

Acustica

Lezione 4

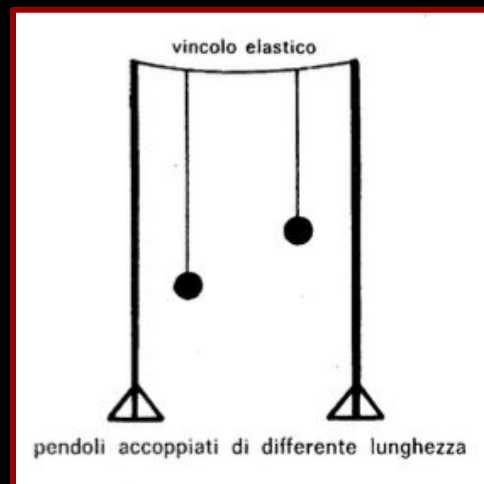
La risonanza

Luigi Manfrin

Introduzione al fenomeno della *risonanza*

Per introdurre il fenomeno della risonanza, si può partire dal modello delle *oscillazioni forzate*: un sistema oscillante (forzante) può trasferire energia a un secondo sistema elastico → *effetto di trascinamento* (un sistema mette in moto un altro inizialmente fermo). L'efficacia del trasferimento dipende da condizioni precise → è massima quando le frequenze proprie sono uguali o molto vicine.

Proponiamo a titolo di esempio - quale *modello analogico* - il *sistema* formato da due pendoli accoppiati mediante un vincolo elastico: i due pendoli hanno lunghezze leggermente diverse e quindi frequenze non identiche; il vincolo (filo o molla) consente lo scambio di energia tra i sistemi. Se uno dei pendoli viene messo in oscillazione, il moto si trasferisce progressivamente all'altro, mentre il primo rallenta.



Dal modello dei pendoli alla risonanza acustica

Il sistema dei pendoli accoppiati ha fornito un modello ideale della risonanza: quando le frequenze proprie sono diverse ma prossime, il trasferimento di energia è parziale (scambio forzato); se coincidono, il trasferimento diventa completo e periodico.

Il modello evidenzia:

1. *trasferimento di energia;*
2. *accoppiamento dei modi di oscillazione;*
3. *risonanza non perfetta.*

→ La risonanza dipende dalla prossimità tra le frequenze: quanto più sono vicine, tanto più efficiente è il trasferimento energetico.

→ Nei sistemi acustici, i corpi elastici (colonne d'aria, membrane, corde) sono messi in vibrazione da una eccitazione esterna e rispondono in modo selettivo, amplificando le frequenze vicine a quelle naturali. Es. Un esecutore di flauto produce una nota determinata regolando il soffio e l'imboccatura, il getto d'aria genera una perturbazione complessa, *ma la colonna d'aria nel tubo risponde selezionando e amplificando solo le frequenze compatibili con le proprie condizioni di risonanza* (lunghezza del tubo e configurazione dei fori). In questo senso si parla di risonanza: il sistema non vibra a tutte le frequenze presenti nell'eccitazione, ma privilegia quelle vicine alle proprie frequenze naturali, stabilizzando così l'altezza percepita della nota.

NEI FENOMENI ACUSTICI, LE OSCILLAZIONI SONO SPESSO PRODOTTE DA UN FORZAMENTO ESTERNO E NON DA UNA VIBRAZIONE LIBERA

Il sistema non oscilla liberamente in isolamento, ma è continuamente sollecitato dall'esterno. La risposta dipende sia dalla frequenza del forzamento sia dalle proprietà fisiche del sistema.

1. L'ARIA VIBRA IN RISPOSTA ALLE SORGENTI SONORE

ESEMPIO: DIAPASON – ARIA COME MEZZO DI PROPAGAZIONE (non risonanza dell'aria)



Se il diapason smette di vibrare:

- l'onda sonora si attenua rapidamente;
- l'oscillazione non si mantiene autonomamente.

In questo caso l'aria **NON** è in risonanza: è il mezzo elastico che trasmette l'onda sonora. Serve a mostrare cosa significa FORZATURA.

ESEMPIO: CORDA DI VIOLINO – ARIA IN RISONANZA (aria + corpo risonante selezionano certe frequenze)

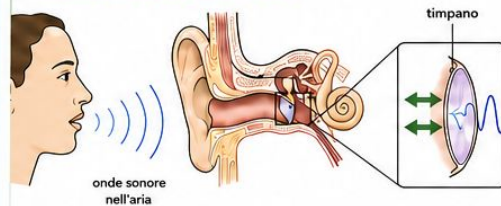


Qui il termine **RISONANZA** è corretto:

lo strumento seleziona e rinforza certe frequenze dell'aria.

2. LA MEMBRANA DEL TIMPANO VIBRA SOTTO L'AZIONE DELLE ONDE ACUSTICHE

ESEMPIO: ASCOLTO DI UNA VOCE



- Le onde di pressione arrivano al timpano.
- Il timpano viene spinto avanti e indietro.
- La membrana vibra seguendo le variazioni di pressione dell'aria.

Il sistema uditivo:

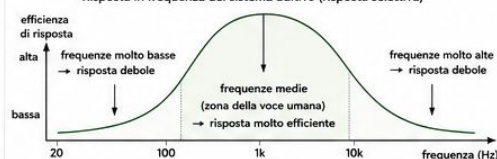
- non vibra liberamente;
- è continuamente forzato dall'onda sonora incidente.

