

Acustica

Lezione 6

*Timbro, formanti e modello sorgente e
filtro*

Luigi Manfrin

Il timbro: l'identità del suono

Il suono presenta 3 caratteristiche: l'altezza, il volume, e una caratteristica molto più complessa : il *timbro*.

L'*altezza* di un suono musicale (es. una sinusoide) è strettamente legata alla sua periodicità: es., una vibrazione di 440 periodi al secondo (440 Hz) produce la sensazione dell'altezza corrispondente al La₃ sopra il Do₃ centrale.

Il *loudness* (volume percepito) è correlato all'intensità del suono, ma dipende anche dalla frequenza delle componenti - come mostrano le curve isofoniche - e dalla loro distanza reciproca rispetto alla larghezza delle bande critiche..

Il *timbro*, invece, è un fenomeno più complesso.

Dipende certamente dallo **spettro sonoro**, ma non si riduce semplicemente ad esso.

Infatti → siamo capaci di riconoscere strumenti diversi anche quando il suono viene riprodotto da dispositivi di bassa qualità, come gli altoparlanti di uno smartphone, che altera lo spettro ed elimina molte frequenze basse.

Un sassofono continua a essere riconoscibile come sassofono, così come un oboe, un fagotto o un violino: ciascuno conserva una propria identità sonora che non confonderemmo con quella di un corno o della voce umana.

Il timbro: identità sonora, analisi e percezione

Il *timbro* → è un rompicapo. I musicisti riescono a riconoscere uno strumento anche quando suona su un'ampia estensione di altezze, probabilmente associando a quello strumento qualità sonore caratteristiche distribuite su diverse gamme di frequenza.

Anche un ascoltatore inesperto percepisce che suoni di altezza diversa prodotti dallo stesso strumento conservano tratti comuni.

Lo stesso per il *loudness* → un suono forte (*f*) è molto diverso da un pianissimo (*ppp*), non solo per intensità; ma, queste variazioni non fanno sì che uno strumento venga percepito come un altro.

La comprensione del timbro → dalla seconda metà del '900 si sono fatti grandi progressi grazie a due paradigmi di ricerca complementari: l'*analisi* e la *sintesi* del suono.

- L'*analisi* → studia le onde sonore osservandone la *forma d'onda* e lo *spettro*, mettendo in evidenza caratteristiche spesso molto complesse, alcune legate alla nostra percezione e altre no.
- La *sintesi* → ricrea artificialmente i suoni - oggi tramite il computer - combinando onde sinusoidali per ottenere *forme d'onda* e *spettri* determinati. Con la sintesi, selezionando alcune caratteristiche rispetto ad altre, possiamo capire quali elementi della forma d'onda e dello spettro sono essenziali nella percezione del timbro.

Helmholtz e i fondamenti dell'analisi e della sintesi del suono

Come si è visto nelle lezioni precedenti, l'importanza dell'analisi e della sintesi del suono risale agli studi di *Hermann von Helmholtz* (1821–1894).

- I metodi di analisi di Helmholtz - confrontati con quelli odierni - possono apparire elementari; ma, nel contesto scientifico dell'epoca, erano strumenti ingegnosi di notevole precisione sperimentale. Helmholtz poteva osservare direttamente le vibrazioni di una corda di violino o di un diapason, identificare le armoniche (le parziali) con i suoi risonatori di vetro e stimare l'intensità relativa delle parziali prodotte da una corda pizzicata o percossa.
- Anche i suoi metodi di sintesi erano legati alle possibilità tecniche dell'epoca: Helmholtz ascoltava i suoni generati da più diapason in vibrazione simultanea o da sirene con anelli a fori differenziati. Strumenti che, nel paradigma scientifico ottocentesco, rappresentavano il massimo delle possibilità sperimentali.

Sulla sensazione del tono (1863) → straordinaria complessità e varietà delle ricerche di Helmholtz. Derivarono due convinzioni rimaste a lungo dominanti, fino allo sviluppo della sintesi sonora al computer:

1. il timbro musicale → dipende principalmente dalla distribuzione delle ampiezze relative delle parziali;
2. nei suoni stazionari → le fasi relative non hanno un ruolo percettivamente rilevante.

Reinier Plomp (1929–2022)

Le fasi relative delle parziali e la qualità sonora



Consideriamo il problema delle *fasi* relative delle armoniche (parziali).

Per molto tempo si è pensato che esse non avessero importanza nella percezione del timbro.

Tuttavia, gli esperimenti di ***Reinier Plomp*** (1929–2022) e di altri ricercatori hanno mostrato, in condizioni di laboratorio controllate che → ***i cambiamenti nelle fasi relative delle parziali possono essere percepiti.***

Plomp (1929–2022) → olandese, tra i maggiori studiosi di psicoacustica e audiologia sperimentale, con ricerche sulla percezione del timbro, della consonanza e del linguaggio. I suoi studi → hanno contribuito a chiarire come il sistema uditivo analizza e interpreta i suoni complessi.

Plomp → mostrò che è possibile percepire variazioni di fase in un suono composto dalla fondamentale e da una seconda parziale posta all'ottava superiore.

Questo significa che anche quando due componenti sinusoidali non producono battimenti percepiti come semplici fluttuazioni d'intensità, le loro relazioni temporali possono comunque modificare la qualità sonora percepita.

Fenomeni analoghi possono presentarsi anche tra suoni puri vicini a intervalli consonanti, come la quarta o la quinta.

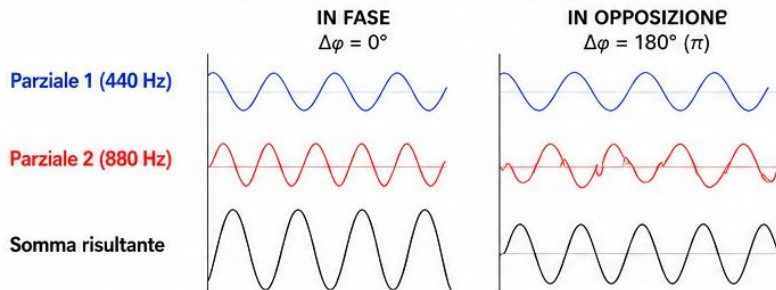
La percezione di questi cambiamenti richiede un ascolto molto attento, ma mostra che le fasi relative, pur essendo difficili da cogliere, non sono prive di importanza musicale.

L'effetto della fase nelle parziali: gli studi di Reinier Plomp

La fase relativa tra parziali può cambiare la qualità timbrica di un suono, anche senza produrre variazioni di intensità percepita.

1. DUE SUONI PURI ALL'OTTAVA (2:1)

$$f_1 = 440 \text{ Hz} \quad f_2 = 880 \text{ Hz} (2 f_1)$$



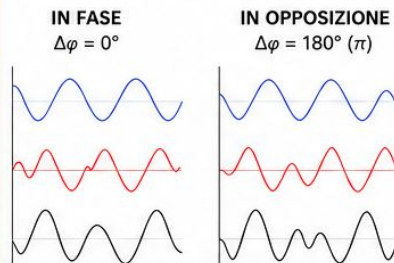
i Lo spettro in ampiezza resta invariato (con componenti a 440 e 880 Hz); cambia solo la fase relativa tra le parziali. Queste differenze possono essere percepite come variazioni di timbro.

2. ALTRI INTERVALLI CONSONANTI

Esempi con $f_1 = 440 \text{ Hz}$

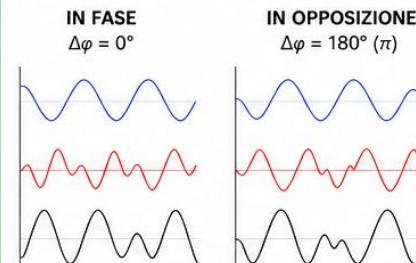
QUINTA GIUSTA (3:2)

$$f_2 = 660 \text{ Hz}$$



QUARTA GIUSTA (4:3)

$$f_2 = 586.67 \text{ Hz} (\approx 587 \text{ Hz})$$



i L'effetto di fase può estendersi ad altri rapporti consonanti semplici (es. 3:2, 4:3, ...). È più marcato nell'ottava (2:1), più sottile e variabile in altri intervalli consonanti.

3. BATTIMENTI CLASSICI vs EFFETTO DI FASE (Plomp)

BATTIMENTI CLASSICI

Frequenze molto vicine
(es. 440 Hz e 442 Hz)



Si percepisce una modulazione periodica dell'intensità (battimenti): il suono "cresce e decresce".

$\neq$

EFFETTO DI FASE (Plomp)

Frequenze in rapporto semplice
(es. 440 Hz e 880 Hz, ottava)



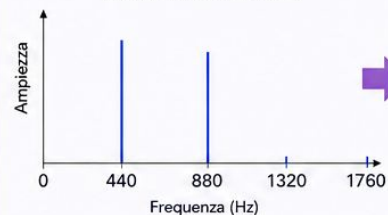
Non c'è modulazione di intensità. Cambia la forma d'onda a spettro invariato e quindi la qualità timbrica (più "morbida", "vuota", "metallica", ecc.).

i I battimenti richiedono frequenze molto vicine: L'effetto di fase può manifestarsi anche tra frequenze non adiacenti, purché siano in rapporti armonici semplici.

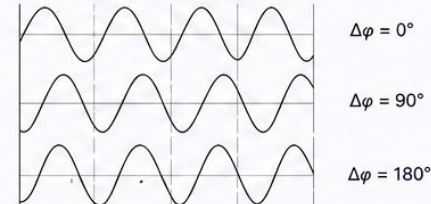
$$f_{\text{batt}} = |f_2 - f_1|$$

4. PERCHÉ SUCCEDE?

Spettro in ampiezza
(identico per tutte le fasi)



Forma d'onda nel tempo
(dipende dalla fase relativa)



i La fase relativa tra le parziali non altera lo spettro in ampiezza, ma modifica la forma d'onda nel tempo e quindi la qualità percepita del suono.

i **IN SINTESI:** suoni con lo stesso spettro possono suonare diversi se cambia la fase relativa tra le parziali. Questo è l'effetto di fase descritto ed evidenziato sperimentalmente da Reinier Plomp, in condizioni controllate di ascolto (segnali puri, ascolto in cuffia, soggetti allenati).

NOTA

L'effetto è più udibile in ascolto in cuffia, con toni puri e soggetti allenati. Nella musica reale intervengono molti altri fattori (involuppo temporale, transienti, rumore, inarmonicità, ecc.).

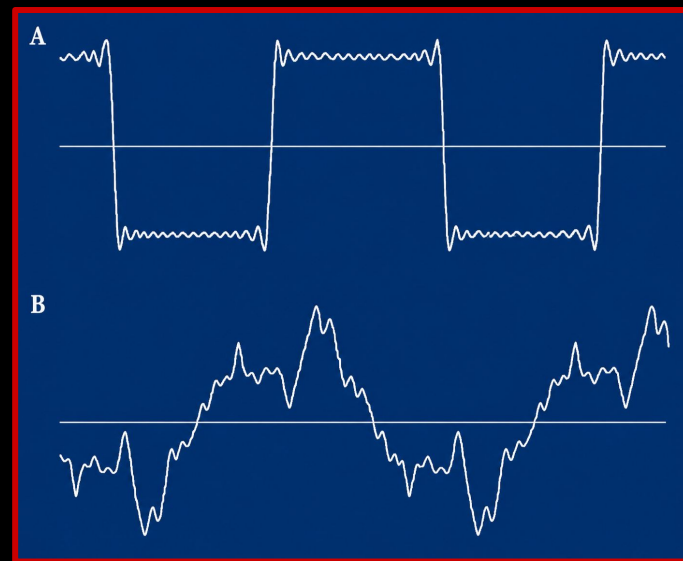
Stesse armoniche, fasi diverse: l'effetto sul timbro

Costruiamo un suono sommando più parziali armoniche (10 o 20), in modo da approssimare un'onda quadra. Se le fasi relative delle parziali sono correttamente allineate, la forma d'onda risultante assomiglia a un'onda quadra. Se invece manteniamo le stesse parziali e le stesse ampiezze, ma assegniamo alle parziali delle fasi casuali, la forma d'onda risultante cambia notevolmente. Nella figura, l'onda A è un'onda quadra ottenuta con 12 parziali armoniche in fase corretta; l'onda B contiene le stesse 12 parziali, con le stesse ampiezze, ma con fasi distribuite casualmente.

Visivamente le due onde sono molto diverse. Dal punto di vista percettivo, però, la differenza è più sottile: l'onda B può suonare leggermente più morbida e meno graffiante rispetto all'onda A, ma l'altezza del suono rimane la stessa.

Questi effetti della fase si percepiscono più facilmente con le cuffie che in una stanza riverberante.

Questo mostra che la fase ha una certa importanza nel suono musicale, ma il suo ruolo è meno decisivo di quanto si possa pensare.



Inarmonicità, fase e calore del suono del pianoforte

La fase mostra tutta la sua importanza nel caso del suono del pianoforte. A differenza di una corda ideale, le corde del pf producono parziali non perfettamente armoniche, perché le corde reali possiedono tensione ma anche rigidità: tendono quindi a opporsi alla flessione. L'effetto è evidente nelle parziali superiori, nei modi vibratorii più alti della corda: qui la vibrazione presenta un numero maggiore di curvature. La rigidità ostacola maggiormente queste vibrazioni più complesse, aumentando la frequenza delle parziali alte e rendendole più acute rispetto a una corda ideale → *inarmonicità*.

Nel 1962, **Harvey Fletcher** e i suoi collaboratori → studiano il suono del pianoforte attraverso l'analisi e la sintesi. Scoprirono che il caratteristico *calore timbrico* del pianoforte dipende proprio da questa non-armonicità delle parziali. Quando essi sintetizzarono i suoni con la stessa evoluzione di intensità delle parziali del pianoforte, ma con parziali perfettamente armoniche, il risultato fu un suono corretto ma piatto, privo di quel tipico movimento interno.

Questo mostra che → il caratteristico calore timbrico del pianoforte dipende in larga misura dall'inarmonicità delle sue parziali: esse non mantengono rapporti armonici perfetti, le loro relazioni di fase evolvono continuamente nel tempo, producendo interferenze interne (percepibili come una sorta di battimenti tra le parziali superiori) e un costante mutamento della forma d'onda. È proprio questa micro-variazione interna a conferire al suono del pianoforte la sua particolare vitalità e ricchezza timbrica.

IL CONCETTO DI TONE WARMTH (Calore timbrico)

DEFINIZIONE LAPIDARIA

Il **tone warmth**
(calore timbrico) è

la qualità di un suono che appare
vivo, ricco e internamente mobile.

Perché il pianoforte suona “vivo” e non piatto?



DIMOSTRATO SPERIMENTALMENTE DA

Harvey Fletcher
e collaboratori
(1962)



Attraverso studi di analisi e sintesi sul suono
del pianoforte, dimostrarono che il caratteristico
tone warmth (calore timbrico) dipende
dall'**inarmonicità** delle sue parziali.



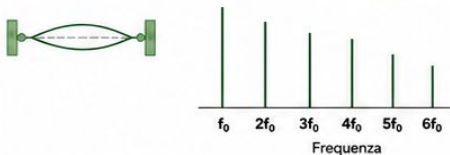
Le corde del pianoforte non sono ideali: oltre alla tensione hanno rigidità e si oppongono alla flessione.

Questo rende soprattutto le parziali superiori **progressivamente più alte in frequenza rispetto alla serie armonica ideale**: fenomeno chiamato **INARMONICITÀ**.

