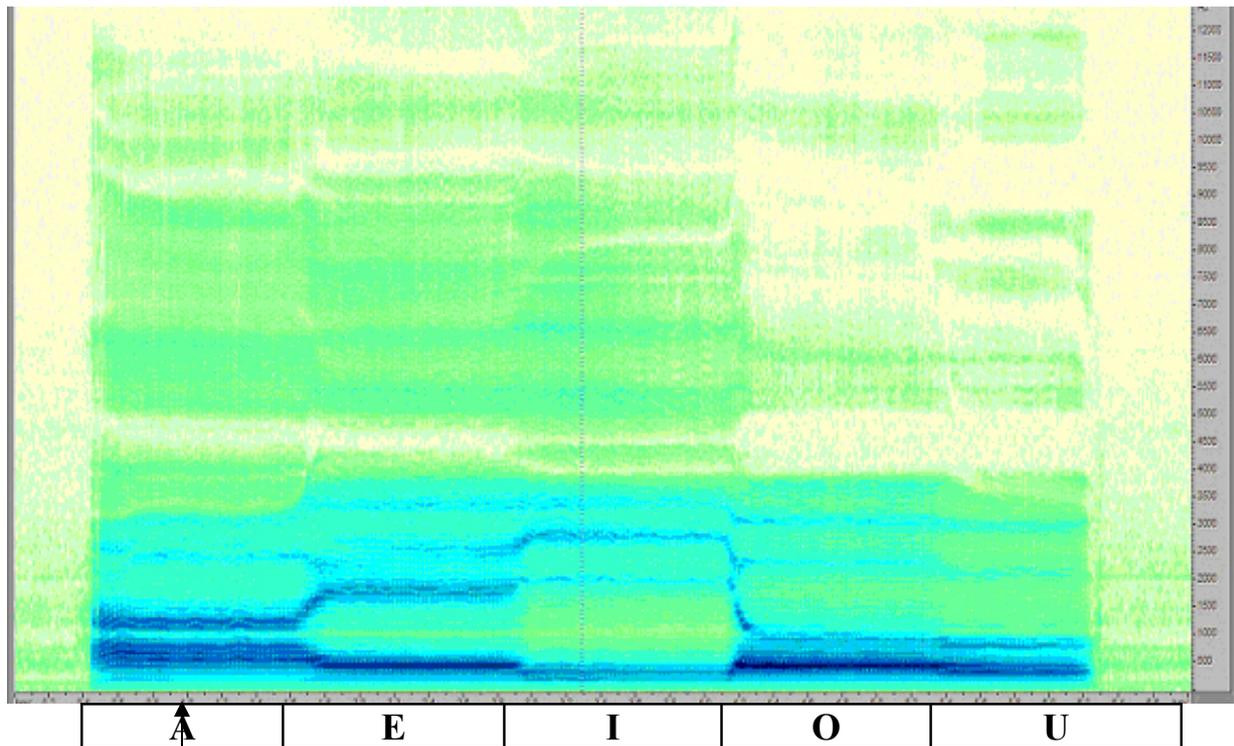


Figura 5-5

Nella figura 5.6 è riportato lo spettrogramma estrapolato dalla fase di tenuta della vocale a

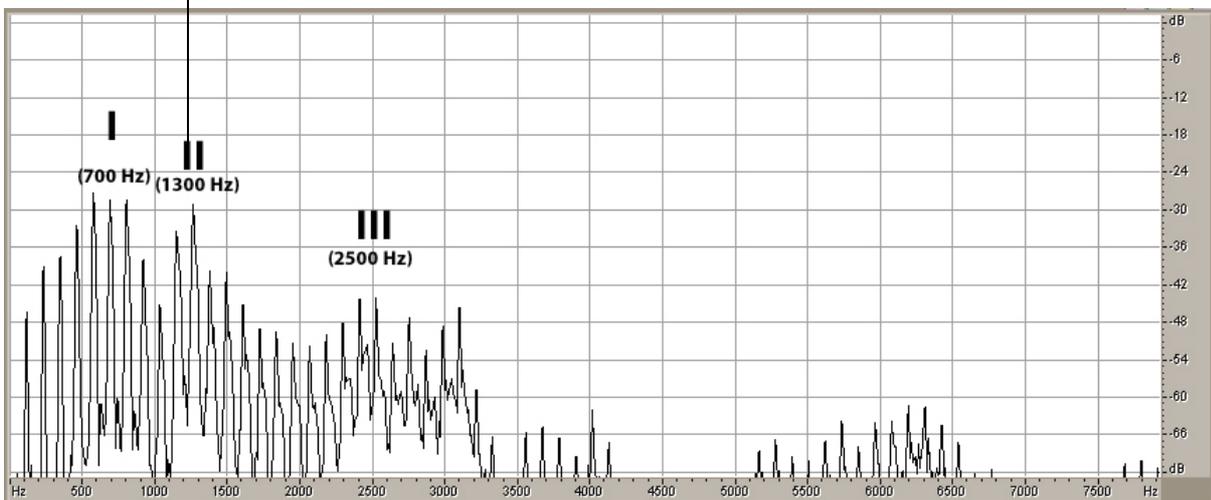


Figura 5-6

INVILUPPO SPETTRALE

L'involuppo spettrale è il grafico che si ottiene unendo con segmenti di retta i picchi d'ampiezza delle singole armoniche. Per i suoni vocali l'involuppo spettrale assume quasi sempre un contorno caratterizzato dall'alternanza di gobbe e avallamenti. Le prime corrispondono alle zone di risonanza o formanti e le seconde alle zone di antirisonanze.

Nelle figure seguenti viene costruito l'involuppo spettrale del suono analizzato nella figura 5.3

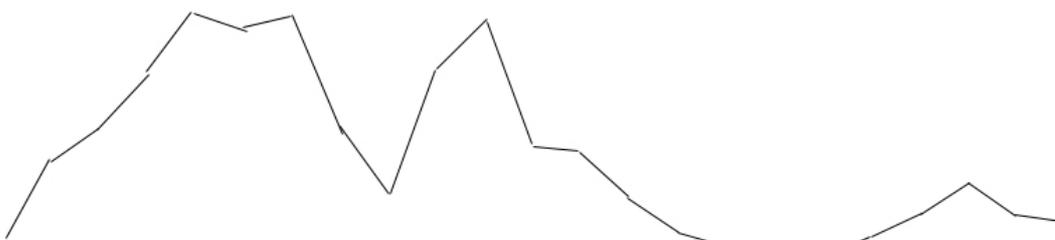
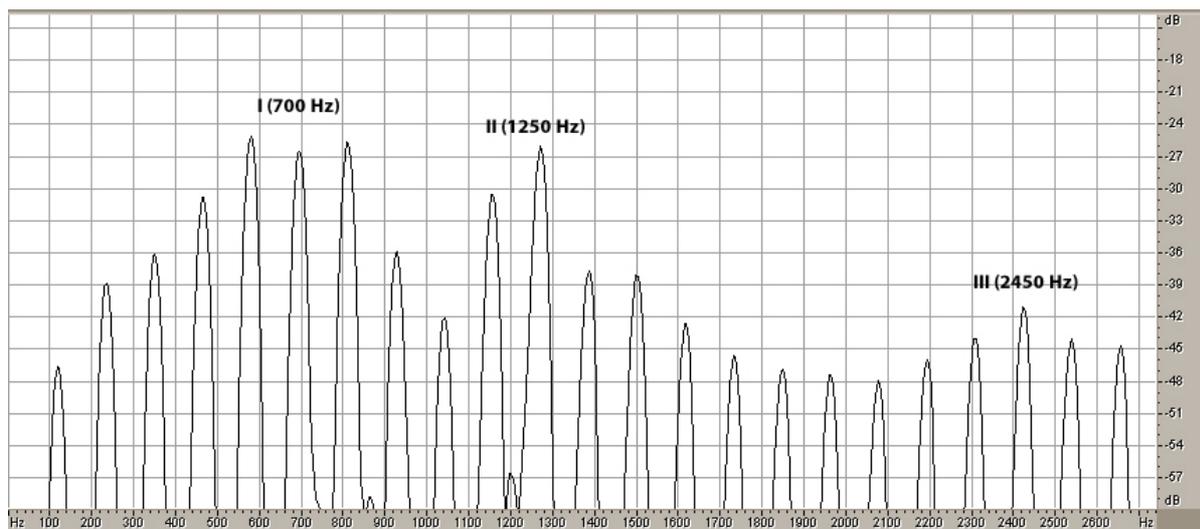
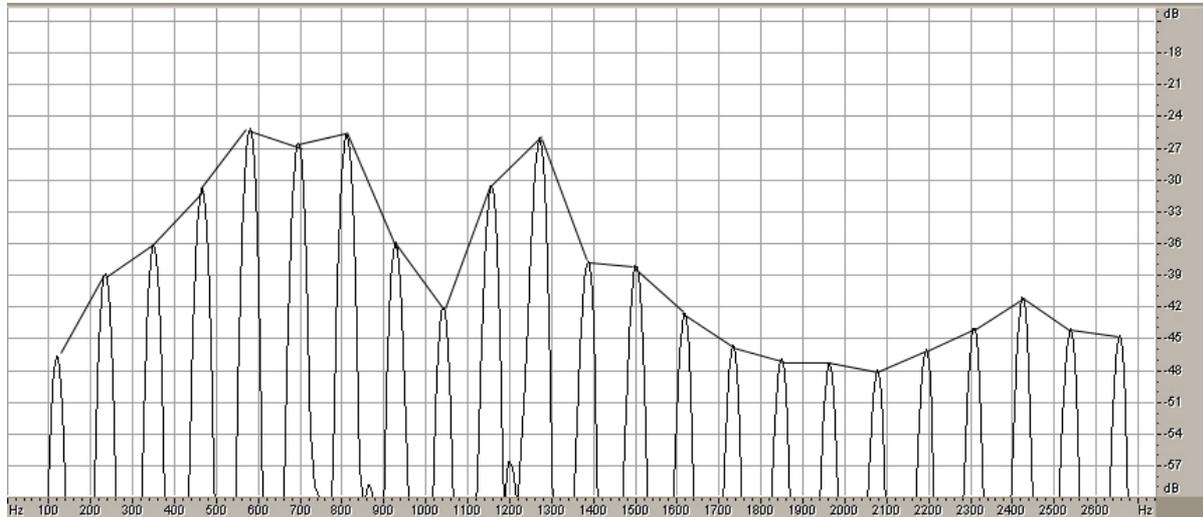