La struttura meccanica dell'orecchio (timpano, ossicini, coclea, membrana basilare) contribuisce alla selettività in frequenza:

- favorisce certe frequenze;
- attenua altre;
- questo contribuisce alla sensibilità uditiva.

ESEMPIO: SUONI MOLTO GRAVI O MOLTO ACUTI

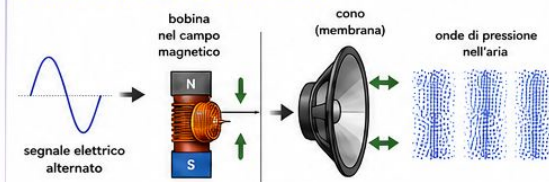
Risposta in frequenza del sistema uditivo (risposta selettiva)



Il sistema uditivo non risponde con la stessa efficienza a tutte le frequenze. Questa è una manifestazione della risposta selettiva del sistema.

3. GLI ALTOPARLANTI FUNZIONANO SECONDO LO STESSO PRINCIPIO

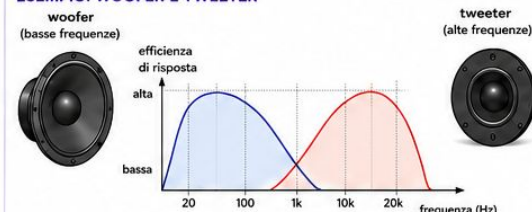
ESEMPIO: CONO DI UN ALTOPARLANTE



Catena di oscillazioni forzate:

segnale elettrico → membrana del diffusore → aria → tutto (il sistema uditivo)

ESEMPIO: WOOFER E TWEETER



- Ogni membrana possiede caratteristiche meccaniche proprie (massa, rigidità, smorzamento) che determinano la risposta in frequenza.
- Il sistema risponde meglio ad alcune frequenze rispetto ad altre.

Anche qui il termine **RISONANZA** è corretto:

il sistema aria + diffusore seleziona e rinforza certe frequenze.



Nel timpano, nel sistema uditivo e negli altoparlanti si possono osservare fenomeni risonanti, perché questi sistemi possiedono frequenze proprie e rispondono in modo selettivo alle sollecitazioni esterne. Tuttavia, la risonanza non ha sempre la stessa funzione:



negli strumenti musicali amplifica e colora il suono;

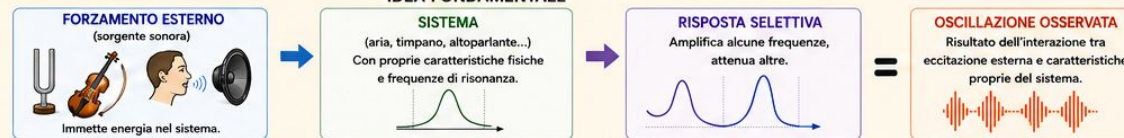


nel sistema uditivo contribuisce all'analisi delle frequenze;



negli altoparlanti deve essere controllata per evitare deformazioni sonore.

IDEA FONDAMENTALE



La risposta non arbitraria: ogni sistema reagisce in modo selettivo, in funzione delle proprie frequenze di risonanza.

MODELLO ANALOGO: PENDOLI ACCOPPIATI



Oscillazioni forzate e risonanza naturale negli strumenti a fiato

Consideriamo uno strumento a fiato (es. corno), accordato su una frequenza naturale (es. $FA_2 \approx 350$ Hz, corrispondente a una sua armonica).

Se il musicista forza l'emissione verso una frequenza leggermente diversa (senza raggiungere l'armonica successiva), la colonna d'aria entra in un regime di oscillazione forzata:

- il suono può crescere in altezza,
- ma risulta debole e di timbro povero o instabile.

→ In questa condizione si manifesta un contrasto tra:

- la forzatura esterna (azione del musicista),
- e la frequenza naturale di risonanza del sistema (colonna d'aria).

Riducendo progressivamente la forzatura e ristabilendo la coerenza con la frequenza naturale:

- il suono si stabilizza,
- l'intensità aumenta,
- il timbro diventa più ricco e pieno.