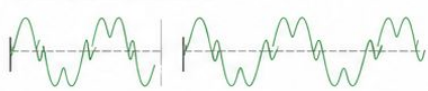
1. CORDA IDEALE (ARMONICA)

Parziali esattamente armoniche
(multipli interi della fondamentale)

SPETTRO (frequenze)



FORMA D'ONDA NEL TEMPO



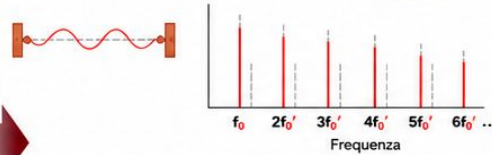
Relazioni di fase stabili → forma d'onda stabile

Suono: regolare ma statico, povero di movimento interno.

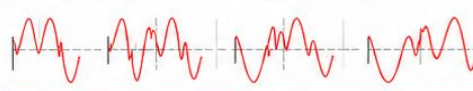
2. CORDA DEL PIANOFORTE (INARMONICA)

Parziali non perfettamente armoniche
(non multipli interi della fondamentale)

SPETTRO (frequenze)



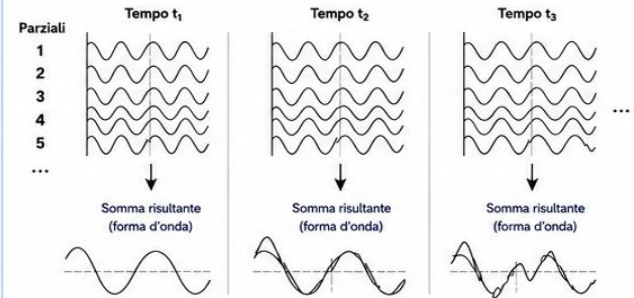
FORMA D'ONDA NEL TEMPO (in continua evoluzione)



Le relazioni di fase cambiano continuamente nel tempo
→ **INTERFERENZE INTERNE** (percepibili come battimenti
tra le parziali superiori) → forma d'onda in continua evoluzione
Suono: ricco, caldo, **vivo** e dinamico.

3. PERCHÉ NASCE IL TONE WARMTH (CALORE TIMBRICO)

Inarmonicità → sfasamento progressivo → interferenze interne
(percepibili come battimenti) →
continua trasformazione della forma d'onda



Questa micro-variazione interna conferisce al pianoforte
la sua particolare vitalità e ricchezza timbrica: il suo
TONE WARMTH (CALORE TIMBRICO).



IN SINTESI

Non è (solo) l'intensità delle parziali che crea il tone warmth
(calore timbrico), ma il loro continuo interagire nel tempo
a causa dell'**inarmonicità**.



Colpo del martelletto
sulla corda



Parziali inarmoniche
eccitate



Relazioni di fase che
evolvono



Interferenze interne
(battimenti)



Tone warmth
(calore timbrico)
(suono vivo)

Attacco, estinzione e timbro negli strumenti a corda.

La qualità del suono del Pianoforte → dipende da come il martelletto colpisce la corda.

- Il martelletto → colpisce la corda circa a $1/7$ della sua lunghezza: per questo non riesce a eccitare il modo di vibrazione della 7° parziale.
- La posizione del martelletto determina quali parziali vengono attivate, ma conta anche il materiale di cui è fatto: un martelletto più duro eccita più parziali superiori, producendo un suono più brillante; un martelletto più morbido attenua queste parziali, generando un suono più dolce.

Nel Clavicembalo → la corda non viene percossa ma pizzicata da un plettro. Questo meccanismo eccita molte parziali superiori, dando origine a un suono più metallico e meno morbido rispetto al pianoforte.

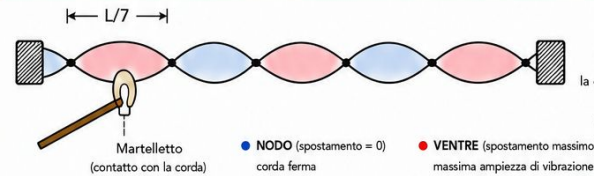
Strumenti come pianoforte, chitarra e clavicembalo → condividono il caratteristico timbro della corda percossa o pizzicata. La sintesi al computer ha mostrato che, per riprodurre questo tipo di suono, sono indispensabili due elementi:

- 1) un attacco rapido e brusco;
- 2) una estinzione lenta e graduale.

Molte differenze timbriche tra questi strumenti dipendono proprio dal modo in cui il suono inizia (attacco) e si spegne (estinzione), cioè dall'involuppo d'ampiezza complessivo e dall'evoluzione temporale delle singole parziali.

L'AZIONE DEL MARTELLETTO E L'ECCITAZIONE DELLA 7ª PARZIALE

La posizione del martelletto sulla corda determina quali parziali vengono eccitate e in che misura: questo influenza in modo decisivo il timbro del pianoforte.



Questa è la forma della 7ª parziale (n = 7):
la corda ha 7 "ventri" (ampie) e 6 "nodi" interni.
Gli estremi fissati sono anch'essi nodi.
La distanza tra due nodi consecutivi è $L/7$.

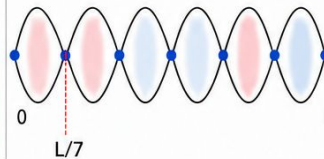
1 LA CORDA ECCITATA A 1/7 DELLA LUNGHEZZA

Se eccitiamo la corda esattamente a $1/7$ della sua lunghezza, il punto di contatto coincide con un **NODO** della 7ª parziale.

In un nodo la corda non si muove nella 7ª parziale → nel modello ideale la sua eccitazione è nulla.

Modo di vibrazione della 7ª parziale (n = 7)

● NODI (fermi) ● VENTRI (massima ampiezza)



In pratica
(martelletto non è un punto)



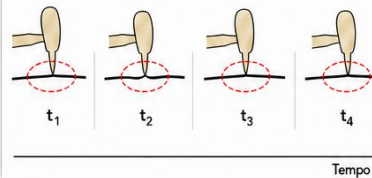
Il contatto ha una certa larghezza e dura un certo tempo. Per questo la 7ª parziale **NON** è eccitata in modo nullo, ma con ampiezza molto piccola.

2 IL MARTELLETTO NON È UN PUNTO

Il martelletto non colpisce in un solo punto, ma in una piccola zona per un certo tempo. Quindi tocca anche i punti vicini, che non sono nodi.

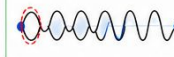
Così la 7ª parziale (e anche le altre) viene eccitata, seppur con ampiezza ridotta, perché la corda viene mossa nei punti vicini ai nodi.

Contatto del martelletto con la corda (vista laterale)



Risultato

La 7ª parziale viene eccitata, ma con ampiezza piccola (rispetto a quando si pizzica su un ventre).

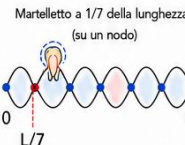


3 QUANTO È EFFICACE?

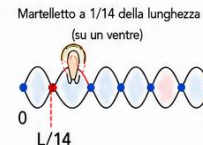
Se il martelletto colpisce a $1/14$ della lunghezza (metà di $1/7$), il contatto cade su un **VENTRE** della 7ª parziale → l'eccitazione è molto forte.

Le altre parziali si eccitano in base alla posizione del martelletto: ognuna ha i suoi nodi e ventri!

Confronto: eccitazione della 7ª parziale



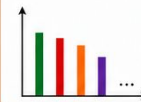
Eccitazione molto debole (nel modello ideale: nulla).



Eccitazione molto forte.

Nota

Le intensità delle altre parziali (2ª, 3ª, 4ª, ...) dipendono anch'esse dalla posizione del martelletto.



IN SINTESI

- Eccitare la corda a $1/7$ della lunghezza non eccita (idealmente) la 7ª parziale, perché quel punto è un nodo per quella vibrazione.
- Nella realtà il martelletto ha una superficie e un contatto che durano nel tempo: tocca anche i punti vicini e quindi la 7ª parziale viene comunque eccitata, ma poco.
- Colpire a $1/14$ della lunghezza (un ventre) eccita la 7ª parziale molto di più.

● NODO (fermo)
spostamento = 0
● VENTRE (massimo)
spostamento massimo

● NODO
(spostamento = 0)
corda ferma

○ VENTRE
(spostamento massimo)
massima ampiezza di vibrazione

—●— Nodo =
eccitazione debole

—●— Ventre =
eccitazione forte



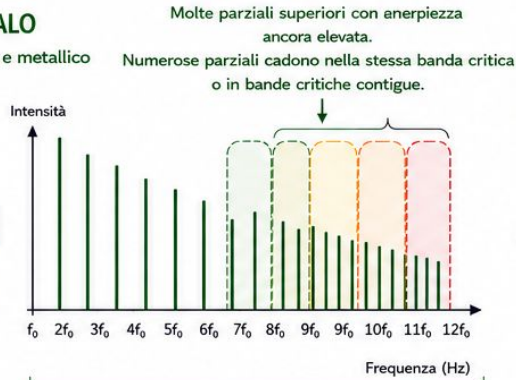
PARZIALI SUPERIORI, BANDA CRITICA E TIMBRO

Le **intensità relative delle parziali** influenzano in modo decisivo la qualità del suono.

È proprio grazie a questa diversa distribuzione e al modo in cui il suono evolve nel tempo che possiamo distinguere, per esempio, un **Clavicembalo** da un **Pianoforte**.

CLAVICEMBALO

timbro aspro, brillante e metallico



Maggiore densità di parziali nelle regioni acute
= maggiore interazione percettiva → suono più ruvido e brillante

PIANOFORTE

timbro più morbido, caldo e ricco

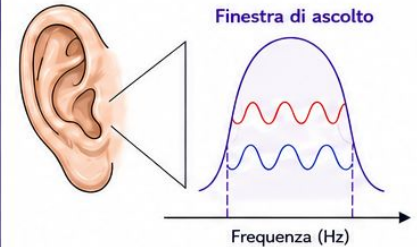


Minore densità di parziali nelle regioni acute
= minore interazione percettiva → suono più limpido e rotondo

La maggiore densità di parziali nelle regioni acute contribuisce al carattere più brillante e metallico del clavicembalo, perché aumenta le interazioni percettive (integrazione uditiva) e la ruvidità. L'assenza di controllo dinamico e l'attacco più secco accentuano questa impressione.

CHE COS'È LA BANDA CRITICA?

È l'intervallo di frequenze entro cui l'orecchio tende a trattare più suoni come un unico insieme percettivo (una "finestra di ascolto").



Suoni con frequenze che cadono all'interno della stessa banda critica vengono percepiti come unità, non come separati.

Quando molte frequenze sono sufficientemente ravvicinate da cadere nella stessa banda critica (o in bande critiche contigue), possono interferire percettivamente tra loro, aumentando la ruvidità e generando una sensazione sonora più aspra e meno limpida.

Questo spiega anche il caratteristico fenomeno di **ruvidità** (spesso percepita come "brusio"), generato dalle forme d'onda periodiche prodotte da molti suoni sintetici.



Le molte parziali alte, ravvicinate nella stessa o in bande critiche contigue, interferiscono tra loro → suono aspro, ruvido ("brusio").



Anche qui, l'accumulo di parziali alte in bande critiche contigue genera interferenze percettive → suono più ruvido e meno gradevole.



IN SINTESI

- Il timbro dipende da dove e come sono distribuite le parziali e da come il suono evolve nel tempo.
- Quando molte parziali superiori cadono nella stessa o in bande critiche contigue, aumentano le interazioni percettive, i battimenti e le interferenze.
- Questo produce ruvidità e un timbro più aspro, metallico o "bruciante", tipico di molti suoni sintetici e del clavicembalo.

- NODO** (fermo)
spostamento = 0
- VENTRE** (massimo)
spostamento massimo

- Nodo = eccitazione debole
- Ventre = eccitazione forte

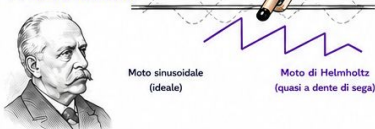
Nota

La banda critica si allarga con la frequenza: nella regione acuta possono coesistere più parziali nella stessa finestra percettiva.

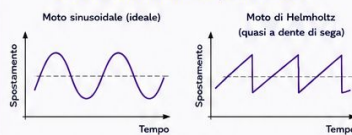
IL MOTO DELLA CORDA NEL VIOLINO: IL MOTO DI HELMHOLTZ

1 LA CORDA SFREGATA DALL'ARCHETTO

Come osservò Hermann von Helmholtz: la forma del moto complessivo della corda del violino non è sinusoidale, ma segue un andamento caratteristico approssimativamente a dente di sega: è il moto di Helmholtz.



CONFRONTO DEI MOTI (in un punto della corda)



Il moto di Helmholtz non è una perfetta onda a dente di sega, ma ha un andamento simile: salita lenta e caduta molto rapida.

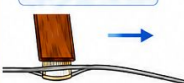
2 IL MECCANISMO: ADESIONE E SCIVOLAMENTO (STICK-SLIP)

La vibrazione avviene in due fasi che si ripetono continuamente.

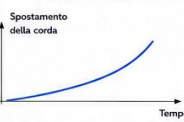
FASE 1 - ADESIONE (STICK)

L'archetto "afferma" la corda. La trascina lentamente e la corda si deforma sempre di più, accumulando tensione elastica.

La corda resta "incollata" all'archetto.



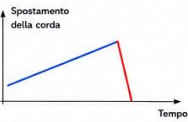
La corda è piegata sempre di più e immagazzina energia elastica.



FASE 2 - SCIVOLAMENTO (SLIP)

Quando la tensione elastica accumulata supera la forza d'attrito, l'attrito non riesce più a trattenere la corda: la corda sfugge all'archetto e scatta rapidamente verso la posizione opposta.

La corda scivola improvvisamente sotto l'archetto.



IL CICLO SI RIPETE PERIODICAMENTE

PERCHÉ AVVIENE LO SCIVOLAMENTO? (il ciclo fisico in 4 istanti)

1 L'archetto trascina la corda che si deforma sempre di più.



2 La tensione elastica (energia immagazzinata) aumenta.



3 Quando la tensione supera la forza d'attrito massimo (adesione), la corda non può più restare "attaccata".



4 La corda sfugge (scivola) all'archetto e ritorna rapidamente.



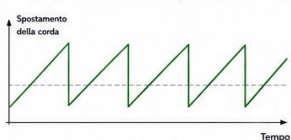
ANALOGIA INTUITIVA

È simile a quando si trascina con il dito un elastico teso: per un momento resta "attaccato", poi scivola improvvisamente.



3 FORMA DEL MOTO

Risultato: salita lenta + caduta rapida = onda a dente di sega (approssimata).



CARATTERISTICHE

- moto periodico
- salita lenta (stick)
- caduta rapida (slip)
- forte discontinuità
- presenza di molte armoniche superiori

4 CONSEGUENZE SONORE

Una forma d'onda quasi a dente di sega produce uno spettro ricco di armoniche.



Più sono numerose e intense le armoniche superiori, più il suono risulta brillante, pieno e, talvolta, più ruvido.