Figura 5-7

Primi tre formanti nella voce maschile (in corsivo il cantato)

A	E	I	O	U
1° formante				
730	530	270	570	300
<i>700</i>	<i>530</i>	<i>300</i>	<i>600</i>	<i>350</i>
2° formante				
1090	1840	2290	840	870
<i>1200</i>	<i>1500</i>	<i>1950</i>	<i>1000</i>	<i>650</i>
3° formante				
2440	2480	3010	2410	2240
<i>2600</i>	<i>2500</i>	<i>2750</i>	<i>2600</i>	<i>2550</i>

Nella figura 5.8 ho riportato il sonogramma di suoni vocali intonati da una cantante su una stessa vocale (una a aperta) sulle note della scala maggiore di si maggiore (da si² a si³).

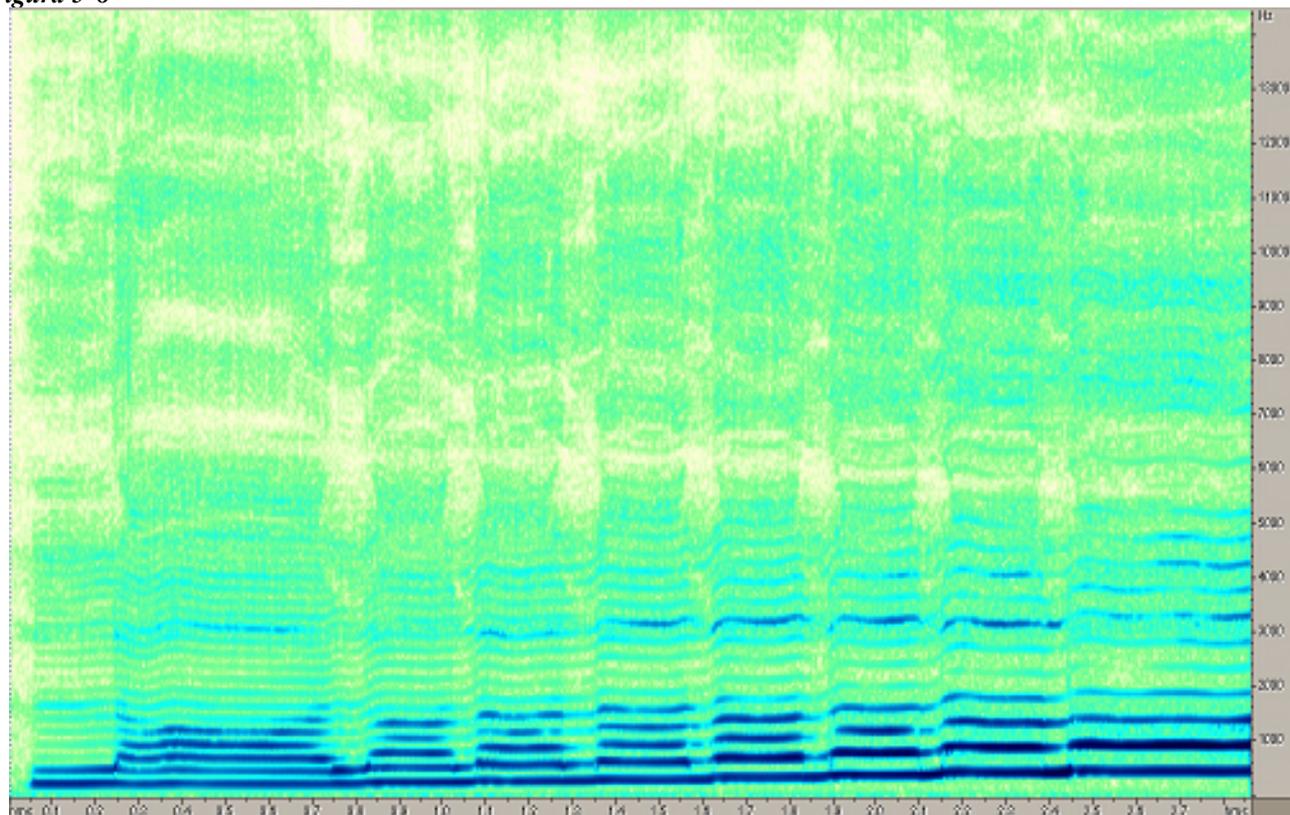
Come si può vedere le zone di risonanza e di antirisonanza, nonostante le modifiche sensibili della fondamentale (tra il primo e l'ultimo suono c'è un rapporto di ottava), mantengono alcune caratteristiche costanti: particolarmente evidente la permanenza di una ampia zona di antirisonanza tra i 2000 e i 2700 Hz circa per tutti i suoni in questione e la permanenza del terzo formante intorno ai 3200 Hz.

Questo vuol dire che l'articolazione del tratto vocale per una stessa vocale determina una struttura fisica con ben determinate caratteristiche di risonanza, caratteristiche che non mutano sensibilmente al variare della frequenza del suono intonato.

La formante appena sopra i 3000 Hz corrisponde alla cosiddetta "formante dei cantanti", cioè quella formante che viene determinata artificialmente dalla voce impostata e che cade tra i 2500 e i 3000 Hz, viene prodotta grazie all'abbassamento della laringe con conseguente aumento della cavità laringo-faringea.

La formante dei cantanti non dipende dalla vocale né dalla sua altezza, essa è una caratteristica particolarmente evidente nella voce maschile.

Figura 5-8



Scheda per la descrizione di sonogrammi di suoni strumentali e vocali (da utilizzare per esercitazioni di analisi)

1. indica se il sonogramma rappresenta un suono:
 - armonico** (l'energia del suono si concentra su alcune frequenze in rapporto armonico)
 - parzialmente inarmonico** (l'energia si concentra su determinate frequenze alcune delle quali non sono in rapporto armonico rispetto alla fondamentale percepita)
 - rumoroso** (l'energia non si concentra su determinate frequenze, ma si disperde caoticamente su una larga banda di frequenze)
 - parzialmente rumoroso** (oltre a zone di rumore sono presenti delle ristrette zone di frequenza su cui si concentra l'energia)
2. indica se il sonogramma rappresenta un suono:
 - impulsivo secco**
 - impulsivo con decadimento lungo**
 - tenuto**
 - altro**
3. fai una descrizione generale del contenuto spettrale, indicando se si tratta di un suono povero o ricco di armonici, se è chiaro o scuro (cioè se le zone di frequenza su cui si concentra l'energia sono al grave o all'acuto)
4. indica se lo spettro del suono ha un andamento formantico (con alternarsi di zone di risonanza e zone di antirisonanza, analogamente agli spettri dei suoni vocali), in caso affermativo, indica le frequenze centrali dei formanti.
5. indica se sono presenti modulazioni rapide e coordinate (cioè che avvengono contemporaneamente su tutte le parziali) dell'ampiezza (tremolo) e dell'altezza (vibrato)
6. descrivi il comportamento dinamico (nel tempo) dello spettro, quali sono le componenti di frequenza che scompaiono prima, quali quelle che si mantengono fino all'estinzione del suono?

6.	Lezione di acustica	Scala pitagorica, naturale, temperamenti Intervalli – Cent
----	---------------------	--

SCALA PITAGORICA

Pitagora¹ teorizza gli intervalli della scala diatonica partendo dai rapporti 2:1, 4:3 e 3:2 ottenuti sperimentalmente sul monocordo, uno strumento formato appunto da una sola corda che può essere smorzata da un ponticello mobile da collocare su una delle dodici tacche in cui è suddiviso lo strumento.