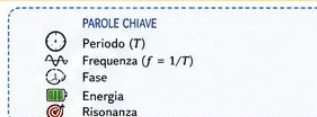
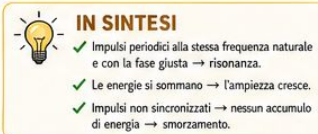
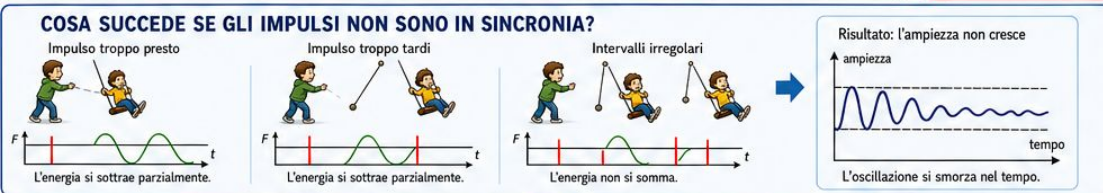
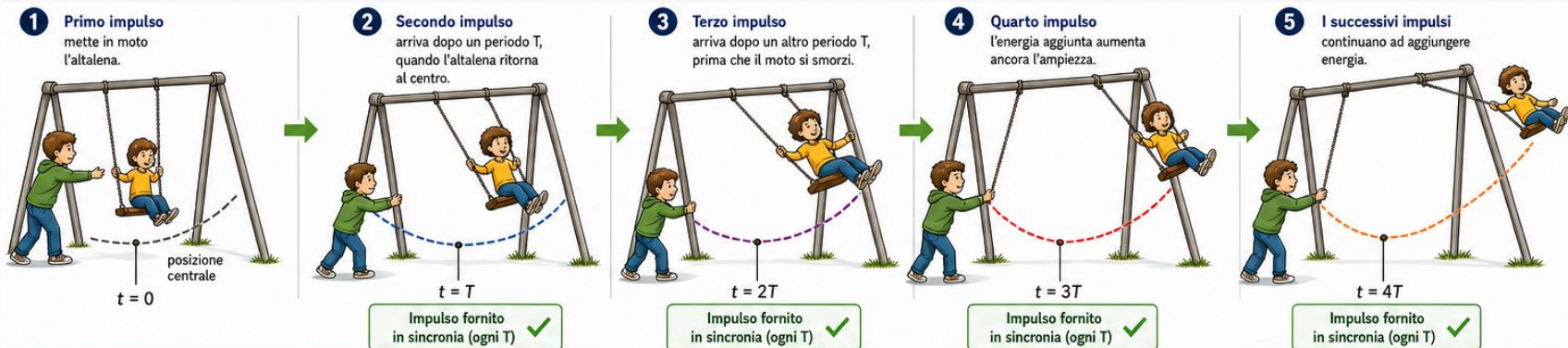
→ Si passa così dal regime di *oscillazione forzata* al regime di *risonanza naturale* della colonna d'aria.

ECCITAZIONE RISONANTE: L'ESEMPIO DELL'ALTALENA

Il moto di un'altalena permette di comprendere il meccanismo della risonanza.



Periodo naturale dell'altalena: T
Intervallo di tempo tra due passaggi successivi nella stessa posizione (es. al centro).



Eccitazione risonante: l'esempio del ponte

Per i fenomeni di risonanza si possono avere degli effetti meccanici rilevanti.

Es. → Un ponte tra una riva e l'altra di un torrente: esso può cadere sotto il passo cadenzato di una fila di persone che lo attraversa. Ogni passo aggiunge un pò di energia: *se il periodo di oscillazione del ponte coincide con la cadenza*, si ha un accumularsi di forza, un conseguente aumento di ampiezza delle oscillazioni e a un certo punto il ponte si rompe.

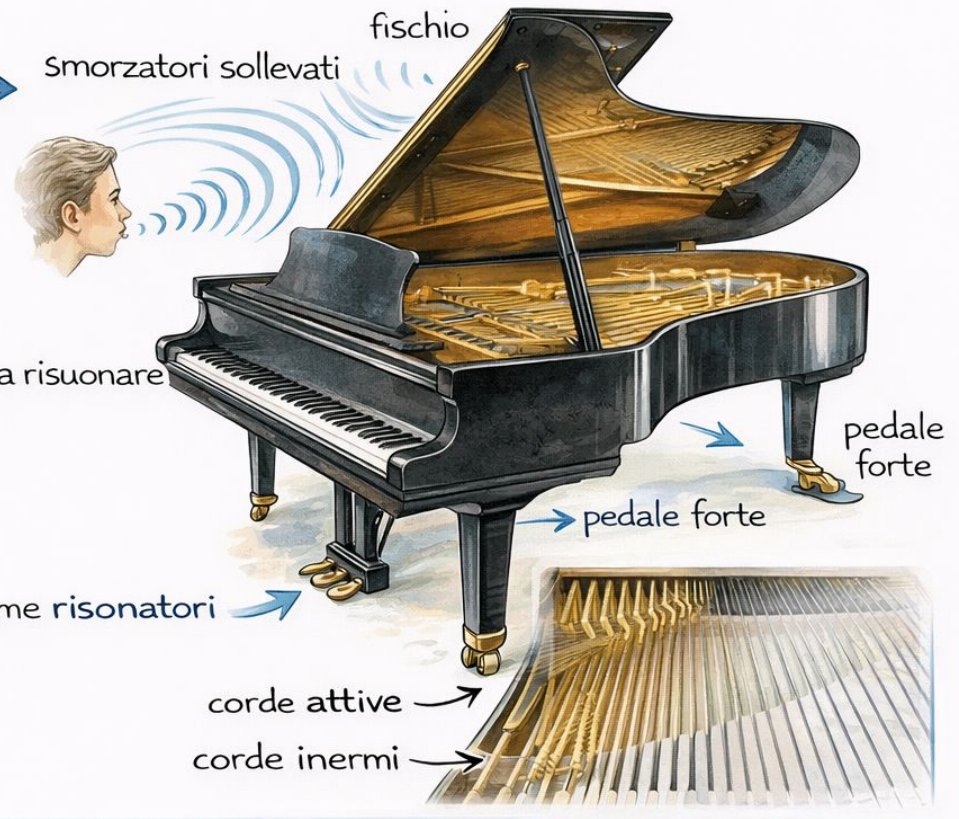
La risonanza della cassa di risonanza della cordiera del pianoforte

Nella pratica musicale sono molti i casi, oltre a quelli degli strumenti a fiato, in cui il fenomeno della risonanza viene sfruttato a favore del risultato acustico:

Es. → Il pianoforte: la cassa di risonanza esalta grandemente la qualità e l'intensità del suono: senza questo sistema, anche il suono emesso da una corda tra quelle che nel pianoforte possono raggiungere intensità sonore veramente notevoli, se viene tesa fra due sostegni in piena aria, emetterà un suono di intensità enormemente minore, senza poi considerare la perdita qualitativa a carico del timbro.