EFFETTO SONORO

- timbro brillante e ricco
- suono pieno di armoniche
- nelle regioni acute può aumentare la ruvidità (ruvidità maggiore)

5 IL RUOLO DELLA CASSA ARMONICA

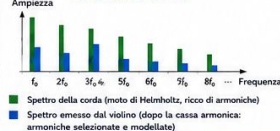
DALLA CORDA ALLA CASSA ARMONICA

Nel violino reale il suono non coincide con quello "grezzo" prodotto dalla corda. La cassa armonica:

- amplifica alcune frequenze (risonanze)
- ne attenua altre
- filtra e modella lo spettro sonoro



EFFETTO SULLO SPETTRO

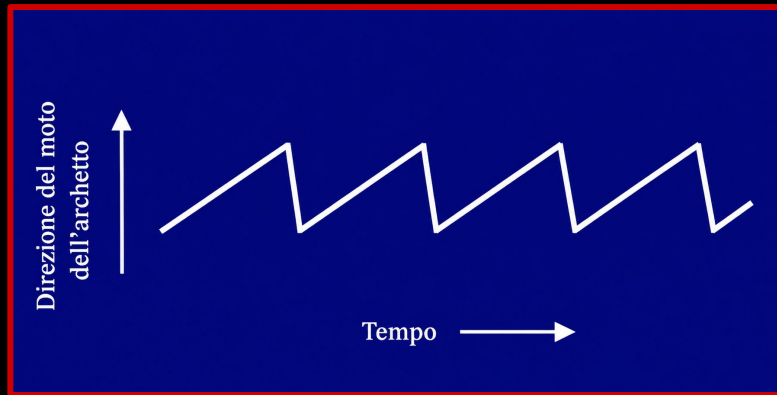


IN DEFINITIVA: NEL VIOLINO → CORDA (ECCITAZIONE) + CASSA ARMONICA (FILTRO RISONANTE)

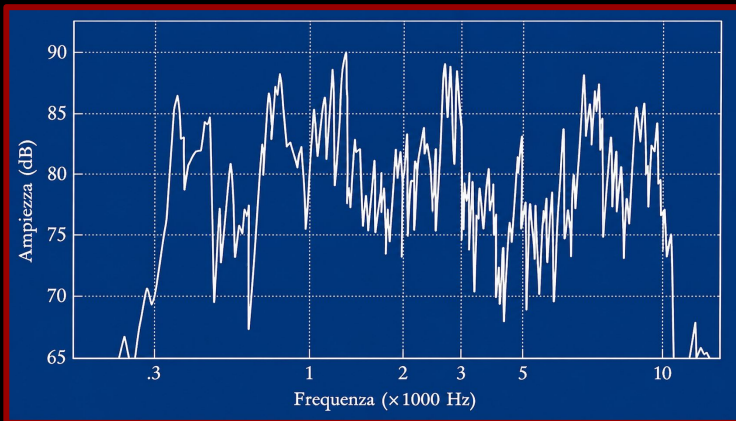


*Nel violino:
corda (eccitazione) + cassa armonica
(filtro risonante).*

*La corda → produce un segnale ricco di
armoniche, la cassa armonica → ne
modella il contenuto spettrale. → da
questa interazione nasce il timbro
caratteristico del violino.*



Il moto di una corda di violino sfregata dall'archetto ha una forma caratteristica a dente di sega (*moto di Helmholtz*). L'archetto trascina la corda finché la tensione elastica accumulata supera la forza d'attrito: la corda allora scivola rapidamente indietro. Subito dopo l'archetto la riaggancia e la trascina di nuovo, ripetendo periodicamente il ciclo, come si vede in figura.



- La figura mostra un suono di violino con vibrato.
- La cassa armonica funziona come filtro risonante: amplifica alcune armoniche e ne attenua altre.
- Il vibrato fa oscillare la frequenza fondamentale e quindi sposta anche le armoniche.
- Le armoniche si avvicinano o si allontanano dai picchi di risonanza della cassa armonica.
- Cambiano così l'intensità delle armoniche, la forma d'onda e il timbro.
- Nel violino il vibrato modifica quindi sia l'altezza sia il colore del suono.

IL VIOLINO ELETTRONICO DI MAX MATHEWS (VERSIONE ANALOGICA ANNI '70)

La vibrazione della corda viene trasformata in segnale elettrico e modellata da filtri (o dal sistema di amplificazione) che simulano le risonanze della cassa armonica. Il risultato è un suono convincente, simile a quello di un violino reale.

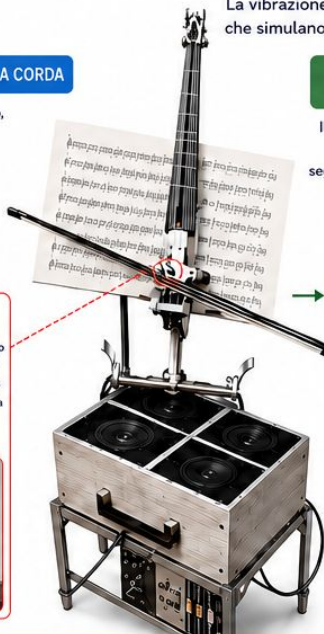
1. VIBRAZIONE DELLA CORDA

La corda, eccitata dall'arco, vibra secondo il moto di Helmholtz.

Il segnale meccanico risultante è complesso; la sua forma d'onda è approssimativamente "a dente di sega".

PICKUP MAGNETICO (trasduttore elettromagnetico)

Un piccolo magnete è posto molto vicino alla corda (senza contatto). Le variazioni del flusso magnetico indotte dal movimento della corda vengono convertite in segnale elettrico.



2. TRASDUZIONE ELETTROMAGNETICA

Il pickup magnetico trasforma il moto della corda in un segnale elettrico corrispondente alla sua vibrazione.



3. SEGNALE ELETTRICO

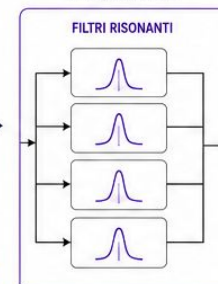
Il segnale elettrico rappresenta la forma d'onda complessa della corda e contiene molte armoniche.



f_0 = frequenza fondamentale (nota suonata)
 $f_0, 2f_0, 3f_0, \dots$ = armoniche (multiplici interi di f_0)

4. FILTRI RISONANTI (SIMULAZIONE CASSA ARMONICA)

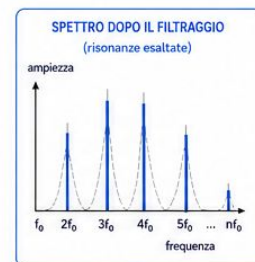
Il segnale passa attraverso filtri risonanti che simulano le principali risonanze della cassa armonica del violino (o, in seguito, le colorazioni del sistema di amplificazione).



Le frequenze vicine alle risonanze sono amplificate, le altre attenuate.

5. SUONO IN USCITA

Il segnale filtrato viene riconvertito in suono: il risultato è un timbro simile a quello di un violino reale.



USCITA AUDIO
(suono di violino)



OSSERVAZIONE DI MATHEWS: IL SISTEMA DI AMPLIFICAZIONE INTRODUCE COLORAZIONI RISONANTI

Mathews osservò che effetti simili a quelli dei filtri risonanti possono essere ottenuti anche senza filtri espliciti: gli altoparlanti e le casse acustiche introducono proprie colorazioni risonanti, in parte analoghe a quelle della cassa armonica del violino.

SEGNALE ELETTRICO NON FILTRATO



SISTEMA DI AMPLIFICAZIONE
(altoparlanti e casse)

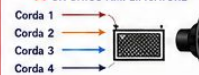
SUONO COLORATO
(colorazioni naturali del sistema)



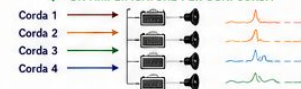
ACCORDI PULITI: UN AMPLIFICATORE PER CORDA

Un unico sistema comune provoca intermodulazione, generando componenti indesiderate e accordi "sporchi".

UN UNICO AMPLIFICATORE



UN AMPLIFICATORE PER OGNI CORDA

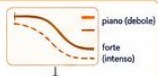


Usare un amplificatore e un altoparlante dedicati per ogni corda evita intermodulazione e garantisce accordi puliti e indipendenti.

MODELLARE IL TIMBRO: DIVERSI FILTRI, DIVERSI SUONI

FILTRO PASSA-BASSO DINAMICO

Più aumenta l'intensità, più il filtro smorza le armoniche acute.



SUONO SIMILE AGLI OTTONI

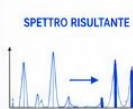


FILTRO PASSA-BANDA MOBILE

La banda di frequenza trasmessa si sposta nel tempo.



EFFETTO VOCALICO
(tipo "wah")



RISONANZA INTORNO AI 2500-3000 Hz (SINGER'S FORMANT)

Enfatizza un cluster di formanti attorno ai 2.5-3 kHz, simile alla formante del cantante.



SUONO PIÙ RICCO, BRILLANTE E PROIETTATO



IN SINTESI Il violino elettronico di Max Mathews dimostrò che un suono realistico può essere ottenuto convertendo la vibrazione meccanica in segnale elettrico e rimodellandone lo spettro con filtri analogici: la ipotesi della teoria della risonanza si alla comprensione del timbro come fenomeno di filtraggio.



Max Mathews (1926–2011) è considerato il padre della computer music: ai *Bell Labs* sviluppò nel 1957 il programma MUSIC I, il primo sistema di sintesi digitale del suono, aprendo la strada alla musica al computer.

Nei primi anni '70, sempre ai *Bell Labs* (Murray Hill, New Jersey), progettò un violino elettronico *analogico* sperimentale.

Il violino fu completato in modalità *digitale* nel 1984, usato come interfaccia di controllo per la sintesi in tempo reale.

In questo strumento il gesto violinistico non produceva direttamente il suono, ma veniva trasformato in dati di controllo: per esempio, la velocità dell'arco regolava l'intensità sonora, la pressione dell'arco modificava il contenuto armonico (più pressione = timbro più brillante e ruvido), il punto di contatto sulla corda cambiava il bilanciamento delle armoniche, mentre la posizione del dito determinava l'altezza del suono.

La sua importanza per lo studio del timbro del violino sta proprio qui: permetteva di isolare sperimentalmente un parametro alla volta e osservare come esso influenza il timbro, chiarendo il rapporto tra gesto esecutivo, spettro sonoro e qualità timbrica nel violino acustico.

★ RIPASSO ★

IL TIMBRO: RISONANZE E STRUTTURA ARMONICA

RIPASSO
DELLA LEZIONE

1. IL VIOLINO: LA CASSA ARMONICA COME "FILTRO RISONANTE"

La corda del violino produce molte armoniche (una serie armonica).

La cassa armonica ha proprie frequenze di risonanza (modi propri) che amplificano selettivamente alcune frequenze.

Il timbro dipende quindi dalle componenti armoniche che coincidono (o sono vicine) alle risonanze della cassa armonica, **non direttamente dalla frequenza fondamentale della nota** coincidono con le risonanze della cassa.

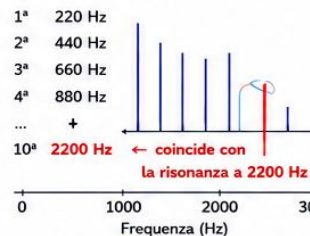


ESEMPIO:

Una risonanza della cassa armonica a 2200 Hz viene eccitata da armoniche diverse a seconda della nota suonata.

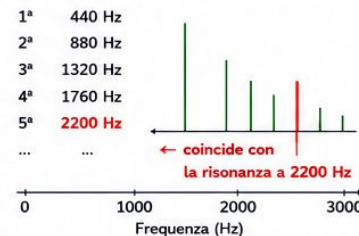
NOTA SUONATA: La2 (220 Hz)

Armoniche della corda



NOTA SUONATA: 440 Hz (La3 = 440 Hz)

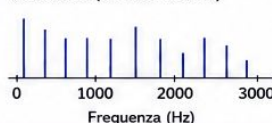
Armoniche della corda



La stessa risonanza della cassa (es. 2200 Hz) può essere eccitata da armoniche diverse (10^a di 220 Hz, 5^a di 440 Hz, ...).

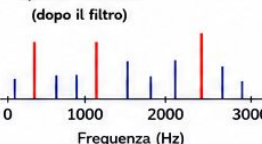
Questo è il motivo per cui, pur cambiando nota, il violino mantiene un timbro riconoscibile.

Spettro "grezzo" della corda (es. La2 = 220 Hz)



CASSA ARMONICA (filtro risonante)

Spettro risultante (dopo il filtro)



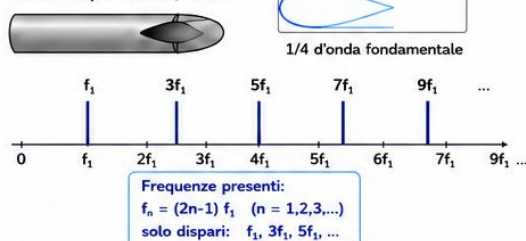
Le frequenze vicine alle risonanze della cassa sono **amplificate** → determinano il **colore (timbro)** del suono del violino.

2. LE CANNE D'ORGANO: LA STRUTTURA ARMONICA DETERMINA IL COLORE DEL SUONO

CANNA CHIUSA (ad un'estremità)

In prima approssimazione compaiono solo le armoniche **DISPARI**.

Il suono è più "vuoto", "cavo".



PERCEZIONE DEL TIMBRO

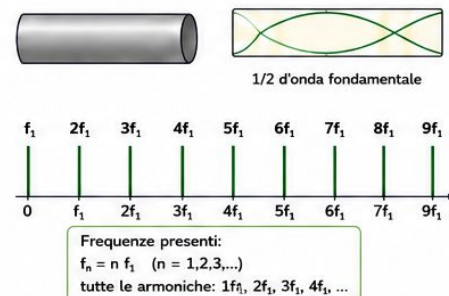
Il nostro orecchio è molto sensibile alle intensità relative delle armoniche. Spettri diversi producono colori sonori diversi.

In sintesi:

- Nel violino il timbro dipende soprattutto dalle risonanze della cassa armonica, che esaltano certe frequenze.
- In altri strumenti (come le canne d'organo) il timbro dipende dalla struttura armonica prodotta dalla sorgente (quali armoniche sono presenti e con quale intensità).

CANNA APERTA (aperta ad entrambe le estremità)

Sono presenti tutte le armoniche (pari e dispari). Il suono è più "pieno", "ricco".



EFFETTO SUL TIMBRO

Canna chiusa:



suono
"vuoto",
"cavo"

Canna aperta:



suono
"pieno",
"ricco"



Il timbro nasce dall'interazione tra la sorgente sonora (che genera le armoniche) e il sistema risonante (che le seleziona e le modella).

RIFERIMENTO: Do centrale = Do3 ≈ 261.63 Hz

VOCALI, FORMANTI E RICONOSCIMENTO TIMBRICO



Le vocali e il timbro.

Le vocali sono riconoscibili quasi indipendentemente dall'altezza. Il motivo principale è la presenza delle **formanti**, cioè delle risonanze del tratto vocale.

FORMANTI

Le formanti sono regioni di risonanza del tratto vocale che rinforzano selettivamente le componenti spettrali vicine alle loro frequenze.

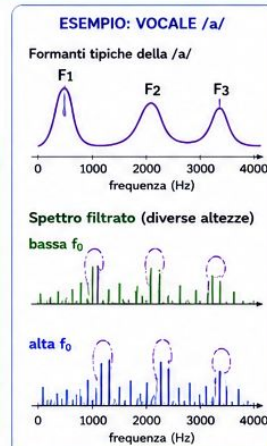
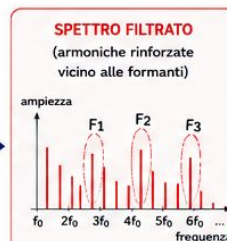
ESEMPI DI VOCALI



1. VOCE FONATA (parlare normale, cantare, vocalizzare)

Le corde vocali producono un suono complesso periodico formato da una fondamentale e dalle sue armoniche.

Le armoniche vicine alle frequenze formanti risultano rinforzate e quindi più intense, mentre quelle più lontane risultano più deboli.



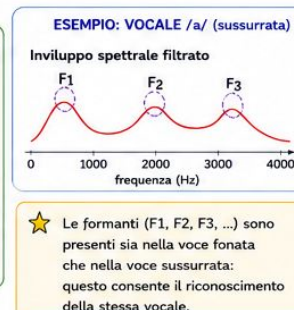
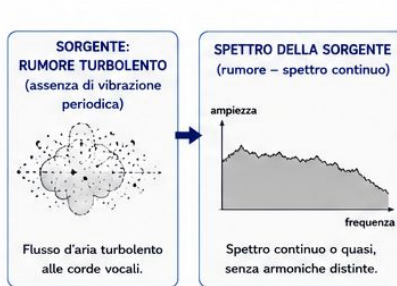
★ Anche cambiando l'altezza (f_0), le formanti restano negli stessi punti e la vocale rimane riconoscibile.