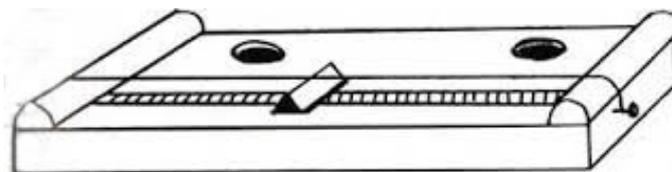


Figura 6-1

I rapporti suddetti corrispondono agli intervalli musicali di ottava, di quarta e di quinta, e derivano dai rapporti 12:6; 12:8 e 12:9, in cui il numeratore rappresenta la lunghezza della corda e il denominatore la porzione di corda vibrante (quindi il numero della tacca su cui viene fermato il ponticello). Questi rapporti semplici, oltre a soddisfare universali esigenze di consonanza e di identità (il rapporto di partenza è quello 2:1, che produce l'intervallo di ottava) obbediscono pure a dei criteri di razionalità, essendo infatti il primo derivato dalla media armonica e il secondo dalla media aritmetica tra numeratore e denominatore del rapporto di ottava.

$$\begin{aligned}
 12 : 6 &= 2:1 = \text{ottava} \\
 12 : 8 &= 3:2 = \text{quinta} \\
 12 : 9 &= 4:3 = \text{quarta}^{13}
 \end{aligned}$$

Scala pitagorica: intervalli principali (ottenuti dalla divisione della corda usando le proporzioni tra i primi quattro numeri interi)

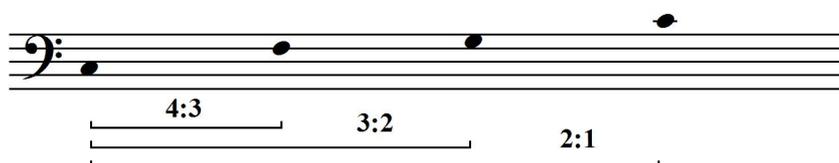


Figura 6-2

¹ Pitagora - Filosofo e matematico greco (Isola di Samo 560, Metaponto 480 a.C.). Fondatore della scuola filosofica di Crotona che ispirerà un filone importante della filosofia greca. Il lavoro dei pitagorici sul monocordo è descritto nel *Katome Kanonos* di Euclide e ad esso fa riferimento anche Platone nel *Timeo*.

¹³ Il numero 8 è la media armonica tra 12 e 6, il numero 9 è la media aritmetica tra 12 e 6

Ottenuti gli intervalli musicali di ottava, quinta e quarta, a Pitagora mancavano i rapporti relativi agli intervalli di seconda, terza, sesta e settima. Per capire come Pitagora e suoi allievi abbiano lavorato per completare la ricerca di questi rapporti, costruiamo una scala diatonica partendo dalla "tonica" do²: abbiamo già a disposizione quattro note: do², fa², sol² e do³, per completare la scala diatonica mancano re², mi², la² e si². Queste note vengono individuate lungo un "arpeggio" di quinte (3/2) ascendenti (il ben noto **circolo delle quinte**) e l'intervallo corrispondente viene calcolato elevando a potenza il rapporto 3/2 con esponente 2 (re³), 3 (la³), 4 (mi⁴) o 5 (si⁴). Gli intervalli corrispondenti alle note mancanti, ottenute su ottave più acute rispetto all'ottava che deve ospitare la nostra scala, vengono divisi per due (trasposizione un'ottava sotto) o per quattro (trasposizione due ottave sotto).

Nella figura vengono schematizzati i passaggi descritti.

Scala pitagorica:

intervalli secondari, ottenuti partendo dall'intervallo di quinta (3:2)

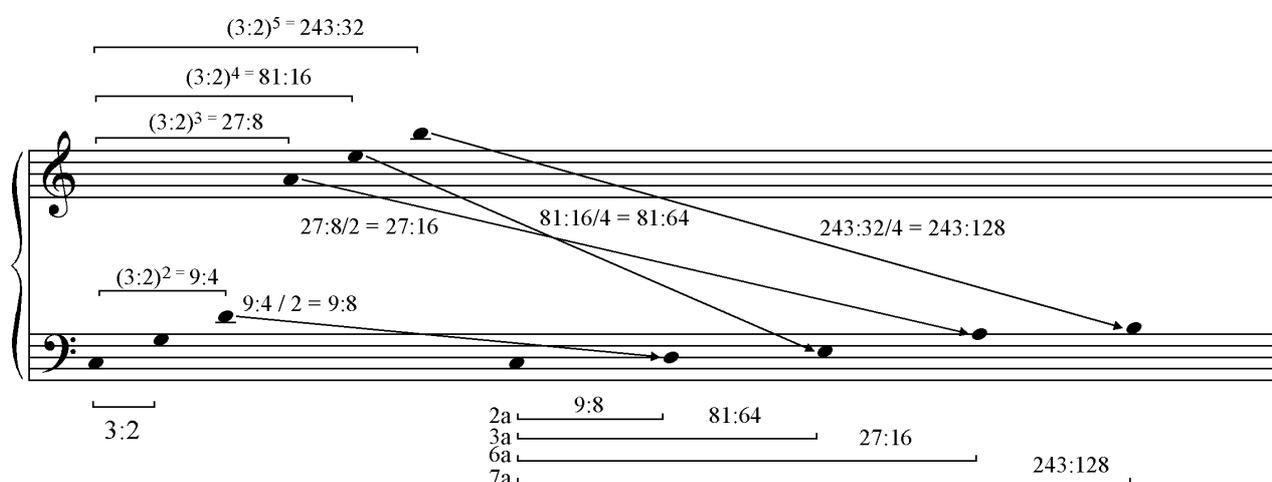


Figura 6-3 le note ottenute elevando a potenza l'intervallo di 3:2 vanno poi trasportate nella stessa ottava: il re e il la un'ottava sotto (si divide per due) il mi e il si due ottave sotto (si divide per quattro).

SCALA NATURALE O DELLA GIUSTA INTONAZIONE

Fino a quando la musica occidentale assegna, anche grazie all'ortodossia della chiesa, lo status di intervalli consonanti esclusivamente all'ottava, alla quinta e alla quarta, la scala pitagorica non trova difficoltà ad affermarsi; ma quando, con l'avvento della musica profana e dell'ars nova, l'intervallo di terza si afferma come consonanza nella polifonia e nella pratica strumentale dell'accompagnamento della musica profana, la scala pitagorica deve lasciare lo spazio ad altri modelli di scale naturali che si richiamano al modello tolemaico.

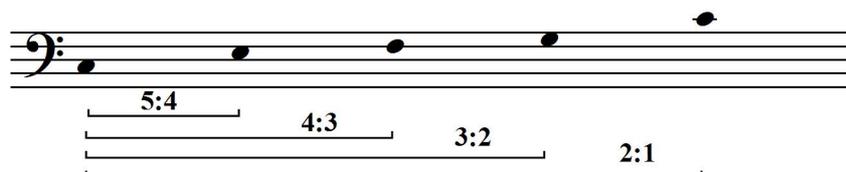
I problemi relativi all'uso della scala pitagorica nella musica derivano dal fatto che questa scala calcola la terza non sui rapporti di lunghezza delle corde (intervallo naturale) ma come intervallo secondario derivato dalla quinta; di conseguenza il suo valore è molto maggiore della terza naturale. Questa differenza, detta comma sintonico, è pari a 21,5 cent¹⁴, quasi un ottavo di tono, e costituisce un ostacolo alla formazione di accordi per terze sovrapposte, le moderne triadi.

A metà del '500 Zarlino, rifacendosi alla scala naturale di Tolomeo, teorizza una scala diatonica in cui gli intervalli sono derivati, oltre che dai tre intervalli base della teoria pitagorica, anche dalla terza (5/4). La scala così ottenuta si adatta meglio alle esigenze dell'armonia moderna, ma continua

¹⁴ Per la definizione di cent vedi a pag. 37

a presentare alcune limitazioni, soprattutto a causa della duplicità dell'intervallo di tono, che si presenta nelle due forme di tono grande ($9/8$) e tono piccolo ($10/9$) e della duplicità dell'intervallo di quinta ($DO-SOL = 3:2$; $RE-LA = 40:27$). Tale duplicità rende difficoltose le modulazioni e le esecuzioni in tonalità appena diverse da quelle più consuete, se non a costo di dividere l'ottava in un numero di tasti molto elevato.

Scala tolemaica (naturale): intervalli principali (ottenuti dalla divisione della corda usando le proporzioni tra i primi cinque numeri interi)



Scala tolemaica: intervalli secondari
(ottenuti calcolando anche la terza: $6^a = 3^a + 4^a$; $7^a = 3^a + 5^a$)