Esperimento: il pianoforte come risonatore

- Procedura
 - Premere il **pedale forte** (sustain) → gli smorzatori si sollevano dalle corde
 - Fischiare vicino alle corde
 - Interrompere il fischio
- Cosa accade
 - Si sente la **nota fischiata** continuare a risuonare → **persistenza del suono**
 - Il suono poi decresce gradualmente
- Spiegazione
 - Le corde del **pianoforte** funzionano come **risonatori**
 - Vibrano solo le corde con frequenza:
 - uguale o vicina al fischio
 - Le altre corde **non vibrano**



Idea chiave:

Il pianoforte seleziona e amplifica solo le frequenze presenti nel suono.

Altri esempi di risonatori

L'arpa (47 corde) usa una cassa armonica di notevole volume.



Altri risonatori → i cilindri cavi sotto i regoli della marimba, del xilofono e di strumenti simili, per aumentare l'intensità del suono e migliorarne la qualità timbrica.

Nota bene.

La risonanza è un fenomeno diverso dalla semplice riflessione del suono o dalla riverberazione.

Un corpo elastico entra in risonanza quando viene eccitato da vibrazioni esterne con frequenza uguale (o vicina) a una sua frequenza naturale di vibrazione.

In queste condizioni il sistema oscilla con grande ampiezza e assorbe energia in modo particolarmente efficiente.

IL RISUONATORE

- Sistema dotato di frequenze proprie (modi normali di vibrazione).
- Immagazzina energia e continua a oscillare anche dopo l'eccitazione.
- Presenta una risposta selettiva in frequenza: rinforza alcune componenti e ne attenua altre.

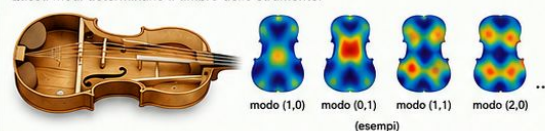
EFFETTO → modifica lo spettro del segnale introducendo risonanze caratteristiche, contribuendo alla formazione del timbro.

COME FUNZIONA



ESEMPIO: IL VIOLINO – LA CASSA ARMONICA (RISUONATORE)

La tavola armonica e la cassa possiedono modi propri che amplificano selettivamente alcune frequenze e attenuano altre. Questi modi determinano il timbro dello strumento.



CARATTERISTICHE CHIAVE



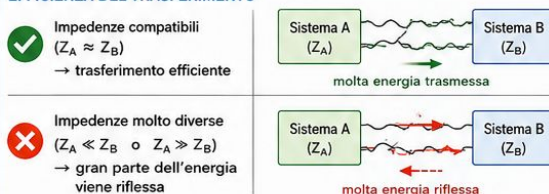
L'ACCOPIATORE

- Elemento che trasferisce energia tra sistemi diversi mettendo in relazione le loro vibrazioni.
- Modifica l'impedenza meccanica, cioè le condizioni di trasferimento energetico tra i sistemi.

IMPEDENZA MECCANICA (Z)

rapporto tra forza (F) e velocità (v): $Z = F/v$

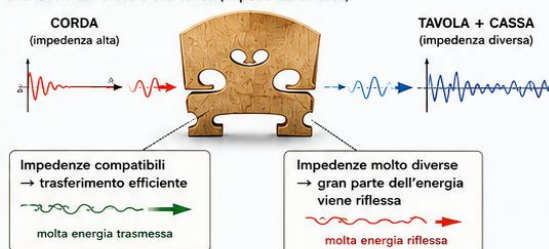
EFFICIENZA DEL TRASFERIMENTO



EFFETTO → trasmissione, redistribuzione e trasformazione dell'energia nel sistema.

ESEMPIO: IL VIOLINO – IL PONTE (ACCOPIATORE)

Il ponte trasferisce l'energia delle corde (alta impedenza) alla tavola armonica e alla cassa (impedenza diversa).



Il ponte non è neutro: ha massa ed elasticità e può avere proprie risonanze. Esempio: risonanza del ponte ("bridge hill") intorno a 2-3 kHz.



CARATTERISTICHE CHIAVE



DIFFERENZA ESSENZIALE



NOTA – LA DISTINZIONE È FUNZIONALE, NON ASSOLUTA

Un accoppiatore possiede massa ed elasticità e può quindi avere proprie risonanze.



Un risuonatore opera sempre in relazione ad altri sistemi e partecipa al trasferimento energetico.



Nella realtà: quasi ogni elemento è sia risuonatore che accoppiatore in misura diversa.