🔑 Le formanti selezionano e rinforzano alcune frequenze della serie armonica, modellando il timbro della vocale.

2. VOCE SUSSURRATA

Non c'è la vibrazione periodica delle corde vocali, non si genera una serie armonica regolare. La sorgente sonora è costituita soprattutto da rumore turbolento e lo spettro risulta continuo o quasi continuo.

Tuttavia, l'involuppo spettrale conserva le stesse zone di risonanza (formanti), permettendo il riconoscimento della vocale.



In sintesi: il timbro delle vocali dipende dalle **formanti** del tratto vocale, non solo dalla fondamentale. Per questo le vocali restano riconoscibili anche cambiando l'altezza o passando dalla voce fonata alla voce sussurrata.

Legenda: F1, F2, F3, ... = formanti (frequenze di risonanza del tratto vocale)
 f_0 = frequenza fondamentale

Voce fonata e voce sussurrata: sorgente e filtro

La differenza tra *voce fonata* e *voce sussurrata* → sta soprattutto nella sorgente sonora:

fonata → sorgente periodica // *sussurrata* → sorgente rumorosa.

Il *filtro* (tratto vocale) rimane invece in gran parte lo stesso, mantenendo formanti simili.

Per questo le vocali restano riconoscibili anche nel sussurro.

- I suoni vocalici sono determinati dalle formanti, cioè dalle risonanze del tratto vocale.
- Le formanti amplificano alcune regioni dello spettro, rendendo certe frequenze più intense.

Figura

A → Voce sussurrata

Spettro continuo di rumore, senza armoniche regolari.
Le formanti compaiono come zone di maggiore intensità.

B → Voce fonata (200 Hz)

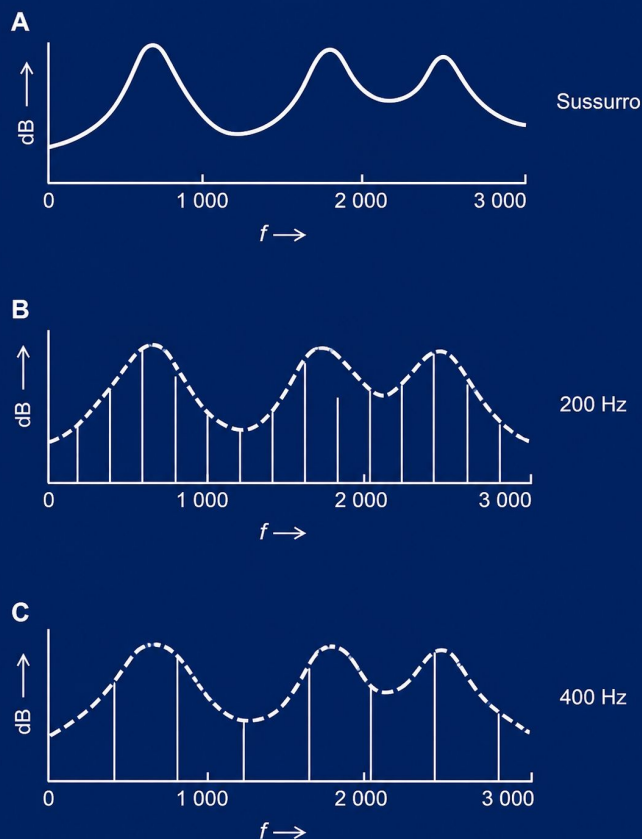
Sono presenti armoniche a 200 Hz e ai suoi multipli interi.
L'involuppo spettrale mostra le formanti del tratto vocale.

C → Voce fonata (400 Hz)

Le armoniche sono più distanziate rispetto a B.

Le formanti sono meno evidenti perché ci sono meno armoniche disponibili.

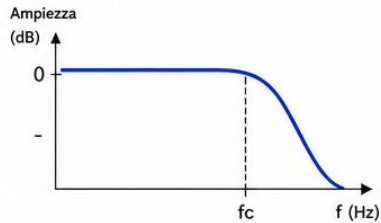
Nelle voci più acute (es. femminili) le armoniche più spaziate rendono più difficile individuare chiaramente le formanti.



1. I QUATTRO TIPI ELEMENTARI DI FILTRO

1 PASSA-BASSO

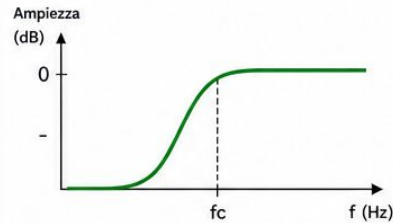
Lascia passare le **basse frequenze** e attenua le alte.



Esempio: eliminare il **rumore acuto**.

2 PASSA-ALTO

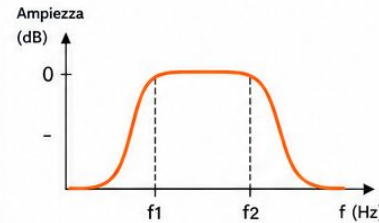
Lascia passare le **alte frequenze** e attenua le basse.



Esempio: eliminare il **rumore grave**.

3 PASSA-BANDA

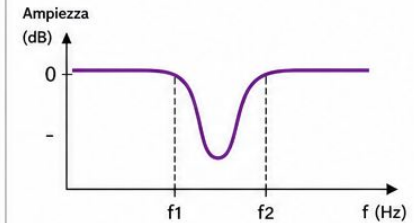
Lascia passare **soprattutto una banda** di frequenze.



Esempio: selezionare una **banda utile**.

4 TOGLI-BANDA (NOTCH)

Attenua fortemente una banda di frequenze e lascia passare le altre.

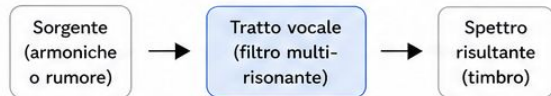


Esempio: attenuare un **ronzio a 50 Hz**.

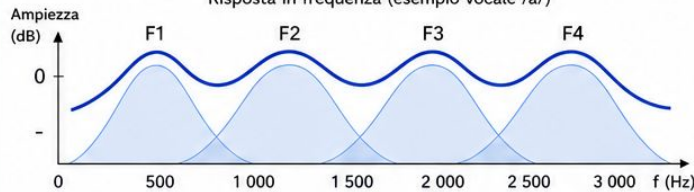
2. FILTRO MULTI-RISONANTE: INSIEME DI RISONANZE (FORMANTI NEL TRATTO VOCALE)

Il **tratto vocale** (e il **corpo risonante del violino**) non agisce come un singolo filtro elementare, ma come un insieme di **risonanze**: alcune bande strette di frequenza vengono **selettivamente** rinforzate.

TRATTO VOCALE: LE FORMANTI



Risposta in frequenza (esempio vocale /a/)



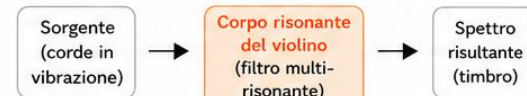
Ogni picco = una formante (risonanza del tratto vocale)

IDEA CHIAVE

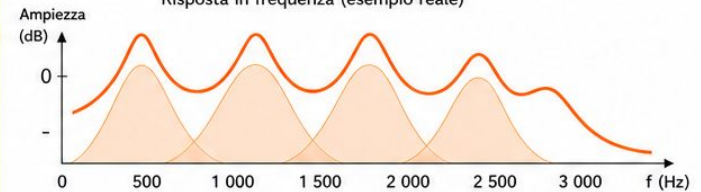
La sorgente può cambiare (periodica = voce fonata, rumorosa = sussurro), ma le **risonanze del filtro rimangono simili**.

Per questo le vocali restano riconoscibili anche nel sussurro.

CORPO RISONANTE DEL VIOLINO



Risposta in frequenza (esempio reale)



Ogni picco = una risonanza del corpo risonante

FORMULA CONCETTUALE

Sorgente → **Filtro risonante** (multi-risonante) → Spettro risultante → Timbro



IN SINTESI

- I quattro filtri elementari agiscono su una sola banda in modo globale.
- Il tratto vocale e il corpo risonante del violino sono **filtri multi-risonanti**: insieme di **risonanze (passa-banda sovrapposti)** che modellano lo spettro.

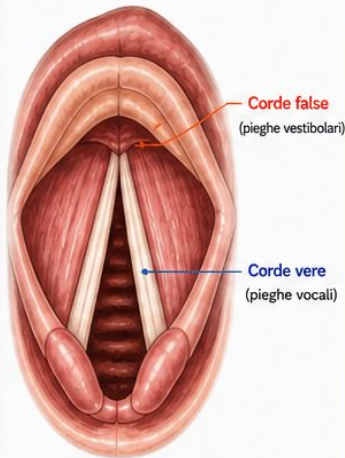
LE CORDE FALSE (PIEGHE VESTIBOLARI)

Anatomia, suono e ruolo nel canto

1. CHE COSA SONO?

Nella laringe esistono due coppie di pieghe:

- **Corde false** (pieghe vestibolari): superiori
- **Corde vere** (pieghe vocali): inferiori



Vista dall'alto (laringe aperta)

FUNZIONI PRINCIPALI

- Protezione delle vie respiratorie
- Chiusura laringea durante deglutizione
- Aumento della compressione glottica e della densità timbrica (tosse, sforzo, sollevamento pesi)
- Possono contribuire all'espressione emotiva e alla colorazione del suono

2. CHE TIPO DI SUONO PRODUCONO?

Le corde false possono entrare in vibrazione e contribuire alla produzione sonora, da sole o insieme alle corde vere.

QUANDO VIBRANO, IL SUONO RISULTA:



Più rumoroso
maggiore componente di rumore.



Più ruvido e denso
spettro ricco di energia irregolare.

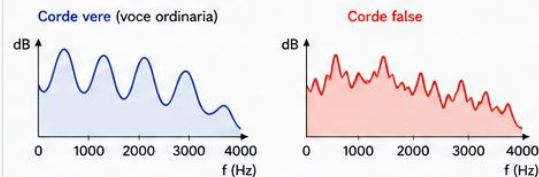


Meno armonicamente definito
le armoniche sono meno regolari e meno distinte.



Spesso arricchito da subarmoniche
possono apparire frequenze multiple intere al di sotto della fondamentale.

CONFRONTO SPETTRALE (esempio)



Il suono delle corde false è caratterizzato da maggiore rumore, irregolarità e subarmoniche.

3. RUOLO NEL CANTO

Nella fonazione ordinaria le corde false non vibrano.

Nel canto possono essere coinvolte in modi diversi per ottenere timbri e colori specifici.

A. SOSTEGNO E COLORAZIONE



Un leggero avvicinamento e vibrazione delle corde false può aumentare la compressione glottica e la densità timbrica, dando più **corpo, calore e intensità** al suono, soprattutto nei registri gravi.

B. TECNICHE ESTREME (DISTORSIONE)



La vibrazione intenzionale delle corde false, da sola o insieme alle corde vere, produce suoni distorti e "sporchetti" tipici di molti generi musicali moderni.

Esempi: growl, distortion, fry scream, death growl, grunt, false cord scream.

C. EFFETTI VOCALI E COLORI SPECIALI



Possono dare vita a effetti vocali particolari e arricchire il colore della voce, creando sfumature uniche e intensità espressiva.



ATTENZIONE

Un uso eccessivo o scorretto delle corde false può causare affaticamento, raucedine e danni laringei. È importante un apprendimento guidato e consapevole.

RIASSUNTO IN UN COLPO D'OCCHIO



Corde false (pieghe vestibolari) superiori

Normalmente non vibrano nella fonazione ordinaria

Funzione protettiva e di sostegno (compressione glottica, chiusura laringea, ecc.)

Se vibrano → suono più rumoroso, ruvido, meno armonicamente definito, con subarmoniche

Nel canto: contribuiscono a densità timbrica, distorsione controllata, effetti vocali e colori sonori specifici

IN SINTESI

Le corde false non sono la sorgente principale della voce, ma possono arricchirla di nuovi colori sonori e aumentare la potenza espressiva.

- Coinvolgimento corde false
- Coinvolgimento corde vere
- Flusso d'aria

TECNICHE VOCALI CON LE CORDE FALSE (FALSE CORDS)

MODALITÀ ESECUTIVE E REPERTORI DI RIFERIMENTO

Le tecniche qui sotto usano in varia misura le corde false (pliche vestibolari) per produrre suoni ruvidi, distorti, soffiati o gutturali.

GROWL

(ringhio gutturale)



Suono grave, scuro e continuo, con forte componente di rumore. Intenso e cavernoso.

Come si fa

- Attivazione delle corde false, compressione e respiro diaframmatico controllato.

Repertori

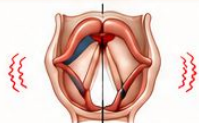
- 🎵 Metal, blues, jazz (estremo), throat singing, doom, stoner rock.

VOCI FEMMINILI (esempi)

- Tatiana Shmayluk (Jinjer)
- Courtney LaPlante (Spiritbox)
- Alissa White-Gluz (Arch Enemy)
- Melissa Bonny (Ad Infinitum)

DISTORTION

(voce distorta)



Voce sporca, graffiata o compressa. Termine generico che include diverse tecniche.

Come si fa

- Può coinvolgere corde false, corde vere o entrambe. Diverse intensità di distorsione.

Repertori

- 🎵 Rock, alternative, blues-rock, post rock, indie, punk.

VOCI FEMMINILI (esempi)

- Janis Joplin (blues-rock)
- PJ Harvey (estremo)
- Diamanda Galás (avant-garde)
- Demetrio Stratos (Area / avant-garde)

FRY SCREAM

(scream in vocal fry)



Scream acuto o medio basato sul vocal fry (registro crepitante). Suono granuloso, stridulo.

Come si fa

- Uso del vocal fry + compressione sopraglottica.
- Le corde false vibrano in modo irregolare e rapido.

Repertori

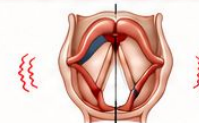
- 🎵 Screamo, post-hardcore, black metal moderno.

VOCI FEMMINILI (esempi)

- Tatiana Shmayluk (Jinjer)
- Courtney LaPlante (Spiritbox)
- Alissa White-Gluz (Arch Enemy)

DEATH GROWL

(growl da death metal)



Suono molto grave, denso e cavernoso, spesso poco intelligibile. Tipico del death metal.

Come si fa

- Forte attivazione delle corde false.
- Risonanze profonde, pressione subglottica elevata.

Repertori

- 🎵 Death metal, brutal death metal, grunge estremo.

VOCI FEMMINILI (esempi)

- Melissa Bonny (Ad Infinitum)
- Karyn Crisis (ex-Crimson Glory)
- Emmure (Suwito)
- (uso estremo anche di false cords)

GRUNT

(grugnito)



Vocalizzazione brevissima, esplosiva e gutturale. Suono percussivo e profondo.

Come si fa

- Chiusura rapida delle corde false con colpi d'aria brevi.
- Usato come accento ritmico.

Repertori

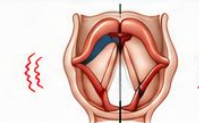
- 🎵 Metalcore, nu metal, djent, rock alternativo.

VOCI FEMMINILI (esempi)

- Alissa White-Gluz (Arch Enemy)
- Jinjer (Tatiana Shmayluk)
- Emmure (Suwito)

FALSE CORD SCREAM

(scream con corde false)



Scream potente e aggressivo prodotto principalmente con le corde false.

Come si fa

- Le corde false si avvicinano fortemente e vibrano.
- Compressione e sostegno del respiro.