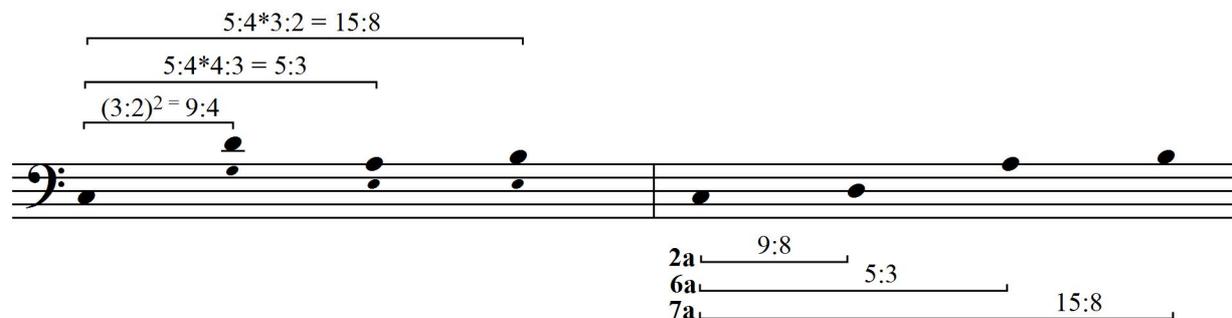


Figura 6-4 intervalli della scala naturale come vengono ricavati da Tolomeo

Scala pitagorica vs. Scala naturale

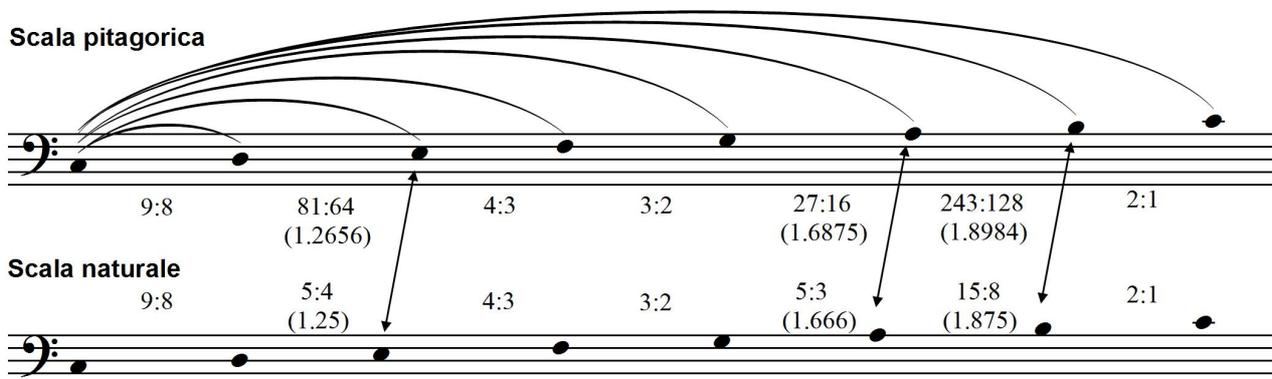


Figura 6-1 Confronto tra i rapporti della scala pitagorica e della scala naturale, si noti in particolare come la terza, la sesta e la settima della scala pitagorica siano molto crescenti rispetto agli stessi intervalli della scala naturale. Questo piccolo intervallo, pari a un rapporto 1.0125 (21,5 cent), viene chiamato comma sintonico.

TEMPERAMENTI – LA SCALA MESOTONICA

Nella scala pitagorica, nata dal presupposto che gli intervalli musicali corrispondenti ai primi 4 numeri interi non siano modificabili, si verifica una prima incongruenza: il circolo delle quinte non si chiude ma sopravanza, di un valore pari a circa 24 cent (il comma pitagorico), il punto esatto di chiusura del cerchio. In pratica il percorso fatto da 12 salti di quinta risulta superiore a quello fatto da 5 salti di ottava. L'impossibilità, nella realtà pratica, di mantenere nella sua purezza più di un intervallo giusto diventa ancora più evidente quando si vogliono far convivere gli intervalli giusti di quinta e di terza maggiore. Alla fine del '400 teorici e costruttori di strumenti sono costretti a operare le prime forme di aggiustamento (temperamento) di questi intervalli per trovare delle soluzioni di compromesso musicalmente accettabili.

Il temperamento è quindi un modo di intonare usando intervalli corretti (temperati) rispetto alla loro forma “pura”. Solitamente questo temperamento avviene partendo dalla correzione degli intervalli di quinta.

Nel 1523 Pietro Aaron elabora una scala in cui l'intervallo di quinta è ridotto di un quarto di comma (circa 5,4 cent), così da avere un intervallo di terza maggiore naturale. In pratica il comma sintonico, cioè la differenza tra terza maggiore pitagorica e terza maggiore naturale, viene spalmato tra i primi quattro salti di quinta, così da arrivare, lungo il circolo delle quinte, a un MI perfettamente giusto. La scala diatonica ottenuta rappresenta un grosso passo avanti, anche perché l'intervallo di tono che risulta da questa operazione è una via di mezzo esatta tra tono grande e tono piccolo della scala naturale. Con un piccolo sacrificio da parte della quinta (il quarto di comma rappresenta una differenza quasi impercettibile) abbiamo risolto due problemi: abbiamo mantenuto la terza maggiore perfettamente giusta ed eliminato il problema della duplicità del tono.

$$81:80 \text{ (comma sintonico)} / 4 = 1.00311 \text{ (}\frac{1}{4} \text{ di comma sintonico)}$$

$$3:2 / 1.00311 = 1.49535 \text{ (il nuovo rapporto di quinta)}$$

L'intervallo di seconda viene perciò calcolato elevando alla seconda il nuovo rapporto di quinta e poi dividendo per due:

$$1.49535^2 / 2 = 1.11803$$

Nella scala mesotonica a $\frac{1}{4}$ di comma l'intervallo di terza viene salvaguardato a scapito di quello di quinta, che diventa leggermente calante. Tuttavia quando il $\frac{1}{4}$ di comma viene sommato più volte, man mano che nel circolo delle quinte oltrepasiamo il mi, questa leggera differenza diventa sempre più significativa, fino a quando, arrivati all'ultimo dei diesis usati (sol diesis), ci troviamo davanti a una vera e propria voragine che ci separa dal primo bemolle del circolo delle quinte (mi bemolle¹⁵). Questa distanza risulta talmente crescente (37 cent circa) da non consentire, in una tastiera a 12 tasti, quindi con l'enaarmonia di diesis e bemolli, l'uso del la bemolle. In pratica sono fuori uso le tonalità di Mi bemolle e do minore. Per superare queste difficoltà si costruiscono tastiere con tasti spezzati, cioè con tasti diversi per i bemolle e i diesis. Queste tastiere possono avere da un minimo di 17 tasti fino a 40 e più.

In un tentativo più tardo le quinte vengono ridotte di un valore più piccolo, un quinto o un sesto di comma, così da terminare il circolo delle quinte su un sol# meno calante e limitare la criticità

¹⁵ Nel '500 non si usavano più di 3 diesis e 3 bemolli, per cui il circolo delle quinte può essere costruito partendo dal mi bemolle fino al sol# (oppure partendo dal la bemolle per finire col do#)

dell'intervallo sol#(lab) – mib. Pregio della scala mesotonica a un sesto di comma è la perfetta intonazione dell'intervallo di settima diminuita, un accordo di difficilissima intonazione nelle precedenti scale.

TEMPERAMENTI CICLICI IRREGOLARI

Per evitare di trovarci davanti alla voragine descritta (gli antichi chiamavano questi intervalli stonati *quinte del lupo*), alcuni teorici inventano una forma di temperamento irregolare. L'irregolarità consiste nel togliere lo stesso valore non a tutte le quinte, ma solo ad alcune. Nel terzo temperamento di Werckmeister, il teorico che porterà alla elaborazione del temperamento equabile, viene tolto un quarto di comma ai primi 3 intervalli di quinta (si arriva quindi a un mi leggermente crescente) e poi tra il si e il fa#. In questo modo il circolo delle quinte si chiude perfettamente (a questo si riferisce l'aggettivo ciclico, che, d'altra parte, sta anche a indicare la possibilità di usare quel temperamento per tutte le tonalità) e si evitano le quinte del lupo.

Un'altra scala irregolare ciclica è quella che un musicologo americano ritiene essere stata quella utilizzata da Bach nel clavicembalo ben temperato. Partendo da una originale e affascinante interpretazione del fregio che sovrasta il titolo del manoscritto bachiano, Bradley Lehman suggerisce che la scala ben temperata non fosse una scala a temperamento equabile, come la tradizione insegna, ma una scala irregolare con cinque quinte ridotte di un sesto di comma (da Fa a Mi) tre quinte pure (da Mi a Do#) e quattro quinte ridotte di un dodicesimo di comma (da do# a Fa). Altri temperamenti largamente usati nel settecento furono quelli di Francesco Antonio Vallotti (1697-1780) e quelli dell'allievo di Bach, Johann Kirnberger (1721-1783).

SCALA A TEMPERAMENTO EQUABILE

Alla fine del '600 il teorico e costruttore di strumenti musicali Andreas Werckmeister, nel suo *Musikalische Temperatur*, teorizza una scala cromatica in cui l'intervallo di semitono è pari alla radice dodicesima di 2. Gli intervalli più grandi sono calcolati elevando, per il numero dei semitoni di cui si compone l'intervallo, il rapporto di semitono.

$$R(\text{semitono}) = \sqrt[12]{2} = 1.05946$$

Alla fine dell'800 il matematico inglese Alexander Ellis introduce il cent, un'unità di misura degli intervalli musicali ottenuta dividendo in 1200 parti uguali l'intervallo di ottava. L'intervallo di semitono del sistema temperato corrisponde a 100 cent. Il numero di cent corrispondente a un intervallo **R** si può ottenere con la seguente formula (per facilitare i calcoli ricordo che il logaritmo di 2 è 0.30103):

$$\text{cent} = 1200 * \text{Log } R / \text{Log } 2$$

oppure

$$\text{cent} = 1200 * \text{Log}_2 R$$

**Tabella riassuntiva degli intervalli della scala diatonica
espressi come rapporto e in cent**

	Seconda		Terza		Quarta		Quinta		Sesta		Settima		Ottava	
	rapporto	cent	rap.	cent	rap.	cent	rap.	cent	rap.	cent	rap.	cent	rap.	cent
Pitagorica	1.125	204	1.266	408	1.333	498	1.5	702	1.687	906	1.898	1110	2	1200
Naturale	1.125	204	1.25	386	1.333	498	1.5	702	1.666	884	1.875	1088	2	1200
Mesotonica a ¼ di comma	1.183	193	1.25	386	1.339	504	1.495	697	1.672	890	1.87	1083	2	1200
Temperata	1.122	200	1.26	400	1.335	500	1.498	700	1.682	900	1.888	1100	2	1200

RAGA INDIANI

Il sistema di altezze usato nella musica classica indiana prevede una divisione dell'ottava in 22 microtoni (sruti). Sette di questi sono gli swara (le note) del saptak (scala diatonica di sette suoni) e si chiamano shudda swara. Le sette note si chiamano: SA, RE, GA, MA, PA, DHA, NI.