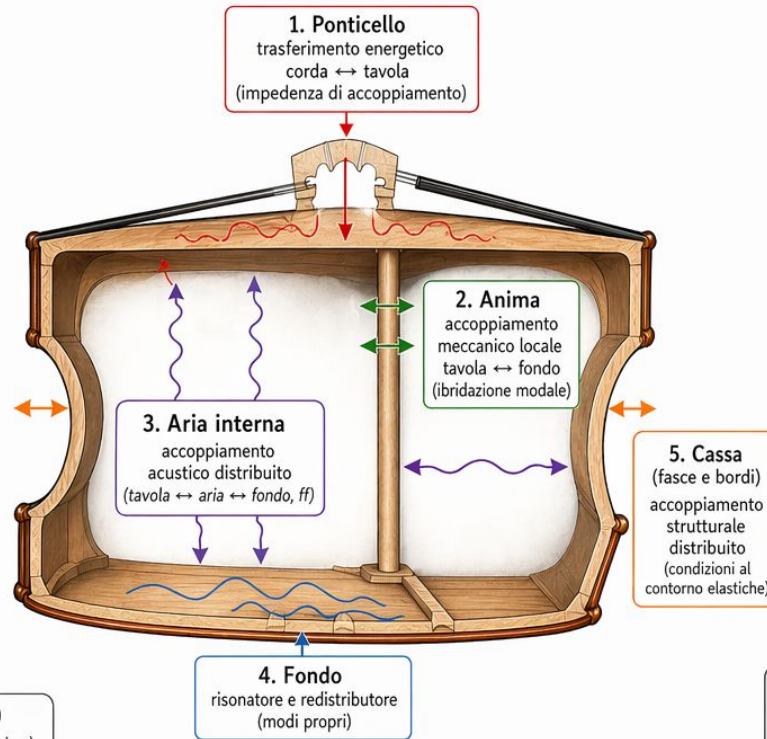
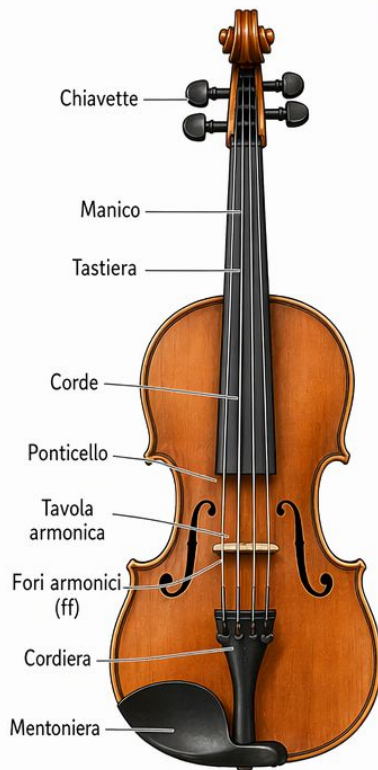


il **risuonatore** riguarda soprattutto la forma del suono;

l'**accoppiatore** riguarda soprattutto la circolazione dell'energia

IL VIOLINO: RETE DI ACCOPPIAMENTI

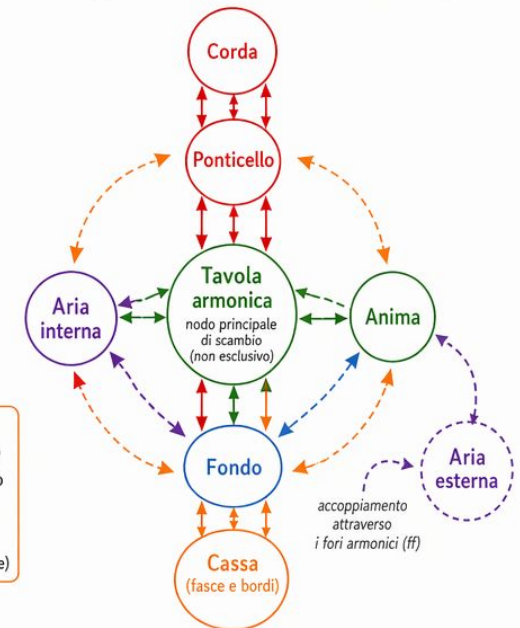
Sistema vibro-acustico distribuito: scambi energetici simultanei e bidirezionali



- ↔ Trasferimento principale corda ↔ tavola (ponticello)
- ↔ Accoppiamento meccanico locale tavola ↔ fondo (anima)
- ↔ Accoppiamento acustico (campo d'aria interno)
- ↔ Accoppiamento strutturale distribuito (cassa)
- ↔ Modi propri: risonatori e selezione dinamica dell'energia

L'ENERGIA NON SEGUE UN PERCORSO LINEARE, MA SI DISTRIBUISCE IN UNA RETE DI SCAMBI SIMULTANEI E BIDIREZIONALI, VENENDO CONTINUAMENTE RIDISTRIBUITA E SELEZIONATA DAI MODI PROPRI DEL SISTEMA.

RETE DI ACCOPPIAMENTI (scambi energetici simultanei e bidirezionali)



- Trasferimento principale (eccitazione / ingresso di energia)
- Accoppiamento meccanico locale (vincoli interni)
- Accoppiamento acustico (campo d'aria)
- Accoppiamento strutturale distribuito (condizioni al contorno)
- Modi propri (selezione dinamica dell'energia)



IDEA CHIAVE

Ogni elemento non solo riceve energia, ma la restituisce e la modifica.
Il violino funziona come una rete di scambi continui: nessun elemento è passivo, nessun percorso è unico.



RISULTATO

Emergono modi propri globali ibridi (struttura + aria) che coinvolgono simultaneamente tutti i sottosistemi.