Repertori

- 🎵 Metal estremo, hardcore, noise rock, industrial.

VOCI FEMMINILI (esempi)

- Angela Gossow (Arch Enemy)
- Marcela Bovio (Stream of Passion)
- Cammie Gilbert (Oceans of Slumber)

Spettro ricco di basse frequenze e rumore aperiodico.



Spettro con armoniche irregolari e contenuto rumoroso.



CARATTERISTICHE ACUSTICHE (in sintesi)

Spettro con molte componenti alte e rumore ampio.



Energie molto concentrate nelle basse frequenze, subarmoniche possibili.



Impulsi brevi con energia distribuita su basse e medie frequenze.



Spettro denso e rumoroso con energia su medie-basse frequenze.



BLUES / JAZZ / ORIGINI

- Howlin' Wolf (1910–1976)
- Tom Waits (1949–)
- Billie Holiday (1915–1959)
- Mike Patton (1968–)
- Faith No More (dal 1985)

ROCK / ALTERNATIVE

- Janis Joplin (1943–1970)
- Robert Plant (1948–)
- Led Zeppelin (1968–1980)
- Chris Cornell (1964–2017)
- Soundgarden (1984–1997)
- PJ Harvey (1969–)
- Queens of the Stone Age (dal 1996)
- Demetrio Stratos (1945–1979)
- Diamanda Galás (1955–)

REPERTORI DI RIFERIMENTO – ARTISTI E GRUPPI

- Demetrio Stratos (Area) (1945–1979)
- Diamanda Galás (1955–)
- Meredith Monk (1942–)
- Cathy Berberian (1925–1983)
- Mike Patton (1968–)
- Dead Can Dance (dal 1981)

- George "Corpsegrinder" Fisher (1968–)
- Cannibal Corpse (dal 1988)
- Chris Barnes (1967–)
- Cannibal Corpse (1988–1995)
- John Tardy (1963–)
- Obituary (dal 1984)
- Trevor Strnad (1981–2022)
- The Black Dahlia Murder (dal 2001)

METALCORE / NU METAL / DJENT

- Jonathan Davis (1971–)
- Korn (dal 1993)
- Chester Bennington (1976–2017)
- Linkin Park (2000–2017)
- Randy Blythe (1971–)
- Lamb of God (dal 1994)
- Serj Tankian (1967–)
- System of a Down (dal 1994)

EXTREME / INDUSTRIAL / NOISE

- Corey Taylor (1973–)
- Slipknot (dal 1995)
- M. Shadows (1981–)
- Avenged Sevenfold (dal 1999)
- Howard Jones (1966–)
- Killswitch Engage (dal 1999)
- Adam "Nergal" Darski (1978–)
- Behemoth (dal 1991)

Demetrio Stratos

<https://www.youtube.com/watch?v=avSw7ZKrO5g&t=76s>

CANTO CON OVERTONE (CANTO ARMONICO)

Cos'è e in cosa si differenzia dall'uso delle corde false

1. CHE COS'È IL CANTO CON OVERTONE?

Il canto con overtone (o canto armonico) è una tecnica vocale in cui si esalta una o poche armoniche della voce facendole emergere come una melodia sopra la fondamentale.

IN SINTESI



Sorgente normale (voce fonata) + tratto vocale modellato con precisione
→ una armonica viene fortemente amplificata dalle formanti e diventa udibile come "nota" separata sopra la fondamentale.

COME SI PRODUCE

- La **sorgente** (corde vocali vere) vibra normalmente e produce una serie di armoniche (F_0 , $2F_0$, $3F_0$, ...).
- Il **tratto vocale** viene configurato in modo preciso (posizione della lingua, forma della bocca, velo palatino, spazio faringeo...).
- Una **formante** del tratto vocale viene allineata e stretta su un'armonica specifica, che risuona rinforzata molto più delle altre.



È una tecnica di estrema precisione e controllo del filtro formantico, non della sorgente.

4. TECNICA E CONTROLLO



Fattori chiave nel canto con overtone:

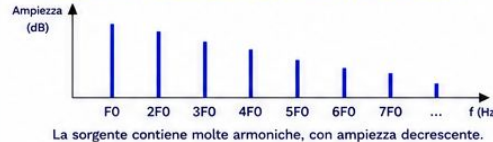
- Posizione della lingua (avanti/indietro, alta/bassa)
- Apertura e forma della bocca
- Sollevamento del velo palatino
- Spazio faringeo e laringeo
- Controllo del flusso d'aria e della pressione sottoglottica

Piccole variazioni spostano le formanti e quindi l'armonica selezionata.

2. COSA SUCCEDDE ACUSTICAMENTE?

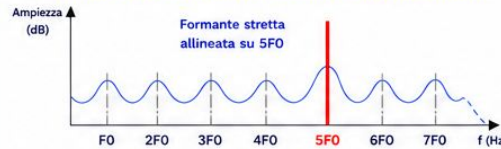
Le corde vocali producono una serie di armoniche:
 F_0 , $2F_0$, $3F_0$, $4F_0$, ...

A. SORGENTE: SPETTRO PRODOTTO DALLA VOCE ORDINARIA



La sorgente contiene molte armoniche, con ampiezza decrescente.

B. FILTRO VOCALE (FORMANTI): SELEZIONE DI UN'ARMONICA



Il tratto vocale configura una formante stretta che rinforza selettivamente l'armonica (es. $5F_0$).



L'armonica rinforzata viene percepita come una nota distinta sopra il suono di base, creando l'effetto caratteristico del canto armonico.



ESEMPI DI TRADIZIONI

- Canto armonico tuvano (khoomei)
 - Canto mongolo (khöömei, sygyt)
 - Canto inuit (katajjaq)
- Presente anche in alcune tecniche contemporanee e sperimentali.



3. DIFFERENZA CON L'USO DELLE CORDE FALSE

Due tecniche molto diverse: agiscono in punti opposti della catena di produzione del suono.

OVERTONE SINGING (arte del filtro)

Agisce soprattutto sul **FILTRO** (tratto vocale)

Sorgente
(corde vocali vere)



Normale, periodica, voce fonata pulita.

Filtro vocale
(formanti)



Estremamente selettivo: una formante del tratto vocale stretta viene allineata su un'armonica.

Spettro risultante
(esempio)



Una singola armonica emerge nettamente (armonica percettivamente isolata), le altre sono fortemente attenuate.

Suono percepito



Nota "acuta" sopra la fondamentale, suono armonico e focalizzato.

Scopo principale



Selezionare e far emergere una specifica armonica (melodia sopra la fondamentale).

USO DELLE CORDE FALSE (distorsione della sorgente)

Agisce soprattutto sulla **SORGENTE** (pieghe vestibolari)



Modificata: irregolare, con componente di rumore.



Non mirato alla selezione: il filtro non è configurato per esaltare una specifica armonica.



Spettro più ricco di rumore, può contenere rumore e subarmoniche.



Suono più ruvido, graffiato, potente, con distorsione e aperiodicità.



Aumentare densità, potenza e aggressività timbrica (distorsione della sorgente).



ATTENZIONE

Il canto con overtone richiede allenamento specifico di precisione e ascolto. Non va confuso con l'uso forzato delle corde false, che può causare affaticamento o danni laringei.



IN SINTESI: DUE APPROCCII OPPOSTI

CANTO CON OVERTONE
(Selezione delle armoniche)

Sorgente normale

Filtro formantico altamente selettivo (formante stretta)

Un'armonica specifica viene rinforzata

Armonica percettivamente isolata sopra la fondamentale



USO DELLE CORDE FALSE
(Distorsione della sorgente)

Sorgente modificata (rumore, aperiodicità, subarmoniche)

Filtro vocale non mirato alla selezione

Spettro ricco di rumore e subarmoniche

Suono ruvido, potente, aperiodico



★ IN BREVE: **OVERTONE SINGING = SELEZIONE DELLE ARMONICHE (FILTRO)** / **CORDE FALSE = DISTORSIONE DELLA SORGENTE**

<https://www.youtube.com/watch?v=UHTF1-IhuC0&t=278s>

Formanti e canto: dal timbro vocalico al controllo armonico

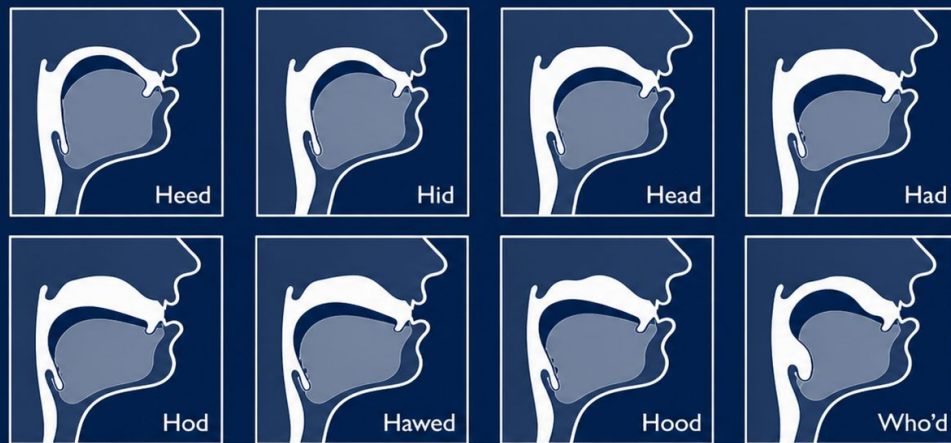
Le vocali → riconoscibili grazie alle formanti = le frequenze di risonanza del tratto vocale, *relativamente indipendenti dall'altezza della voce*. Le formanti determinano il timbro vocalico e permettono di distinguere una vocale anche quando cambia la frequenza fondamentale. **Johan Sundberg** (1936, acustico-musicologo svedese, tra i maggiori studiosi della voce cantata) ha mostrato che nel canto professionale le formanti non rimangono sempre stabili, ma possono essere modificate intenzionalmente per migliorare proiezione, intensità e qualità timbrica.

- Il *singer's formant*. Nei cantanti lirici, specie maschili, compare spesso una formante alta (*singer's formant*, circa 2–4 kHz), che concentra energia in una regione dello spettro poco occupata dall'orchestra, permettendo alla voce di emergere con più intensità e chiarezza.
- Il *formant tuning*. Nelle note molto acute, specie nel canto femminile, le formanti vengono adattate alla fondamentale o a sue armoniche (*formant tuning*). Questo aumenta l'efficienza acustica, il volume sonoro e modifica anche il timbro.

La sintesi al computer della voce mostra che queste modificazioni formantiche sono essenziali per la naturalezza del timbro. Se non vengono introdotte, la voce può risultare meno realistica o assumere caratteristiche percettive diverse.

Nel canto lirico le formanti vengono modificate per aumentare proiezione e intensità; nell'overtone singing questo controllo diventa estremo: una formante viene accordata su una specifica armonica, che emerge chiaramente all'ascolto. Questo mostra che le formanti, oltre a rendere riconoscibili le vocali, nel canto diventano uno strumento tecnico capace di modellare intensità, proiezione, timbro e selezione armonica.

La Figura in alto mostra le configurazioni del tratto vocale, mentre nella Tabella sottostante vediamo le frequenze formanti di alcuni *suoni vocalici* presenti nella lingua inglese.



	Heed	Hid	Head	Had	Hod	Hawed	Hood	Who'd	Hud	Heard
f_1	270	390	530	660	730	570	440	300	640	490
f_2	2290	1990	1840	1720	1090	840	1020	870	1190	1350
f_3	3010	2550	2480	2410	2440	2410	2240	2240	2390	1690

Frequenza delle formanti nelle vocali di alcuni suoni vocalici inglesi.

Le **vocali** dei suoni heed, hid, head e had → vocali frontali, perché il punto più elevato della lingua si trova nella parte anteriore della cavità orale.

Le **vocali** di hod, hawed, hood e who'd → vocali arretrate, perché il punto più elevato della lingua si trova nella parte posteriore della cavità orale.

Le **vocali** di heed e who'd, in cui la lingua raggiunge la posizione più alta → alte o chiuse.

Le **vocali** di had e hod, in cui la lingua è nella posizione più bassa → basse o aperte.

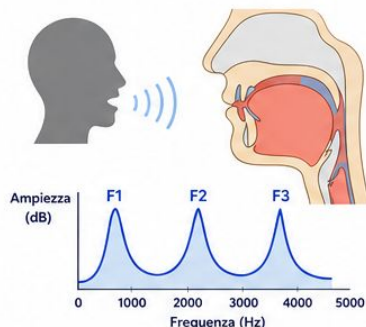
Timbro → le vocali frontali tendono ad avere frequenze formantiche più alte e un suono tendenzialmente percepito come più chiaro e brillante; le vocali arretrate tendono ad avere frequenze formantiche più basse e un suono tendenzialmente percepito come più scuro e cupo.

LE VOCALI TRA SPETTRO E TEMPO

La percezione dinamica dei suoni vocalici

1 LO SPETTRO FORMANTICO

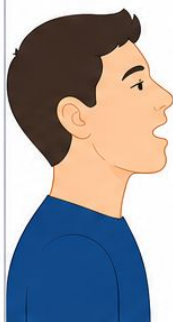
Ogni vocale ha una "firma" spettrale determinata dalle formanti (F1, F2, F3...).



Esempio: vocale /a/ ("ah")
(i picchi rappresentano le formanti)

2 PROVATE A PRONUNCIARE UNA "AH" PROLUNGATA

Senza vibrato, senza variazioni di altezza e intensità.



AAAAAH.....

Dopo alcuni secondi, il suono perde la sua qualità caratteristica di "ah" e diventa percettivamente più neutro, meno espressivo.

3 PERCHÉ ACCADE?

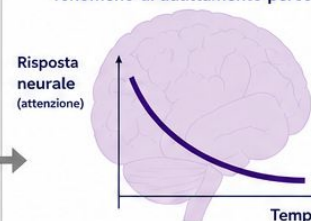
Il nostro sistema percettivo è particolarmente sensibile ai cambiamenti:

- Attacco (l'inizio del suono)
- Microvariazioni (naturali e continue)
- Inflessioni timbriche (variazioni delle formanti)
- Variazioni dinamiche (intensità)

Tutti questi elementi contribuiscono al riconoscimento e alla vitalità del suono.

4 ADATTAMENTO PERCETTIVO (ANALOGO ALLA SATURAZIONE SEMANTICA)

Quando lo stimolo resta invariato troppo a lungo, si produce un fenomeno di adattamento percettivo.

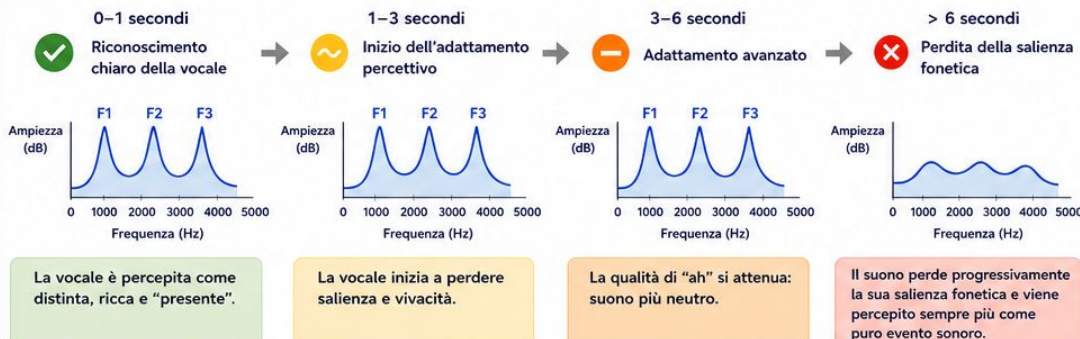


Il sistema nervoso riduce progressivamente la risposta allo stimolo costante.