Altri cinque sono alterazioni degli swara primari re, ga, dha, ni (discendenti) e dello swara ma (discendente).

Qui sono riportati gli intervalli relativi ai dodici sruti cui il nostro orecchio è maggiormente sensibile.

Śruti Name	Swara	Ratio	Śruti Frequency(Hz)	Note Name	Note Frequency(Hz)
Kshobhini	Shadja	1	466.1638	A#	466.1638
Tivra	Komal Rishabh	256/243	491.1026	B	493.8833
Chandovati	Shuddha Rishabh	9/8	524.4343	C	523.2512
Dayavanti	Komal Gandhar	32/27	552.4904	C#	554.3653
Rudri	Shuddha Gandhar	81/64	589.9886	D	587.3296
Krodhi	Shuddha Madhyam	4/3	621.5517	D#	622.2540
Prasarini	Tivra Madhyam	45/32	655.5428	E	659.2552
Marjani	Pancham	3/2	699.2457	F	698.4565
Kshiti	Komal Dhaivat	128/81	736.6539	F#	739.9889
Alapini	Shuddha Dhaivat	27/16	786.6514	G	783.9909
Madni	Komal Nishad	16/9	828.7356	G#	830.6095
Ugra	Shuddha Nishad	243/128	884.9828	A	880.0001
Kshobhini	Shadja	2	932.3276	A#	932.3276

Ogni raga è basato su una propria scala, che può essere modificata nella fase discendente (avaroha). Qualsiasi analogia con le scale occidentali moderne è tuttavia forzata, la modalità di esecuzione di una aroha (scala ascendente) o di un avaroha (scala discendente) è fortemente caratterizzata dalla presenza di glissandi e modulazioni proprie di ciascun raga.

SOVRAPPOSIZIONE LINEARE – BATTIMENTI del PRIMO ORDINE

Abbiamo già parlato dei battimenti, a proposito della banda critica e della sovrapposizione di due suoni sinusoidali (cap. IV) . I battimenti sono un esempio molto semplice, anche sotto il profilo percettivo, dell'effetto di sovrapposizione lineare di due suoni. La semplice somma delle ampiezze di due sinusoidi che abbiano una piccola differenza di frequenza (diciamo sotto i 15 Hz), produce una nuova forma d'onda con frequenza intermedia e con una ampiezza caratterizzata da un periodico saliscendi fra un valore minimo, quando le due onde sono in controfase, ossia quando il valore massimo di un'onda coincide col valore minimo dell'altra, e un valore massimo, pari alla somma delle due ampiezze, quando le due onde sono in fase.

Questo saliscendi dell'ampiezza si ripete regolarmente con una frequenza pari alla differenza delle frequenze delle due componenti, ad esempio se le frequenze delle due sinusoidi sono 220 e 225 Hz, la frequenza dell'oscillazione dell'ampiezza del suono risultante è 5 Hz.

COMBINAZIONE NON LINEARE

Oltre ai casi di sovrapposizione lineare, abbiamo casi di combinazione più complessi, dovuti al comportamento non-lineare del mezzo di propagazione del suono e/o del nostro orecchio.

In generale un dispositivo non-lineare è quello che produce un'informazione che sta in rapporto non-lineare rispetto a quella immessa nel dispositivo, il rapporto tra le due informazioni non essendo esprimibile da una equazione di primo grado. Nel caso del suono l'esperienza più comune di non linearità è quella della distorsione del suono in un sistema di riproduzione audio. Quando la risposta in frequenza e il rapporto segnale/disturbo del sistema sono molto limitati, il sistema non è più in grado di riprodurre la forma d'onda originale e manda in uscita una forma d'onda deformata, distorta.

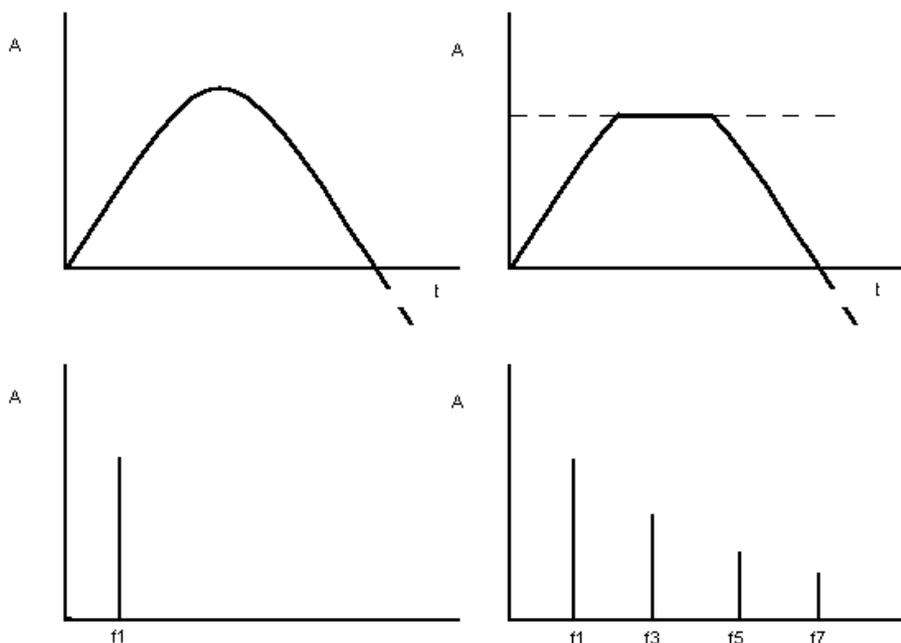


Fig. 7.1 Esempio di distorsione di un'onda sinusoidale. La distorsione aggiunge componenti spettrali.

Questa distorsione dell'onda determina una modifica più o meno significativa dello spettro, e quindi del timbro del suono.

Nella figura 7.1. sono riportate due forme d'onda, all'ingresso e all'uscita di un sistema non-lineare: una sinusoidale e una sinusoidale appiattita in corrispondenza dell'ampiezza massima che il sistema può produrre. In corrispondenza delle due forme d'onda sono riportati gli spettri. Nel caso dell'onda distorta si può vedere come il sistema ha aggiunto delle componenti di frequenza armoniche che erano assenti nel suono originale.

SUONI DI COMBINAZIONE

Un caso particolare di non linearità si produce nella coclea sulla membrana basilare. L'effetto più importante di questa non linearità consiste, in presenza di due suoni puri a forte intensità, nell'aggiunta di frequenze laterali.

In questo caso fra le due sinusoidi si crea un fenomeno simile a quello che nella musica elettronica prende il nome di modulazione ad anello, un particolare tipo di modulazione ottenuta moltiplicando fra loro le due funzioni rappresentative delle onde. Questa combinazione produce, dati due suoni con frequenza f_1 e f_2 , le componenti laterali con frequenza: $f_2 - f_1$ e $f_2 + f_1$.

Per fare un esempio, combinando due sinusoidi con frequenza 1000 e 1200 Hz, noi avremo anche le componenti a 200 Hz e a 2200Hz.

Queste componenti laterali compaiono solo in condizioni particolari, ad es. quanto maggiore è l'intensità dei due suoni tanto maggiore è l'effetto di combinazione, mentre per suoni di debole intensità il fenomeno delle componenti laterali è assente. Il suono differenza ($f_2 - f_1$), detto anche terzo suono o suono di Tartini, è inoltre molto più intenso del suono somma ($f_2 + f_1$), tanto che quest'ultimo può essere considerato del tutto trascurabile.

Oltre ai suoni di combinazione principali, come il terzo suono o suono di Tartini, ci sono i suoni di combinazione prodotti dalla differenza tra le componenti armoniche: due suoni ben percepibili sono quelli prodotti dalla differenza tra $2(f_1)$ e f_2 , - nel caso delle frequenze date nell'esempio 800 Hz - e dalla differenza fra $3(f_1)$ e $2(f_2)$ - nel nostro caso 600 Hz.

Questo meccanismo spiega in parte il fenomeno della fondamentale mancante, cioè quel fenomeno che ci consente di percepire un'altezza anche in assenza di una fondamentale (ad es. nella riproduzione via telefono, che taglia le frequenze gravi).