SUONO

Il suono risultante è la selezione dinamica dei modi che il sistema privilegia, sotto l'azione dell'arco (forzante debolmente non lineare).

Dal modello di Fourier ai risonatori

1. Si è visto nelle lezioni precedenti che un suono può essere descritto matematicamente:
 - come somma di sinusoidi (serie di Fourier), nel caso di segnali periodici;
 - oppure come distribuzione continua di frequenze (trasformata di Fourier), nel caso generale.

→ Un suono può quindi essere analizzato nelle sue componenti in frequenza.

2. C'è un problema fisico: come si individuano queste componenti nella realtà? Nei suoni reali non abbiamo quasi mai sinusoidi pure isolate, ma segnali complessi in cui molte componenti frequenziali sono sovrapposte simultaneamente.

3. Idea chiave → **risonanza**. Alcuni sistemi fisici, come si è visto, hanno delle frequenze proprie e rispondono in modo selettivo: entrano in risonanza soprattutto con determinate componenti.

4. Collegamento → Fourier (matematica): il suono è somma di componenti in frequenza.
Risonatori (fisica): sistemi selettivi che rispondono maggiormente ad alcune frequenze.

I risonatori realizzano una selezione spettrale fisica, analoga ma non equivalente alla decomposizione di Fourier.

5. Analizzare un suono = farlo interagire con sistemi che selezionano le sue componenti.
Esempio concreto → il risonatore di **Helmholtz**.

Sistemi risonanti e analisi del suono

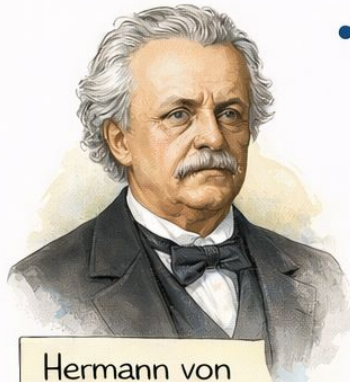
Poiché il suono può essere descritto come una combinazione di componenti in frequenza (modello di Fourier), e poiché un sistema risonante possiede frequenze proprie e risponde in modo selettivo alle sollecitazioni - rinforzando le frequenze vicine alle proprie risonanze e attenuando le altre - un risonatore si comporta come un filtro selettivo in frequenza.

Ne consegue che l'analisi fisica del suono può essere ottenuta facendo interagire il segnale con sistemi risonanti: ogni risonatore risponde maggiormente ad alcune componenti frequenziali e meno ad altre, permettendo così di separare e identificare le frequenze presenti nel suono analizzato.

I Risonatori di Hermann von **Helmholtz** (1821-1894) → esempio semplice di un sistema risonante. Costituito da più cavità d'aria, ciascuno con un collo di apertura e accordato su una determinata frequenza. Introdotti da Helmholtz negli anni 1850–1860 (in particolare con la pubblicazione di ***Die Lehre von den Tonempfindungen*** — *Sulla teoria delle sensazioni sonore*, 1863), oggi sono sostituiti dai metodi digitali (FFT). I risonatori di Helmholtz restano tuttavia fondamentali per comprendere il fenomeno del suono, permettendo di analizzarlo selezionando le sue componenti in frequenza.

La risonanza permette di “filtrare” il suono, isolando le sue componenti.

Risonatori di Helmholtz



Hermann von Helmholtz (XIX sec.)

• Effetto

- Permette di:
 - isolare una singola armonica
 - ascoltarla separatamente

Idea chiave:

La risonanza rende **udibili** le componenti interne del suono.

• Strumento

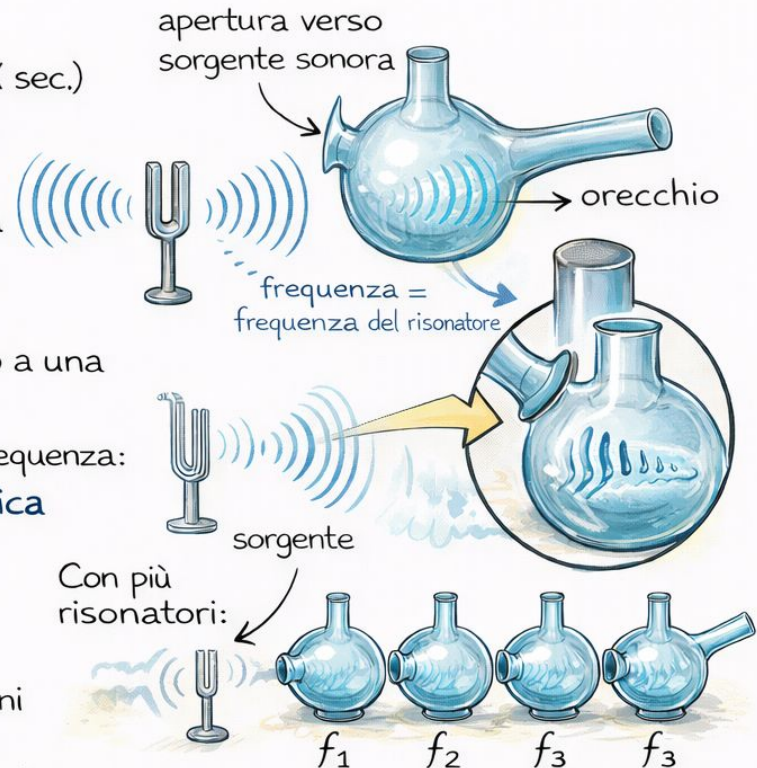
- Hermann von Helmholtz (XIX sec.)
- Sfere cave con due aperture
 - una per l'orecchio
 - una verso la sorgente sonora

• Principio di funzionamento

- Ogni risonatore è accordato a una frequenza specifica
- Se il suono contiene quella frequenza:
→ il risonatore la **amplifica**

• Uso scientifico

- Con più risonatori:
 - Helmholtz analizza i suoni complessi
 - distingue e stima l'intensità delle armoniche



• Risultati

- suoni periodici (armoniche)
- suoni non armonici (campane, gong)

Lo spettro sonoro: struttura in frequenza del suono

Un suono complesso può essere descritto come un insieme di frequenze.