SATURAZIONE SEMANTICA (come analogia)

Se ripetiamo in continuazione la stessa parola o lo stesso suono, la percepiamo come privo di significato. Il significato è veicolato con la prima emissione e non viene rinforzato indefinitamente con la ripetizione: siamo saturati.

COSA SUCCEDDE NEL TEMPO QUANDO PROLUNGHIAMO UNA VOCALE INVARIATA



CONCLUSIONE

Per riconoscere e percepire una vocale non conta solo lo spettro (le formanti), ma anche la dimensione temporale del suono.



SPETTRO

La "identità" della vocale (le formanti)



TEMPO

La "vita" della vocale (dinamica, variazioni, cambiamenti)



PERCEZIONE DELLA VOCALE

Dinamica, adattiva, sensibile ai cambiamenti.



IDEA CHIAVE: Il nostro sistema percettivo è fatto per cogliere i cambiamenti. Quando lo stimolo resta invariato troppo a lungo, intervengono adattamento percettivo e saturazione semantica (come analogia).



LA DIMENSIONE TEMPORALE DEL TIMBRO

Il timbro non è statico: è un fenomeno **dinamico** che si sviluppa nel tempo. Noi percepiamo l'attacco e le fasi iniziali di un suono in modo diverso rispetto alle sue fasi successive. **Variazioni** di intensità, vibrato, attacco e decadimento contribuiscono in modo essenziale alla qualità percettiva del suono.

In un contesto musicale, note successive non sono mai identiche, ma presentano **microvariazioni** timbriche.

1. LA STRUTTURA TEMPORALE DI UNA NOTA

- Ogni suono ha un inviluppo di ampiezza (intensità) che varia nel tempo.
- Le sue caratteristiche cambiano nelle diverse fasi.



ASPETTI CHE INFLUENZANO IL TIMBRO

- Attacco (transiente iniziale)
- Andamento delle intensità (inviluppo)
- Vibrato e microfluttuazioni di frequenza
- Decadimento ed estinzione
- Contenuto spettrale e sua evoluzione
- Microvariazioni tra note successive

PERCEZIONE

- L'orecchio e il sistema uditivo sono molto sensibili ai cambiamenti nel tempo.
- I transienti iniziali forniscono molte informazioni per riconoscere la sorgente sonora.

2. GLI STUDI DI JEAN-CLAUDE RISSET (1938–2016) AI BELL LABS (1966, 1969)

ANALISI DEI SUONI REALI

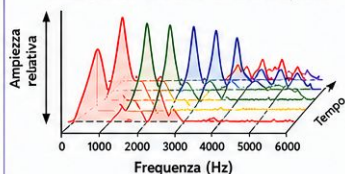
Risset analizzò con il computer brevi suoni di tromba eseguiti da musicisti professionisti.



Furono esaminati in dettaglio: il transiente d'attacco, la fase centrale, il decadimento e l'evoluzione delle parziali.

COSA MOSTRARONO LE ANALISI

Il suono di tromba è estremamente complesso.



SINTESI AL COMPUTER

Risset sintetizzò i suoni ricostruendo le parziali con il computer e modificando selettivamente alcune caratteristiche.



TEST PERCETTIVI

Musicisti (anche trombettisti professionisti) ascoltarono i suoni sintetizzati e li confrontarono con quelli reali.



RISULTATO

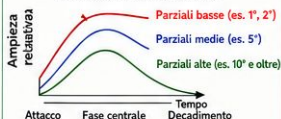
Quando la sintesi teneva conto degli aspetti essenziali, i musicisti avevano grande difficoltà a distinguere il suono reale da quello sintetico.



3. CHE COSA È IMPORTANTE E CHE COSA NON LO È (RISSET)

INVILUPPO DELLE PARZIALI

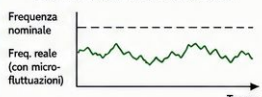
Le parziali superiori tendono a raggiungere la massima intensità nella fase centrale, mentre durante attacco ed estinzione risultano relativamente meno intense.



MICROFLUTTUAZIONI IRREGOLARI DI FREQUENZA

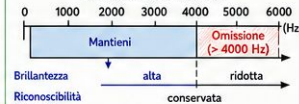
Piccole irregolarità (microinstabilità) nelle frequenze delle parziali sono necessarie per ottenere suoni realistici e "vivi".

Esempio su una parziale (ingrandita):



COMPONENTI FREQUENZIALI ALTE (FINO A CIRCA 4000 Hz)

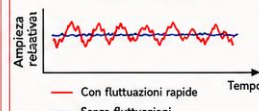
Contribuiscono alla brillantezza del suono. La loro eliminazione (> ~4000 Hz) riduce la brillantezza, ma non compromette significativamente il riconoscimento come suono di tromba.



ASPETTI PERCETTIVAMENTE MENO RILEVANTI

FLUTTUAZIONI MOLTO BREVI DELLE AMPIEZZE

Le rapide fluttuazioni casuali delle ampiezze delle parziali hanno un ruolo secondario nel riconoscimento timbrico.



IMPULSI DI RUMORE ALL'ATTACCO

Gli impulsi di rumore presenti all'inizio del suono di tromba hanno un ruolo secondario nel riconoscimento timbrico.



4. IN SINTESI

Il timbro è un processo temporale, non una istantanea.



Il sistema uditivo estrae informazioni soprattutto dalle variazioni temporali del suono.



L'evoluzione delle intensità delle parziali e le microfluttuazioni di frequenza sono cruciali.



La brillantezza dipende anche dalle alte frequenze, ma non è l'unico fattore.



La sintesi che riproduce gli aspetti essenziali può risultare indistinguibile dal suono reale.



Jean-Claude Risset (1938–2016) → figura centrale nella nascita della computer music e della ricerca sul timbro. Compositore e ricercatore, formatosi in fisica e attivo ai Bell Labs con Max Mathews, ha unito rigore scientifico e invenzione musicale, mostrando attraverso l'analisi e la sintesi sonora come il timbro dipenda dall'evoluzione temporale del suono e non solo dalla sua struttura spettrale.

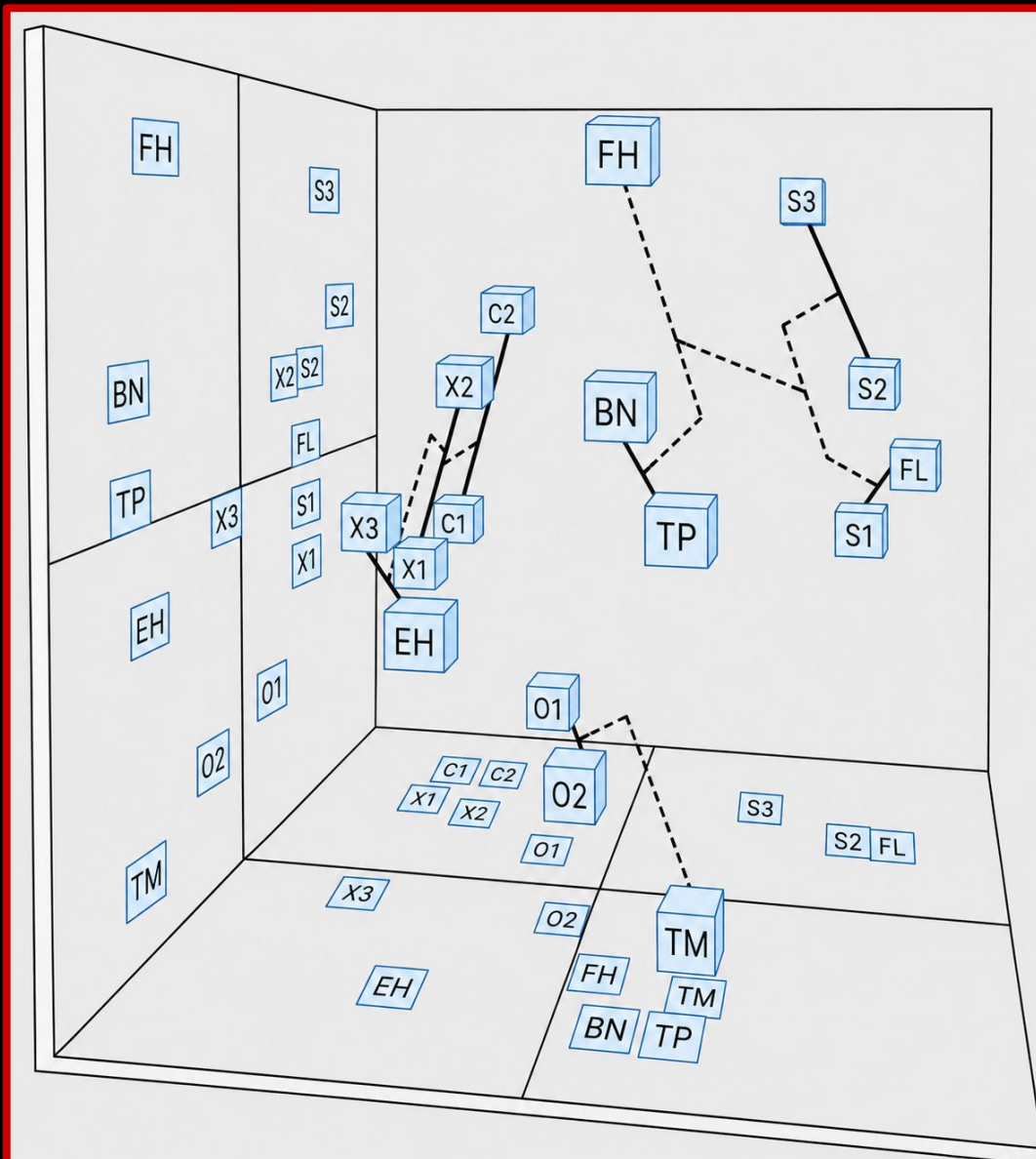
John M. Grey (Stanford): analisi percettiva del timbro

John Michael Grey → Ricercatore americano attivo presso il *Center for Computer Research in Music and Acoustic* della **Stanford University**, è stato uno dei pionieri della psicoacustica del timbro e dell'analisi/sintesi sonora. Ha usato il computer per analizzare e sintetizzare i suoni di diversi strumenti musicali.

Il suo contributo più importante è la costruzione del *timbre space* (*spazio percettivo del timbro*) → Gray ha dimostrato sperimentalmente che il timbro può essere rappresentato come uno spazio multidimensionale, in cui la distanza tra i suoni corrisponde alla loro somiglianza percettiva.

- Obiettivo della ricerca di Gray → individuare quali caratteristiche acustiche del suono siano davvero essenziali per il riconoscimento timbrico, e quali possano essere eliminate senza che l'ascoltatore se ne accorga.
- Risultato principale → Grey è riuscito a sintetizzare suoni artificiali percettivamente indistinguibili da quelli reali.
- Metodo sperimentale → Grey ha fatto ascoltare a musicisti esperti coppie di suoni chiedendo di valutare il loro grado di somiglianza in base a certe scale di valutazione.

Da questi dati Gray ha costituito uno *spazio tridimensionale del timbro*.



La rappresentazione tridimensionale delle somiglianze e delle differenze fra i suoni di vari strumenti. Basata su stime numeriche di somiglianza ottenute confrontando coppie di suoni. I quadrati sulle pareti sono le proiezioni bidimensionali dei cubi e mostrano così le loro posizioni relative.

Le abbreviazioni sono:
 01, 02, oboi;
 C1, C2, clarinetti;
 X1, X2, X3, sassofono,
 EH, corno inglese;
 FH, corno;
 S1, S2, S3, archi;
 TP, tromba; TM, trombone;
 FL, flauto;
 BN, fagotto.

Le tre grandi famiglie nello spazio timbrico

Ogni cubo → uno strumento.

La distanza tra i cubi → grado di somiglianza timbrica.

Più due strumenti sono vicini, più il loro timbro è percepito come simile.

Gray ha individuato 3 grandi famiglie timbriche.

Famiglia ance / legni ad ancia
(gruppo molto compatto).

Clarinetto in Mi $\flat$ (C1),
Sassofono soprano *mf* (X1),
Sassofono soprano *f* (X3),
Clarinetto basso (C2),
Sassofono soprano *p* (X2),
Corno inglese (EH).

Caratteristica comune:
forte affinità spettrale e
timbrica

Famiglia intermedia.

Oboe (O1),
Trombone con sordina (TM).

Caratteristica:
posizione isolata, timbro
specifico.

Famiglia ottoni–archi–fiati.

Fagotto (BN),
Corno (FH),
Violoncello sul ponticello (S1),
Violoncello normale (S2),
Tromba (TP),
Flauto (FL),
Violoncello sul tasto (S3).

Caratteristica: maggiore: varietà
interna,
ma forte parentela timbrica.

Interpretazione *fisica* dello spazio timbrico

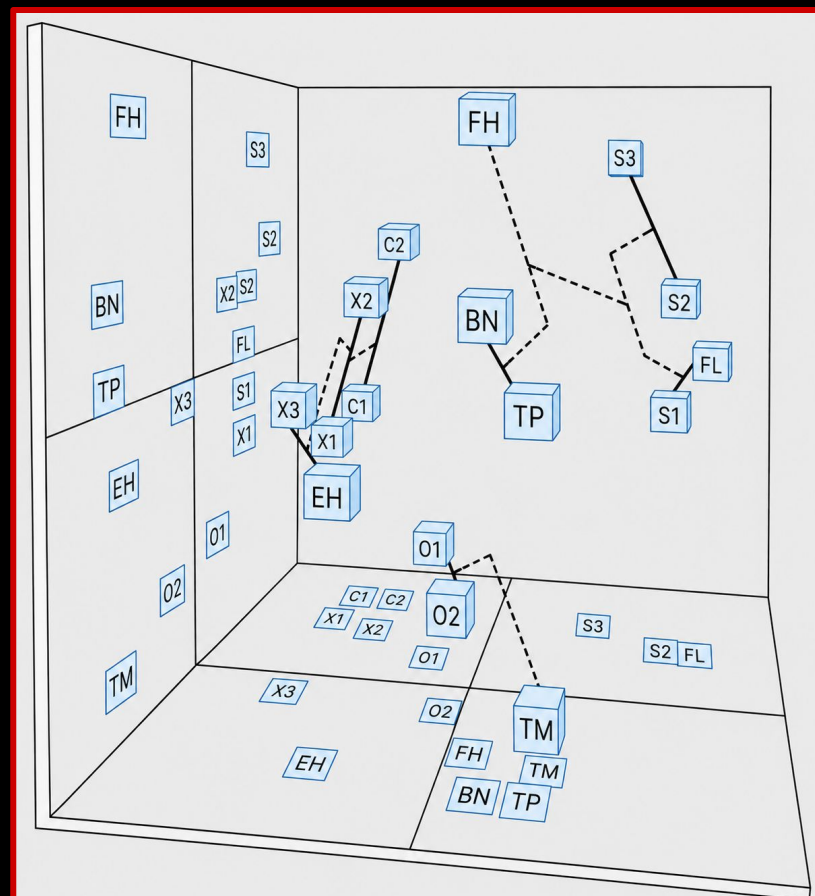
Grey cercò di individuare quali caratteristiche fisiche del suono determinassero le somiglianze percettive tra gli strumenti.

Risultato → la distanza verticale nello spazio timbrico può essere interpretata in termini di *distribuzione spettrale dell'energia*.

Parte alta dello spazio (FH, S3).
spettro stretto;
picco energetico su frequenze basse.
Timbro più scuro e compatto.

Parte bassa dello spazio (TM).
spettro largo;
picco energetico su frequenze alte.
Timbro più brillante e aperto.

Posizione intermedia (TP, X1).
caratteristiche spettrali intermedie.
Timbro misto/intermedio.