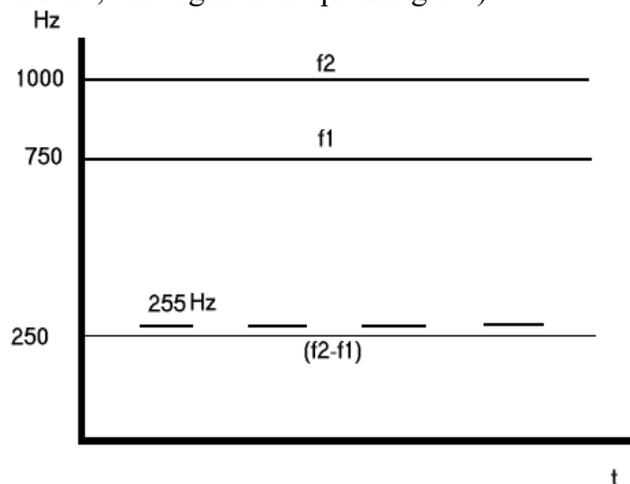


Fig. 7.2

Fig. 7.2 Dimostrazione della presenza del suono di Tartini. In questo esperimento uditivo i battimenti sono prodotti tra una sinusoidale a 255 Hz (che appare a intermittenza) e il suono differenza (250 Hz) tra due sinusoidi acute a 1000 e 750 Hz (frequenze fisse).

Torniamo ora all'esempio della distorsione della sinusoide prodotta in un sistema audio di scarsa qualità. Un tipo analogo di distorsione avviene all'interno del nostro orecchio: si tratta della cosiddetta distorsione aurale. Anche in questo caso, che si verifica quando i suoni superano una certa soglia di intensità, alla componente si aggiungono le armoniche superiori, in questo caso non solo quelle dispari.

Un effetto interessante della distorsione aurale è dato dai suoni di combinazione generati dalla interazione tra le armoniche "aurali" e le frequenze fondamentali (discendenza incrociata semplice) e tra le armoniche, appartenenti alle serie armoniche delle rispettive fondamentali, fra di loro (discendenza incrociata complessa).

Nel primo caso l'esempio più significativo è rappresentato dalla componente con frequenza $2f_2 - f_1$, nel secondo caso dal suono con frequenza $3f_2 - 2f_1$.

Questi suoni vanno ad aggiungersi ai suoni primari.

Esempio audio

Vengono suonate due sinusoidi: la prima con frequenza fissa più acuta e la seconda con frequenza crescente da $f_1/1.25$ (una terza maggiore naturale sotto) fino a f_1 ; durata: 20". (fig. 7.3.)

Effetti della combinazione:

- 1 suono differenza con glissando discendente
- 2 suono di combinazione con frequenza $2f_1 - f_2$
- 3 suono di combinazione con frequenza $3f_1 - 2f_2$

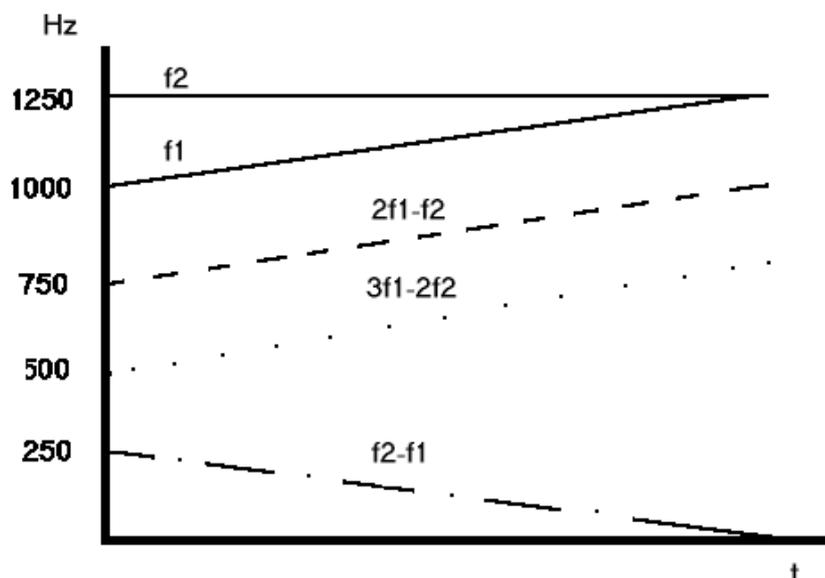


Fig. 7.3

BATTIMENTI del SECONDO ORDINE (o delle consonanze stonate)

Avvengono tra 2 suoni puri che eccitano la membrana basilare in regioni che non si sovrappongono, (cioè che cadono in bande critiche diverse) e che stanno nel seguente rapporto di frequenze:

$$f_2 = (n:m)f_1 + \Delta f$$

dove n e m sono numeri interi vicini (quindi il loro rapporto corrisponde a un determinato intervallo consonante) e Δf la differenza di frequenza ($\Delta f < 15$ Hz)

es., dato $f_1 = 600$ Hz

$$f_2 = (2:1)*600 + 5 = 1220 + 5 = 1205 \text{ Hz (ottava stonata)}$$

$$f_2 = (3:2)*600 + 5 = 900 + 5 = 905 \text{ Hz (quinta stonata)}$$

$$f_2 = (4:3)*600 + 5 = 800 + 5 = 805 \text{ Hz (quarta stonata)}$$

per intervalli più piccoli i battimenti del secondo ordine sono praticamente inudibili.

A differenza dei battimenti del primo ordine, che hanno origine da un effettivo aumento e diminuzione dell'ampiezza dell'onda risultante, nei battimenti del secondo ordine, al cambiamento ciclico del modello di vibrazione non corrisponde un cambiamento nell'ampiezza totale dell'onda risultante (l'ampiezza totale è sempre uguale). Allora perché li sentiamo? La loro esistenza inizialmente potrebbe essere spiegata come l'effetto di una combinazione tra le armoniche di f_1 ed f_2 , armoniche di f_1 che sarebbero aggiunte per una distorsione non lineare della membrana basilare. Si tratterebbe quindi di un fenomeno non dissimile da quello che permette la formazione dei suoni di combinazione. L'impossibilità di percepire singolarmente queste armoniche superiori ha fatto dubitare di questa teoria.

Per molti scienziati si infatti non di un effetto della DNL nell'orecchio interno ma di un effetto di processi del secondo ordine, cioè che hanno sede a livello neurale. Secondo Plomp, la percezione dei battimenti del secondo ordine avviene per effetto di una elaborazione delle informazioni temporali: variazioni cicliche semplici del modello di vibrazione possono essere rilevate dal nostro sistema uditivo centrale, che invece non è in grado di rilevare variazioni troppo elaborate e ad alte frequenze; sopra i 1500 Hz i battimenti del secondo ordine non sono più udibili.

BATTIMENTI BINAURALI

Avvengono quando 2 suoni puri con una piccola differenza di frequenza vengono inviati in cuffia separatamente alle due orecchie. Quando le frequenze dei due suoni sono tra i 200 e i 600 Hz possiamo sentire distintamente le fluttuazioni di ampiezza, fluttuazioni che, per differenze di frequenza fino a 1 Hz si manifestano anche con un movimento laterale, movimento che scompare man mano che la differenza di frequenza aumenta. Anche in questo caso si tratta di un processo di secondo ordine, che non è prodotto a livello dei ricettori, ma a livello del sistema nervoso. Questo non è in grado di elaborare la struttura temporale della forma d'onda per frequenze molto acute, per questo i battimenti binaurali sono udibili non oltre i 1500 Hz.

FONDAMENTALE MANCANTE

Un suono complesso privo della fondamentale ma ricco di armoniche non perde le sue caratteristiche di altezza. Un do centrale viene percepito tale anche se, nello spettro delle frequenze, manca la fondamentale. In parte questo è spiegato dai suoni di combinazione, che, come abbiamo visto, aggiungono una componente grave; questa componente, nel caso i due suoni inviati all'orecchio appartengano alla stessa serie degli armonici, corrisponde alla fondamentale. Tuttavia il fenomeno della percezione della fondamentale mancante si verifica anche per suoni di non forte intensità. Esperimenti recenti hanno dimostrato che, a intensità normale, la fondamentale non è presente nelle oscillazioni del fluido cocleare (dove sono invece individuabili i suoni di combinazione). La regione della membrana basilare corrispondente alla frequenza fondamentale può essere mascherata con una banda di rumore, in modo da far passare inosservata una eccitazione addizionale, tuttavia la fondamentale mancante continua a essere percepita. Questa continua a essere percepita anche quando i due suoni vengono inviati separatamente alle due orecchie.

Allo stesso modo dei fenomeni del secondo ordine di cui abbiamo parlato, il sistema uditivo centrale è in grado di identificare la frequenza di ripetizione del modello di vibrazione complesso che arriva all'orecchio. Questa capacità prende il nome di **riconoscimento soggettivo dell'altezza**. Più complesso è il modello di vibrazione, cioè più piccoli gli intervalli tra i due suoni in arrivo, più difficile è identificare la fondamentale.

8.	Lezione di acustica	Cenni di acustica degli ambienti, Caratteristiche di propagazione e assorbimento del suono, Echi, riverberi e altri fenomeni di riflessione, Diffrazione
----	----------------------------	--

L'acustica degli ambienti è una branca relativamente recente dell'acustica. Essa studia la risposta acustica di una sala, e rappresenta un argomento di studio decisivo laddove si progettino sale destinate a particolari funzioni: sale conferenze, sale teatrali e sale da concerto.

Di recente l'attenzione per l'acustica architettonica è cresciuta anche laddove si vogliono realizzare ambienti non necessariamente destinati all'ascolto, ad esempio luoghi di lavoro o di studio, in quanto si è valutato che determinate caratteristiche acustiche consentano un maggiore benessere fisico.

La risposta acustica di un ambiente chiuso è determinata dalla qualità delle riflessioni che una sorgente sonora determina al suo interno; vediamo di distinguere le principali forme di riflessione del suono.