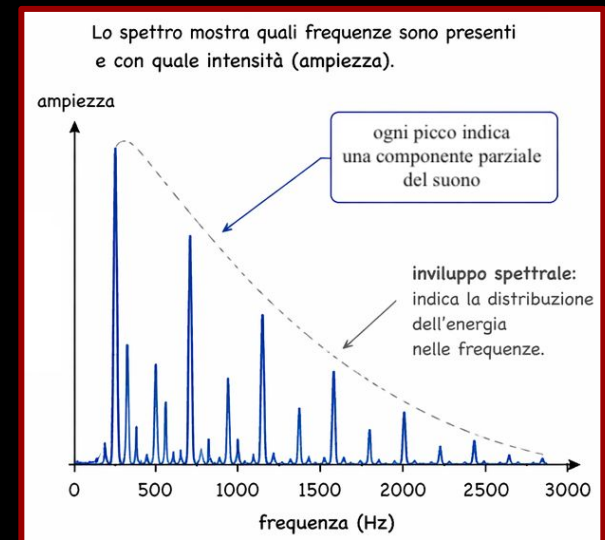
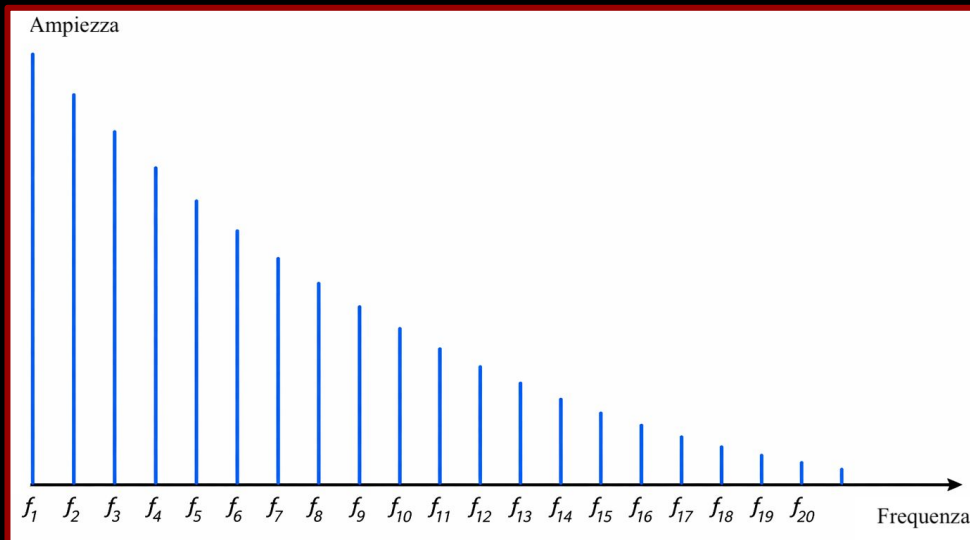
Spettro = *rappresentazione del suono nel dominio della frequenza.*

- asse orizzontale → frequenza (Hz).
- asse verticale → ampiezza.

Come si legge;

- ogni picco → una componente sinusoidale (armonica);
- l'insieme dei picchi → struttura del suono.

Lo spettro mostra quali frequenze sono presenti e con quale intensità.



La teoria *formantica* del suono

Spettro sonoro e timbro

Il timbro di un suono dipende dalla sua struttura spettrale, ossia:

- dalla distribuzione delle ampiezze delle parziali;
- dalla presenza di bande privilegiate (*formanti*).

2 suoni con la stessa altezza possono avere timbri diversi perché presentano spettri diversi.

In uno strumento musicale si distinguono due componenti fondamentali:

- 1) L'*eccitatore* (elemento vibrante) → genera la vibrazione iniziale. Es., la corda nel violino, l'ancia nel clarinetto, le labbra negli ottoni.
- 2) il *risonatore* (elemento risonante) → entra in vibrazione in risposta all'eccitatore selezionando e amplificando alcune frequenze. Es., la corda + cassa armonica, la colonna d'aria + corpo dello strumento.

Il suono percepito nasce dall'interazione tra eccitatore e risuonatore:

- eccitatore → produce uno spettro ricco (molte componenti);
- risonatore → agisce come filtro in frequenza enfatizzando alcune bande (formanti) e attenuandone altre.

Il timbro è la forma dello spettro:

→ eccitatore = genera le componenti;

→ risonatore = modella l'involuppo spettrale.

L'eccitazione della corda.

Pizzicare o percuotere una corda tesa mette in vibrazione più modi simultaneamente:

→ si genera un'onda complessa composta da armoniche.

- Parametri strutturali della corda.