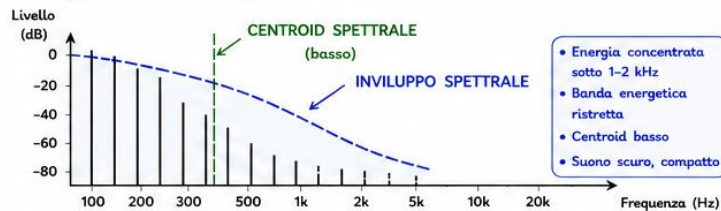
SPETTRO STRETTO vs SPETTRO LARGO

Differenza di distribuzione energetica nello spettro e percezione timbrica

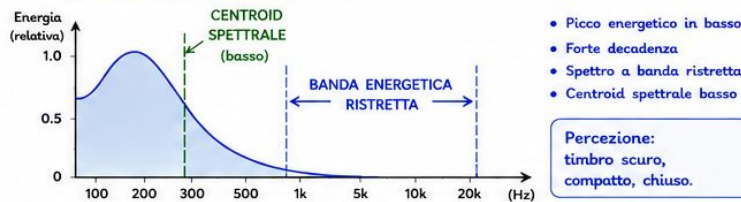
SPETTRO STRETTO

Distribuzione energetica concentrata in una banda di frequenze relativamente ristretta.
L'energia è concentrata soprattutto alle basse e medie frequenze;
gli armonici alti sono deboli o assenti; l'involuppo spettrale decade rapidamente.
Risultato percettivo: **timbro più scuro, compatto, chiuso, meno brillante.**

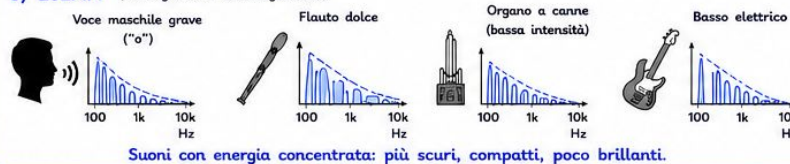
1) SPETTRO ARMONICO (esempio con fondamentale = 100 Hz)



2) DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA (involuppo spettrale continuo)



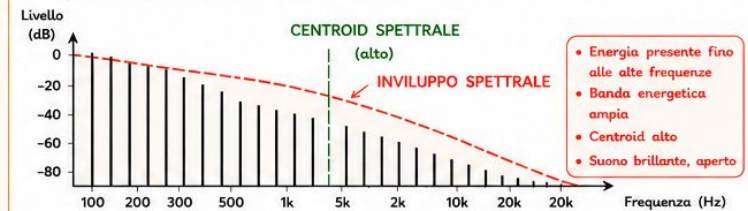
3) ESEMPI (stessi grafici in scala logaritmica)



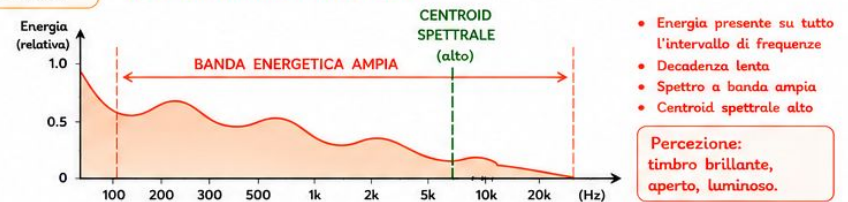
SPETTRO LARGO

Distribuzione energetica dispersa su un intervallo ampio di frequenze.
L'energia è presente anche alle alte frequenze; l'involuppo spettrale decade lentamente.
Risultato percettivo: **timbro più brillante, aperto, ricco, luminoso.**

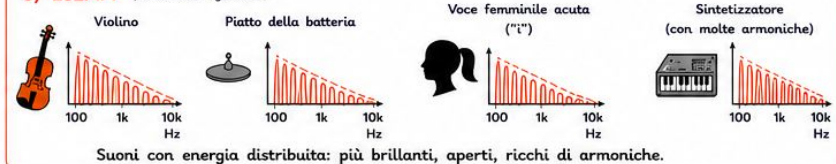
1) SPETTRO ARMONICO (esempio con fondamentale = 100 Hz)



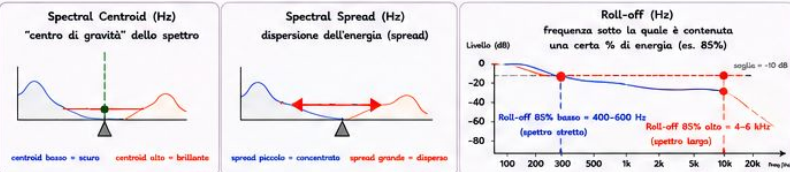
2) DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA (involuppo spettrale continuo)



3) ESEMPI (stessa scala logaritmica)



MISURE OGGETTIVE UTILIZZATE IN AUSTICA



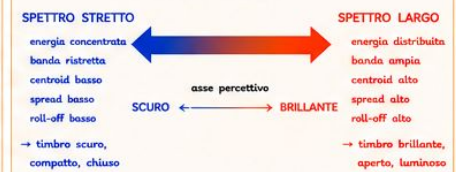
Il roll-off è la frequenza al di sotto della quale è contenuta l'85% (oppure un'altra % scelta) dell'energia totale.
• Roll-off basso → energia concentrata nelle basse frequenze.
• Roll-off alto → energia estesa fino alle alte frequenze.

METAFORA MUSICALE

Immagina una folla distribuita in una sala.



SINTESI PERCETTIVA



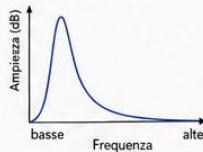
1) Nota: tutti gli esempi hanno la stessa fondamentale (100 Hz). Le differenze udite dipendono dalla distribuzione dell'energia nello spettro e non dall'altezza.

I FATTORI FISICI CHE DETERMINANO IL TIMBRO

ASSE VERTICALE: DISTRIBUZIONE SPETTRALE DELL'ENERGIA (centroide spettrale)

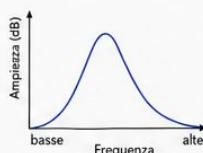
IN ALTO

- energia concentrata nelle basse frequenze
- centroide spettrale basso
- timbro più scuro / morbido



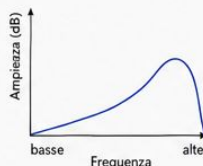
REGIONE INTERMEDIA

- distribuzione intermedia dell'energia
- centroide spettrale intermedio
- timbro misto / intermedio

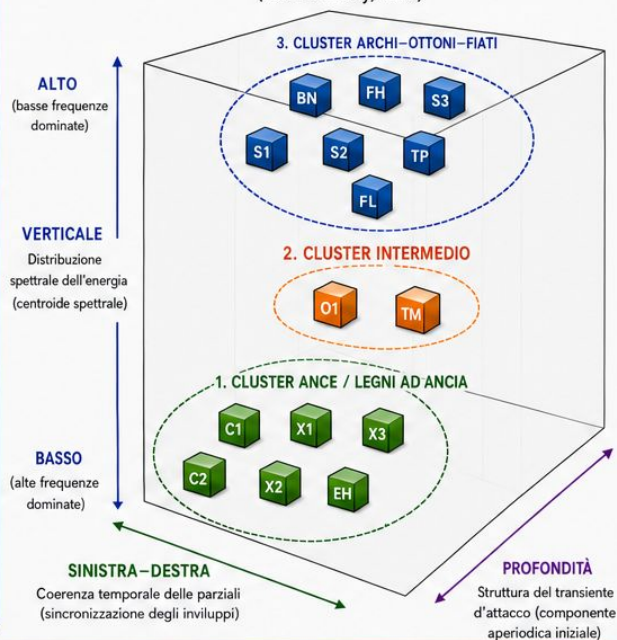


IN BASSO

- energia distribuita verso frequenze più alte
- centroide spettrale alto
- timbro più brillante / duro



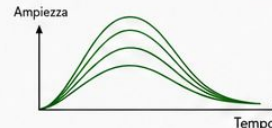
SPAZIO TRIDIMENSIONALE DEL TIMBRO (John M. Grey, 1977)



ASSE SINISTRA-DESTRA: COERENZA TEMPORALE DELLE PARZIALI (sincronizzazione / microdinamica degli inviluppi di ampiezza)

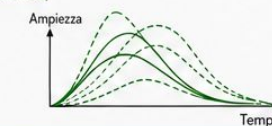
SINISTRA (LEGNI AD ANCIA)

- Involuppi temporali sincronizzati (parziali crescono e decadono con tempi simili).
- andamento omogeneo.



DESTRA (ARCHI, FIATO, OTTONI, FAGOTTO)

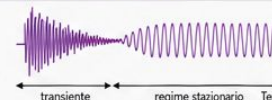
- Involuppi temporali differenziati (parziali crescono e decadono con tempi diversi).
- andamento eterogeneo.



ASSE DELLA PROFONDITÀ: STRUTTURA DEL TRANSIENTE D'ATTACCO

PRESENTE E RILEVANTE (FL, S1, S2, S3)

- Componente rumorosa iniziale ad alta frequenza che precede la fase di regime.



POCO RILEVANTE (TP, TM, BN)

- Attacco pulito: la componente rumorosa è assente o molto debole.



ATTENUATO MA PRESENTE (sintesi archi)

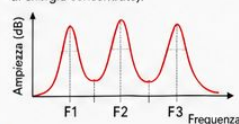
- Componente rumorosa iniziale più lunga → timbro tipico di esecuzione poco esperta.



ALTRI ASPETTI FISICI CHE INFLUENZANO IL TIMBRO

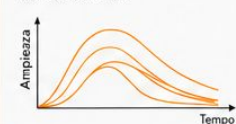
1. FORMANTI (VOCALI)

- L'analisi spettrale permette di distinguere le diverse vocali attraverso le formanti (bande di energia concentrate).



2. ANDAMENTO TEMPORALE DELLE PARZIALI (OTTONI)

- I tempi di crescita e di decadimento delle parziali determinano il carattere timbrico.



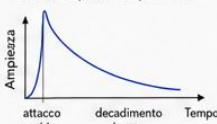
3. COMPONENTE RUMOROSA INIZIALE (ARCHI E FLAUTO)

- Un breve impulso di contenuto spettrale esteso è essenziale per la qualità del timbro.



4. ATTACCO RAPIDO + DECADIMENTO LENTO (CORDE PIZZICATE/PERCOSSE)

- Produce l'effetto caratteristico delle corde pizzicate o percosse.



FAMIGLIE STRUMENTALI NELLO SPAZIO DI GREY

1. CLUSTER ANCE / (LEGNI AD ANCIA)

- C1 Clarinetto in Mib
- X1 Sassofono soprano mf
- X3 Sassofono soprano f
- C2 Clarinetto basso
- X2 Sassofono soprano p
- EH Corno inglese

2. CLUSTER INTERMEDIO

- O1 Oboe
- TM Trombone con sordina

3. CLUSTER ARCHI-OTTONI-FIATI

- BN Fagotto
- FH Corno
- S1 Violoncello sul ponticello
- S2 Violoncello normale
- TP Tromba
- FL Flauto
- S3 Violoncello sul tasto

IDEA CHIAVE

- Il timbro emerge dall'interazione di tre dimensioni fondamentali:
- 1) struttura spettrale, 2) microdinamica delle parziali, 3) struttura del transiente d'attacco.
- Lo spazio percettivo del timbro organizza questi parametri in una struttura tridimensionale.

RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO

- Grey, J. M. (1977). *Multidimensional perceptual scaling of musical timbres*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61(S), 1270-1277.

LEGENDA ASSI (dimensioni del timbro)

- sinistra-destra → coerenza temporale delle parziali (inviluppi)
- verticale → centroide spettrale (distribuzione dell'energia)
- profondità → struttura del transiente d'attacco



PARZIALI DI UNA CAMPANA TUBOLARE

Spettro inarmonico e altezza (fondamentale) percepita

Parziale n	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Frequenza misurata (in unità f)	2.76f	5.40f	8.93f	13.34f	18.64f	31.87f
Rapporto rispetto a 4.5f (≈ frequenza virtuale)	—	1.20 (non armonico)	1.99 ≈ 2 (≈ 2×4.47f)	2.97 ≈ 3 (≈ 3×4.45f)	4.14 ≈ 4 (≈ 4×4.66f)	7.08 ≈ 7 (≈ 7×4.55f)

Nota: f è l'unità di frequenza di riferimento (non coincide con la fondamentale percepita).

Le campane tubolari sono costituite da lunghi tubi metallici fissati liberamente a un'estremità in modo che possano vibrare e flettersi senza le reazioni vincolari dovute a un incastro.

Lo spettro delle campane tubolari è **inarmonico**: le frequenze dei modi normali **non sono multipli interi di una fondamentale fisica**.

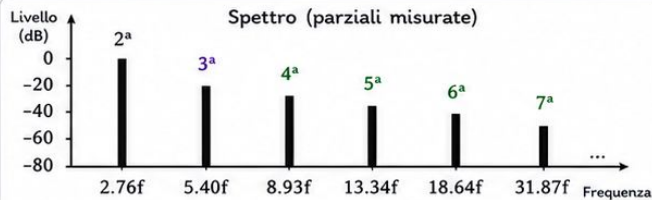
Tuttavia, come si vede in tabella, dalla quarta parziale in poi le frequenze risultano approssimativamente vicine a multipli interi di una **frequenza di circa 4.5f**. Questa frequenza non è realmente presente nello spettro, ma può essere percepita come **altezza fondamentale residua (missing fundamental)**.

COSA SIGNIFICA?

- Non esiste una fondamentale fisica a 4.5f: non è presente una componente spettrale significativa a quella frequenza.
- Alcune parziali (dalla 4^a in poi) sono quasi armoniche rispetto a una frequenza virtuale vicina a 4.5f.
- Il sistema uditivo inferisce questa periodicità implicita e la percepisce come altezza.
- È un esempio di "residue pitch" o "missing fundamental".



Esempio di campana tubolare usata in orchestra



Le ampiezze sono indicative. Nelle campane tubolari l'andamento dei livelli è in genere irregolare e inarmonico.

PERCHÉ PERCEPIAMO 4.5f?

- Le parziali alte (4^a–7^a) si allineano a una periodicità di circa 4.5f.
- Il cervello usa queste relazioni per "ricostruire" una fondamentale mancante.
- La campana quindi ha un' **altezza** percepita, anche senza che quella frequenza sia presente.
- Questo fenomeno è alla base del **pitch virtuale**.

DA RICORDARE

- ✓ La fondamentale percepita (**pitch residuo**) può esistere anche senza componente fisica corrispondente.
- ✓ Questo avviene quando alcune parziali sono **approssimativamente armoniche** rispetto a una stessa frequenza.
- ✓ È un concetto chiave in **acustica** e in **psicoacustica del timbro**.

IN SINTESI

Le campane tubolari hanno uno spettro inarmonico. La quarta, quinta, sesta e setima parziale sono approssimativamente armoniche rispetto a ~4.5f. Questa frequenza non è fisicamente presente, ma viene percepita come fondamentale residua grazie al meccanismo di pitch virtuale del sistema uditivo.

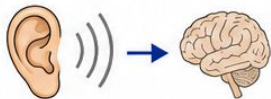
ALTEZZA RESIDUA (FONDAMENTALE VIRTUALE)

L'orecchio percepisce una fondamentale (altezza) anche quando non è fisicamente presente nel suono.

1. CHE COS'È?

Alcuni suoni presentano solo parziali (non necessariamente armonici), senza che sia presente una vera **fondamentale fisica**.

Il sistema uditivo, analizzando le relazioni tra le parziali e la loro periodicità complessiva, ricostruisce una **fondamentale virtuale** (altezza residua).



Il cervello interpreta la struttura armonico-temporale del suono e "inventa" la nota più bassa coerente.