ECO E RIVERBERO

Per eco s'intende una riflessione del suono che l'ascoltatore percepisce come distinta dal suono che proviene direttamente dalla sorgente. È il caso dei suoni che ritornano all'ascoltatore con un ritardo di oltre un decimo di secondo rispetto al suono diretto, quindi dei suoni provenienti da superfici poste a una distanza di almeno 17 metri dall'ascoltatore. Nel caso dell'eco noi percepiamo il suono riflesso come una copia indebolita del suono originale.

Questo fenomeno si può verificare in spazi aperti, laddove è presente una parete riflettente (il muro di un palazzo, una parete di roccia...) o in spazi chiusi molto particolari come gallerie, sottopassaggi etc.

Quando parliamo di riverbero intendiamo invece l'insieme dei suoni riflessi dalle superfici presenti nell'ambiente che circonda la sorgente sonora e l'ascoltatore, ambiente che si prevede chiuso almeno parzialmente.

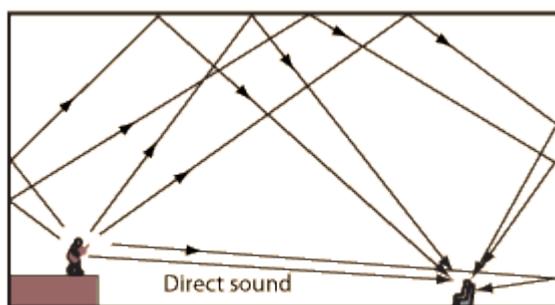


Figura 8-1

Questi suoni riflessi non sono percepibili singolarmente, ma si accumulano producendo una sorta di coda del suono originale.

Anche nel caso del riverbero noi facciamo una distinzione, anche se percettivamente meno semplice, fra suono diretto e suono riflesso, riverberato.

Il punto dello spazio o della sala in cui l'ascoltatore percepisce come equivalenti il suono diretto e il suono riverberato prende il nome di raggio della sala.

Nella fig. 8.2 è schematizzato l'andamento delle riflessioni che formano il riverbero in funzione del tempo. I suoni riflessi sono rappresentati dalle righe verticali. Possiamo distinguere due momenti, quello delle prime riflessioni, i primi suoni riflessi dalle pareti laterali e dal soffitto, fondamentali per dare l'idea dello spazio all'ascoltatore, e il cumulo indistinto delle sempre più numerose riflessioni secondarie, e che vanno attenuandosi secondo un decadimento di tipo esponenziale, che formano la parte finale del riverbero.

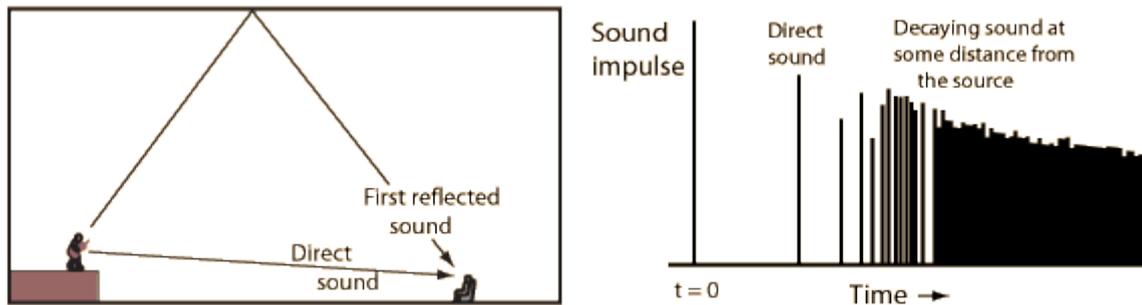


Figura 8-2

Il parametro fondamentale per la definizione di riverbero è il **tempo di riverberazione**, ossia il tempo che impiega il suono riverberato perché la sua intensità diminuisca di 60 dB rispetto al livello originale (la potenza sonora si riduce a un milionesimo).

Il suono riverberato decresce col tempo man mano che l'energia sonora viene assorbita in virtù delle ripetute interazioni con le superfici della sala. Il tempo di assorbimento, o tempo di riverberazione, cambia a seconda che le superfici siano più o meno riflettenti. A seconda della quantità di suono riflesso possiamo assegnare ad una superficie un **coefficiente di assorbimento** (α), che sarà pari a 0 se nel caso che la superficie rifletta completamente il suono, pari a 1 nel caso che assorba completamente il suono. E' questo il caso della camera anecoica, una camera di uso sperimentale caratterizzata dal totale assorbimento del suono da parte delle pareti.



Fig. 8.3 registrazione binaurale con una "dummy head" (testa finta), in una camera anecoica.

Il tempo di riverberazione dipende quindi dalla dimensione e dalla forma della sala e dalle caratteristiche di assorbimento delle pareti. Grossolanamente possiamo dire che il tempo di riverberazione è proporzionale alle dimensioni della sala e inversamente proporzionale al coefficiente di assorbimento delle pareti, coefficienti che variano a seconda del materiale, e, per uno stesso materiale, in funzione della frequenza.

TABELLA DEI COEFFICIENTI DI ASSORBIMENTO¹⁶

Pavimento	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Marmo	.01	.01	.01	.01	.02	.02
Linoleum	.02	.03	.03	.03	.03	.02
Mattoni	.03	.03	.03	.04	.05	.07
Parquet di legno	.04	.04	.07	.06	.06	.07
Tappeto pesante su calcestruzzo	.01	.02	.06	.15	.25	.45
Blocchi di calcestruzzo verniciati	.1	.05	.06	.07	.1	.1
Blocchi di calcestruzzo grezzi	.4	.4	.3	.3	.4	.3
Vetro ordinario	.3	.2	.2	.1	.07	.04
Tendaggi	.07	.3	.5	.7	.7	.6
Seggiole imbottite, non occupate	.2	.4	.6	.7	.6	.6
Seggiole imbottite, occupate	.4	.6	.8	.9	.9	.9

Il primo a stabilire un'equazione per il calcolo del tempo di riverberazione fu Wallace Sabine, il padre dell'acustica architettonica. Partendo dalla sua equazione possiamo ricavare questa semplice formula:

$$tr = 0.16 * V / Se$$

dove V è il volume della sala e Se è l' area assorbente calcolata moltiplicando le singole superfici per il rispettivo coefficiente di assorbimento.

$$Se = a1*s1 + a2*s2 + a3*s3 ...$$

esempio: date le dimensioni e il coefficiente di assorbimento della pareti, calcoliamo il tr vedi anche il sito <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acoustic/revtim.html#c4>

DIFFRAZIONE

Quando un'onda sonora incontra un ostacolo (una colonna in una chiesa, la testa della persona seduta nella fila davanti all'ascoltatore) si possono verificare due casi: 1) se la lunghezza dell'onda è più piccola della dimensione dell'ostacolo (diametro della colonna o della testa) l'onda sarà riflessa dall'ostacolo 2) se la lunghezza dell'onda è più grande l'onda si propaga al di là dell'ostacolo.

L'ascoltatore che trovi un piccolo ostacolo fra sé e la sorgente del suono percepirà il suono filtrato dalle componenti di frequenza più acute. Anche nel caso di ascolto laterale (cioè quando un suono proviene da sinistra o da destra con un angolo di 90 gradi) l'orecchio controlaterale (quello che si trova sul lato opposto) sentirà un'**ombra sonora** rispetto a quello percepito dall'orecchio ipsilaterale (quello sul lato da cui proviene il suono).

¹⁶ da Backus, 1972

LA PERCEZIONE DELLO SPAZIO SONORO

Il suono diretto permette di localizzare la provenienza del suono, anche in un ambiente riverberato, in quanto raggiunge per primo l'orecchio dell'ascoltatore. Il nostro orecchio dà infatti la precedenza al primo suono in arrivo, rispetto ai suoni riflessi che arrivano dopo poche decine di ms. Ciò avviene nonostante che il nostro sistema percettivo non sia in grado di distinguere suono diretto e prime riflessioni, suoni che confondiamo in un unico fenomeno acustico. Questo effetto di localizzazione è detto effetto precedenza o effetto Haas.

Il riverbero ci informa sulle caratteristiche dell'ambiente in cui ci troviamo e sulla distanza della sorgente sonora.

Quando il suono ha provenienza laterale viene percepito diversamente dai due orecchi. Questa differenza riguarda sia il tempo (la fase) che lo spettro (l'intensità delle parziali). L'orecchio sul lato opposto rispetto alla sorgente sonora (orecchio controlaterale) sentirà il suono con un ritardo di poco meno di un millesimo di secondo rispetto all'orecchio vicino alla sorgente (orecchio ipsilaterale), e con un timbro più scuro, perché le frequenze acute verranno riflesse o assorbite dalla testa (diffrazione).

Queste differenze prendono il nome di DIFFERENZE INTERAURALI. Le differenze interaurali sono di due tipi:

INTERAURAL TIME DIFFERENCE (ITD) per le frequenze medio gravi (sotto i 1000 Hz)

INTERAURAL INTENSITY DIFFERENCE (IID) per le frequenze acute (sopra i 1000 Hz)

Le informazioni che completano la mappa sonora sono quelle relative alla posizione della sorgente sonora nelle dimensioni alto/basso e fronte/retro. Queste informazioni si possono ottenere grazie alle differenze di fase e di intensità che le componenti del suono originale subiscono nel passaggio attraverso il padiglione, il condotto uditivo e anche attraverso le cavità boccali e nasali. Tutte le variazioni che la forma d'onda subisce nel passaggio attraverso le varie parti dell'orecchio e della testa si possono riassumere in una sola misurazione: la funzione di trasferimento relativa alla testa o HRFT. La HRTF (head related transfer function) descrive i cambiamenti rilevati dalle nostre orecchie quando una sorgente sonora si muove intorno a noi.

E' possibile replicare in modo virtuale uno spazio sonoro reale grazie alle registrazioni binaurali. La registrazione binaurale viene realizzata ponendo due microfoni all'altezza dei timpani di una testa finta, avente forma e materiali che replicano una testa umana. Riproducendo in cuffia i suoni registrati con questa tecnica è possibile restituire con una fedeltà impressionante la mappa sonora originale, in particolare per suoni non distanti e a frequenza medio-acute.



Fig. 8.4- La testa finta usata per le registrazioni binaurali

PROBLEMI LEGATI ALL'ACUSTICA DELLE SALE

Isolamento

Il primo suono riflesso ha un ritardo di più di 30/40 ms rispetto al suono diretto – l'ascoltatore (ma anche l'esecutore) percepisce una sgradevole sensazione di “isolamento” rispetto al luogo dell'esecuzione, il contrario di quanto di solito l'ascoltatore desidera, ossia l'effetto “intimità” o “presenza”. Per correggere questo difetto si possono far calare dal soffitto delle “nuvole” riflettenti, ossia dei pannelli di forma convessa che avvicinano la prima riflessione. Un'altra soluzione (spesso abbinata alla prima) consiste nel costruire degli “involucri” in legno attorno al palcoscenico, delle vere e proprie casse armoniche, utili non solo a rinforzare il suono all'interno del palco, e a propagarlo con più efficacia all'esterno.

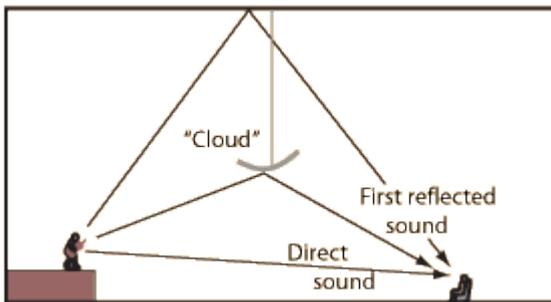


Fig. 8.5 La funzione delle “nuvole” calate dal soffitto è di avvicinare le prime riflessioni

Focalizzazione

Presenza di effetti di focalizzazione, quando i suoni riflessi vanno a focalizzarsi in una o più zone della sala, invece di essere distribuiti in modo uniforme tra il pubblico. Possono essere causati dalla presenza di grandi superfici riflettenti, oltre che di strutture riflettenti di forme particolari, ad esempio superfici paraboliche. Si evitano, fra l'altro, dotando il soffitto di cavità, o pozzi, di diversa profondità, in modo da disperdere e sparpagliare il suono incidente senza rifletterlo a specchio. Nelle sale del '700 e dell'800 la presenza di colonne, palchi e orpelli vari, favoriva l'assenza di punti di focalizzazione.

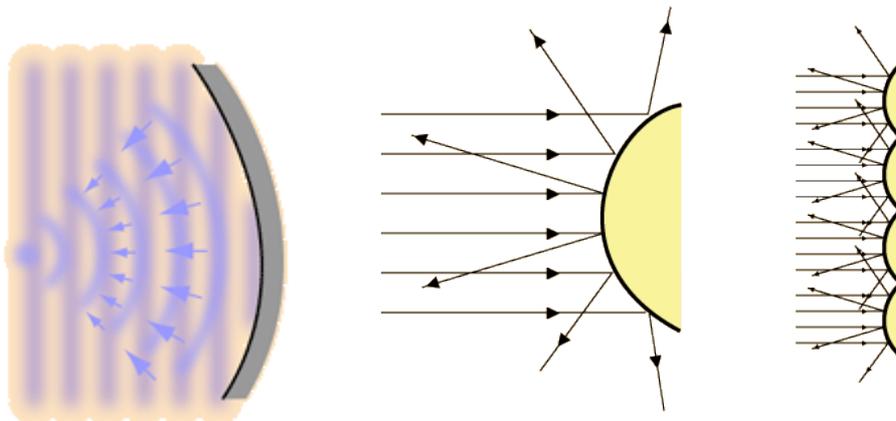


Fig. 8.6
Superfici riflettenti
concave e convesse

Flutter

Effetto “flutter” (flutter è lo sbattere delle ali) dovuto alla presenza di pareti parallele. Il suono rimbalza tra le pareti con fenomeni di eco molto ravvicinati (echo flutter).

Perdita dei bassi

Si può verificare in sale poco riverberanti e molto profonde. Nelle ultime file le frequenze gravi nei suoni di bassa intensità vengono percepite più debolmente rispetto alle frequenze acute.

TIPOLOGIA DELLE SALE DA CONCERTO

A scatola da scarpe (shoebox)

È la struttura delle sale da concerto tradizionali; la più antica, e, forse, una delle più sicure dal punto di vista acustico. Esempi: Concertgebouw (Amsterdam, 1888), Musikverein (Vienna, 1870), Royal Festival Hall (Londra, 1951).

A ventaglio

La superficie della sala si allarga man mano che ci si allontana dal palco, assumendo la forma di un ventaglio o di una conchiglia. In questo modo si garantisce a un maggior numero di spettatori di avvicinarsi al palco. Presenta una serie di problemi acustici: spesso la parete posteriore è convessa, per cui si possono creare effetti di focalizzazione; inoltre la grande distanza tra le pareti laterali nelle ultime file determina una scarsa diffusione del suono (scarse riflessioni laterali).

A vigneto

Prende il nome dalla struttura a terrazze. E' una struttura caratterizzata dalla presenza di balconate su più livelli che facilitano la diffusione del suono. Esempi: Barbican Hall (Londra).

Una sala a vigneto particolare è quella della Philharmonie di Berlino (1963), progettata dall'architetto Hans Scharoun. L'ideale del progettista era di rompere le barriere tra “produttore e consumatore” creando un tipo di fruizione nuovo con la distribuzione del pubblico disposto a 360 gradi intorno al palco. *“La musica come punto centrale. Questo pensiero non solo dà la forma alla Philharmonie ma assicura la sua assoluta priorità dentro l'intero schema costruttivo. L'orchestra e il direttore stanno al centro, forse non esattamente al centro ma comunque sono circondati dal loro pubblico. Non esiste divisione tra “produttori” e “consumatori” ma piuttosto una comunità di ascoltatori disposti intorno a un'orchestra nel modo più naturale...La costruzione segue il modello di un paesaggio, con l'auditorium visto come una valle, con in fondo l'orchestra circondata dai vigneti che si arrampicano sulle vicine colline. Il soffitto, che somiglia a una tenda, sta a questo paesaggio come una volta celeste.”*

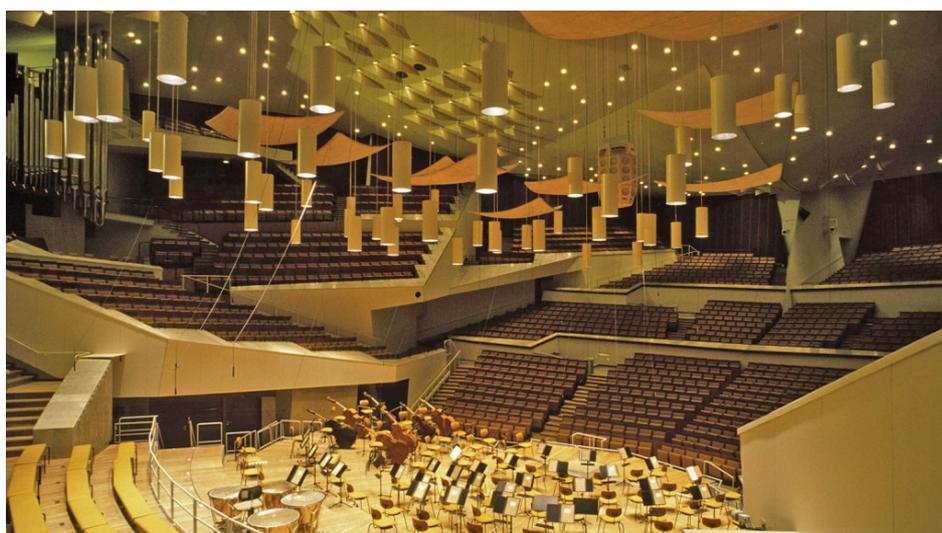


Fig. 8.7 Interno della Philharmonie di Berlino. Gli spettatori sono disposti a 360 gradi intorno all'orchestra, in un sistema di gradinate disposte “a vigneto”.

Bibliografia essenziale:

John Pierce, *La scienza del suono*, ed. Zanichelli, 1987

Vincenzo Lombardo, Andrea Valle, *Audio e Multimedia*, ed. Apogeo (capitoli 1, 5 e 10)

Andrea Frova, *Fisica nella musica*, ed. Zanichelli

J. G. Roederer, *Introduction to the Physics and the Psychophysics of Music*, ed. Springer-Verlag, 1993

Risorse in rete:

fisicaondemusica.unimore.it

<http://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acoustic/auditcon.html>

<http://newt.phys.unsw.edu.au/music/>