2. ESEMPIO CLASSICO: CAMPANE TUBOLARI



Le campane tubolari non producono la fondamentale fisica corrispondente a $4.5 f$ (che è quella percepita). Esse vibrano in modi che generano solo alcune parziali (parziali inarmoniche) specifiche.

In questo esempio, le parziali principali misurate sono:

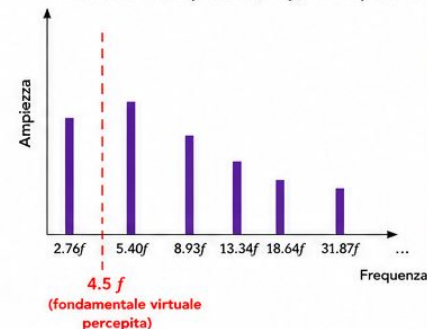
2.76 f
5.40 f
8.93 f
13.34 f
18.64 f
31.87 f

Confronto con i multipli di $4.5 f$

Parziale misurata	Multiplo più vicino di $4.5 f$	Scarto (%)
2.76 f	2.25 f ($= 0.5 \times 4.5 f$)	+22.7%
5.40 f	4.50 f ($= 1 \times 4.5 f$)	+20.0%
8.93 f	9.00 f ($= 2 \times 4.5 f$)	-0.8%
13.34 f	13.50 f ($= 3 \times 4.5 f$)	-1.2%
18.64 f	18.00 f ($= 4 \times 4.5 f$)	+3.6%
31.87 f	31.50 f ($= 7 \times 4.5 f$)	+1.2%

SPETTRO DELLE CAMPANE TUBOLARI

Le barre mostrano le parziali presenti. La fondamentale presente ($4.5 f$) NON è presente.

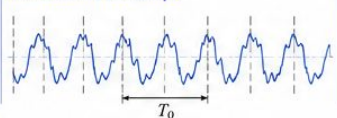


Poiché molte parziali sono vicine ai multipli di $4.5 f$, l'orecchio percepisce una **FONDAMENTALE VIRTUALE = $4.5 f$** anche se non è fisicamente presente.

3. COME L'ORECCHIO RICOSTRUISCE LA FONDAMENTALE VIRTUALE

Le parziali presenti sono coerenti con una periodicità di periodo $T_0 = \frac{1}{f_0}$.

Nel dominio del tempo

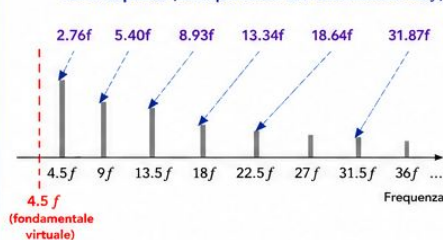


Il segnale risultante ha una forma d'onda che si ripete con periodo T_0 .

Il sistema uditivo interpreta questa periodicità come generata da una fondamentale virtuale $f_0 = 4.5 f$.

$$\text{(Quindi } T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{4.5 f} \text{)}$$

Serie implicita (corrispondente alla fondamentale $4.5 f$)



Il cervello "allinea" le parziali ai multipli più probabili e ricostruisce la fondamentale più bassa compatibile:

$4.5 f$

4. CONSEGUENZA NEL MONDO REALE

Anche se un diffusore (es. piccolo altoparlante) non riproduce le frequenze basse (come $4.5 f$), noi percepiamo comunque quella nota.



Perché accade?

Perché il nostro sistema uditivo non ascolta solo le frequenze isolate, ma ricerca strutture regolari e periodicità coerenti nel tempo.

5. IN SINTESI



Le campane tubolari non producono la fondamentale $4.5 f$.



Le parziali presenti sono vicine ai multipli di $4.5 f$.



Il cervello ricostruisce la periodicità corrispondente a $4.5 f$.



Percepiamo quindi una fondamentale virtuale (altezza residua) = $4.5 f$, anche se non esiste fisicamente nel suono.

Questo fenomeno si chiama **ALTEZZA RESIDUA** (o **FONDAMENTALE VIRTUALE**).



IDEE CHIAVE

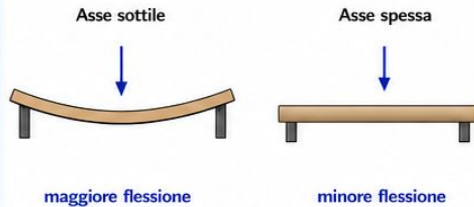
- L'altezza percepita dipende dalla struttura armonica (o inarmonica) e dalla periodicità del segnale, non solo dalla frequenza più bassa presente.
- Il nostro udito è un sistema interpretativo, non un semplice misuratore di frequenze.

BATTIMENTI TRA PARZIALI: CAMPANE E GONG

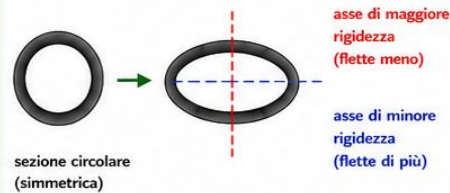
Oscillazioni di ampiezza dovute all'interferenza di frequenze molto vicine

Un'asse sottile si piega più facilmente di un'asse spessa. Immaginate che uno dei tubi che costituiscono le campane non abbia una sezione esattamente circolare, ma leggermente schiacciata; in questo caso si fletterà più facilmente in una direzione che in un'altra.

1. Uno spessore minore si piega più facilmente



2. Tubo leggermente schiacciato: flette più facilmente in una direzione



3. Due successioni di parziali con frequenze leggermente diverse

Successione A (asse di maggiore rigidezza)		n' (ordine)	Successione B (asse di minore rigidezza)	
n	frequenza		frequenza	
1	f_1	1	$f'_1 \approx f_1$	
2	f_2	2	$f'_2 \approx f_2$	
3	f_3	3	$f'_3 \approx f_3$	
4	f_4	4	$f'_4 \approx f_4$	
5	f_5	5	$f'_5 \approx f_5$	
...	...	...	...	

Le parziali delle due successioni sono molto vicine ma non identiche:
 $f'_n \approx f_n$
 ma $f'_n \neq f_n$

4. Battimenti: interferenza tra due parziali molto vicine



La sovrapposizione di due frequenze molto vicine produce un'oscillazione periodica dell'ampiezza percepita: il suono "ondeggia".

La frequenza dei battimenti è:

$$f_b = |f'_n - f_n|$$

(la differenza tra le due frequenze).

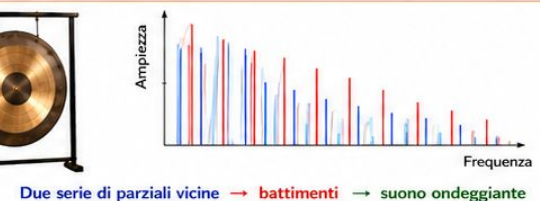
5. Nelle campane...

... questi battimenti non sono ricercati: il suono deve essere il più possibile "puro" e stabile.



6. Nei gong...

... i battimenti sono ricercati: conferiscono al suono il caratteristico "ondeggiamento" ricco e avvolgente.



7. Sintesi digitale dei battimenti (simulazione al computer)

Tali ondeggiamenti sono stati riprodotti con successo al computer per simulare i suoni di gong.



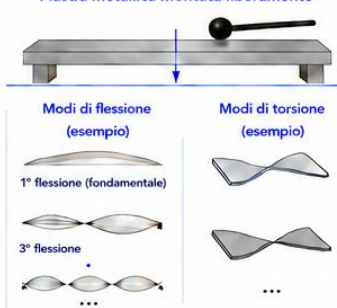
PIASTRE PERCOSSE: CAMPANELLI / GLOCKENSPIEL, MARIMBA, XILOFONO, VIBRAFONO

1. CAMPANELLI / GLOCKENSPIEL



- I campanelli, o il glockenspiel, usati nell'orchestra, producono suoni alti che vengono segnati (nella notazione musicale) due ottave più in basso.
- I campanelli consistono di piastre metalliche montate liberamente che hanno molte parziali, alcune relative alle flessioni, altre alle torsioni.
- Le parziali superiori si smorzano rapidamente dopo che la piastra è percossa, e l'altezza percepita è quella determinata dalla frequenza della prima parziale relativa al moto di flessione.

Piastra metallica montata liberamente



Spettro tipico (ampiezza vs frequenza)



Glockenspiel



2A. MARIMBA

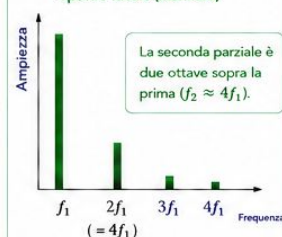


- Usa piastre di legno o di materiale sintetico, più sottili al centro rispetto alle estremità.
- L'assottigliamento al centro della piastra fa sì che la seconda parziale sia due ottave sopra la prima parziale (seconda parziale $\approx 4f_1$).
- Dei risonatori tubolari chiusi piazzati sotto le piastre accentuano l'intensità della prima parziale e fanno sì che si estingua più rapidamente.

Forma tipica della piastra di marimba



Spettro ideale (marimba)



Risonatori tubolari chiusi (sotto la piastra)

Rinforzano f_1 e accelerano lo smorzamento delle altre parziali.

2B. XILOFONO

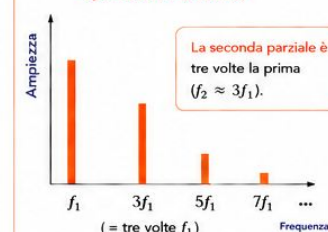


- La piastra è meno assottigliata rispetto alla marimba.
- La frequenza della seconda parziale è tre volte quella della prima parziale (seconda parziale $\approx 3f_1$).
- I tubi chiusi sotto le sbarre risuonano anche a tre volte la frequenza della fondamentale ($3f_1$), cioè alla frequenza della seconda parziale e così rinforzano anche questa componente.
- Lo xilofono possiede un suono più brillante, anche perché è generalmente suonato con bacchette dure (più energia alle alte frequenze), mentre la marimba viene suonata con bacchette morbide.

Forma tipica della piastra di xilofono



Spettro ideale (xilofono)



Risonatori tubolari chiusi (sotto la piastra)



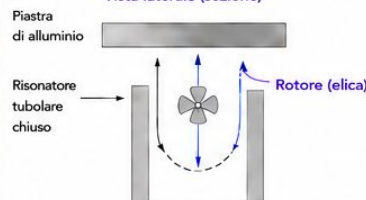
Rinforzano f_1 e anche $3f_1$ (seconda parziale), contribuendo alla brillantezza del suono.

3. VIBRAFONO



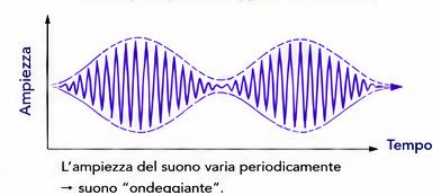
- Ha piastre d'alluminio foggiate come quelle della marimba.
- Le vibrazioni di queste piastre persistono più a lungo.
- Delle eliche (rotori), azionate da un motore elettrico, piazzate fra i risonatori e le piastre, continuano ad aprire e chiudere il passaggio fra le piastre e i risonatori: ciò dà al suono del vibrafono un certo ondeggiamento.

Vista laterale (sezione)



Il rotore modula il collegamento acustico tra piastra e risonatore: quando il passaggio si apre, l'energia passa nel risonatore; quando si chiude, si riduce.

Effetto percepito: ondeggiamento (tremolo)



I TIMPANI: PERCHÉ PRODUCONO UNA PERCEZIONE STABILE DI ALTEZZA?

Il suono del timpano e degli strumenti a percussione

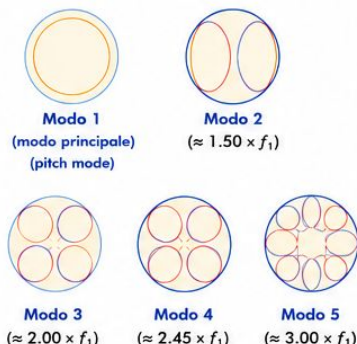
1 IL TIMPANO: MOLTE PARZIALI, PERCEZIONE STABILE DI ALTEZZA

Il timpano produce un suono composto da numerose parziali associate ai diversi modi di vibrazione della membrana.

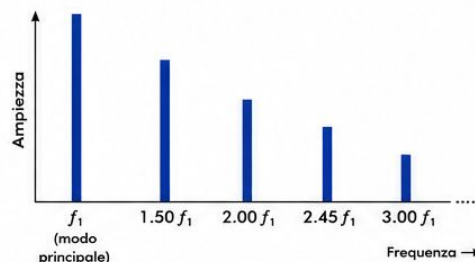


A differenza delle corde vibranti, le parziali del timpano non formano una serie armonica perfetta.

Modi di vibrazione della membrana (del timpano)



Spettro tipico di un timpano (esempio)



Alcune parziali basse si dispongono in rapporti quasi semplici rispetto al pitch mode (circa $1 : 1.50 : 2.00 : 2.45 : 3.00$).
La predominanza del modo principale e il transiente d'attacco permettono una percezione chiara e stabile dell'altezza.

PERCHÉ PERCEPIAMO UN'ALTEZZA STABILE?



Predominanza energetica del modo principale (f_1).



Rapporti quasi regolari tra le parziali principali.



Transiente d'attacco che enfatizza il modo principale.



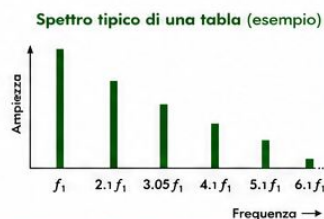
Il sistema uditivo integra le informazioni spettrali e temporali ricostruendo l'altezza corrispondente a f_1 .



Risultato: percezione di un'altezza stabile e ben definita.

2 TAMBURI INDIANI (ES. TABLA): PARZIALI QUASI ARMONICHE

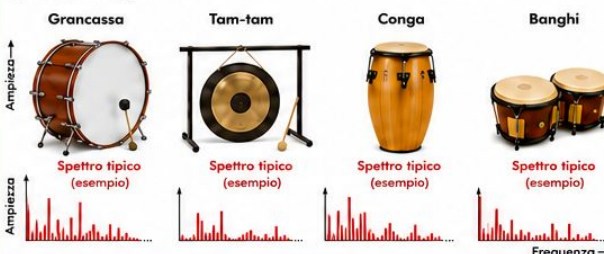
La membrana è resa volutamente non uniforme (carico centrale "syahi") per ottenere parziali ancora più vicine a una struttura armonica.



Le parziali sono molto vicine ai multipli interi (leggermente scostate ma regolari): questo conferisce un'altezza molto definita e stabile. Questi strumenti sono adatti per l'esecuzione melodica.

3 ALTRI STRUMENTI A PERCUSSIONE: SPETTRI MENO REGOLARI

Strumenti come grancassa, tam-tam, conga e bonghi producono spettri meno regolari.



Le parziali non seguono rapporti regolari → percezione di un'altezza meno stabile o meno definita.
Questi strumenti non sono adatti a eseguire melodie temperate.

IN SINTESI



I timpani hanno un'altezza definita grazie a parziali con rapporti approssimativamente regolari e alla dominanza del modo principale.



I tamburi indiani hanno parziali molto vicine a una struttura quasi armonica grazie alla membrana non uniforme.



Altri strumenti a percussione hanno spettri meno regolari e generano una percezione di altezza meno stabile o meno definita, risultando inadatti all'esecuzione melodica.



IDEA CHIAVE

L'altezza percepita non dipende solo dalla frequenza più bassa presente, ma dalla struttura spettrale complessiva e dalla dinamica del suono: il sistema uditivo integra le informazioni nel tempo.



L'UDITO NON RICEVE SOLTANTO FREQUENZE: ORGANIZZA STRUTTURE.