- Lunghezza, massa lineare, tensione → determinano la frequenza fondamentale (quindi l'altezza)... ma non determinano la forma d'onda completa.

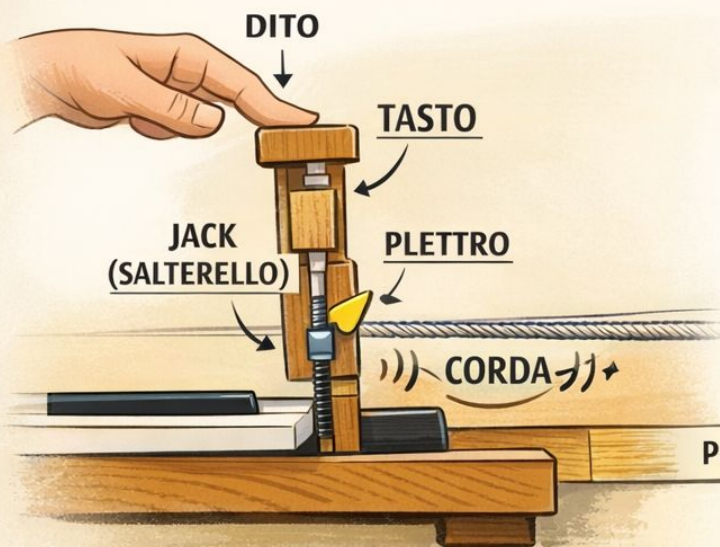
- Distribuzione spettrale (timbro).

- Il peso relativo delle armoniche dipende dalla modalità di eccitazione (pizzico vs percussione vs arco) e dal punto di eccitazione lungo la corda.
- Questo modifica lo spettro → quindi il timbro.

Esempi strumentali.

- **Clavicembalo** (*pizzico*): attacco netto, rapido decadimento, spettro ricco ma poco modulabile.
- **Pianoforte** (*percussione*): eccitazione impulsiva mediata dal martelletto, spettro variabile con la dinamica.
- **Strumenti ad arco**: eccitazione continua (*stick-slip* o adesione–scorrimento), suono stazionario/persistente, spettro relativamente stabile nel tempo.
- La struttura della corda determina quali frequenze sono possibili.
- Il modo di eccitazione determina come queste frequenze sono distribuite.

CLAVICEMBALO (PIZZICO)

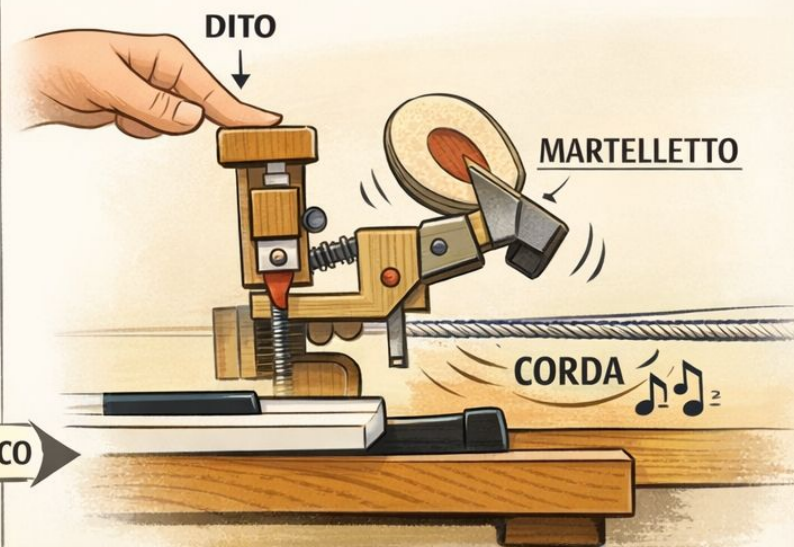


PIZZICO



PLETTRO PIZZICA LA CORDA

PIANOFORTE (PERCUSSIONE)



PERCUSSIONE



MARTELLO COLPISCE LA CORDA

Risonatori fisici negli strumenti musicali

Cos'è un risonatore? → Struttura che, grazie alle proprie frequenze di risonanza, rinforza e prolunga alcune componenti frequenziali (parziali) del suono rispetto ad altre

1. Strumenti a percussione.

- Xilofoni, marimbe → tubi risonatori sotto le piastre.
- Gamelan → cavità o canne sotto le piastre e i gong.

→ I risonatori rinforzano determinate componenti frequenziali del suono e contribuiscono al timbro caratteristico dello strumento.

2. Strumenti a corda (antichi). Viola d'amore ha le corde di simpatia → Vibrano senza essere suonate, prolungando e arricchendo il suono.

3. Ottoni. Tubi lunghi → producono risonanze armoniche della colonna d'aria. Le labbra del musicista → eccitano e interagiscono con le risonanze del tubo.

→ Le frequenze prodotte dipendono dall'accoppiamento tra vibrazione delle labbra e risonanze della colonna d'aria.

4. Strumenti a fiato: tubi con fori: l'apertura e la chiusura modificano la lunghezza acustica del tubo; cambiando le risonanze della colonna d'aria vengono determinate diverse altezze.

Il risonatore “filtra” il suono: amplifica alcune frequenze e ne attenua altre.

Lettura dello spettro: eccitatore e risonatore in azione

Qual è il ruolo specifico di ogni elemento?

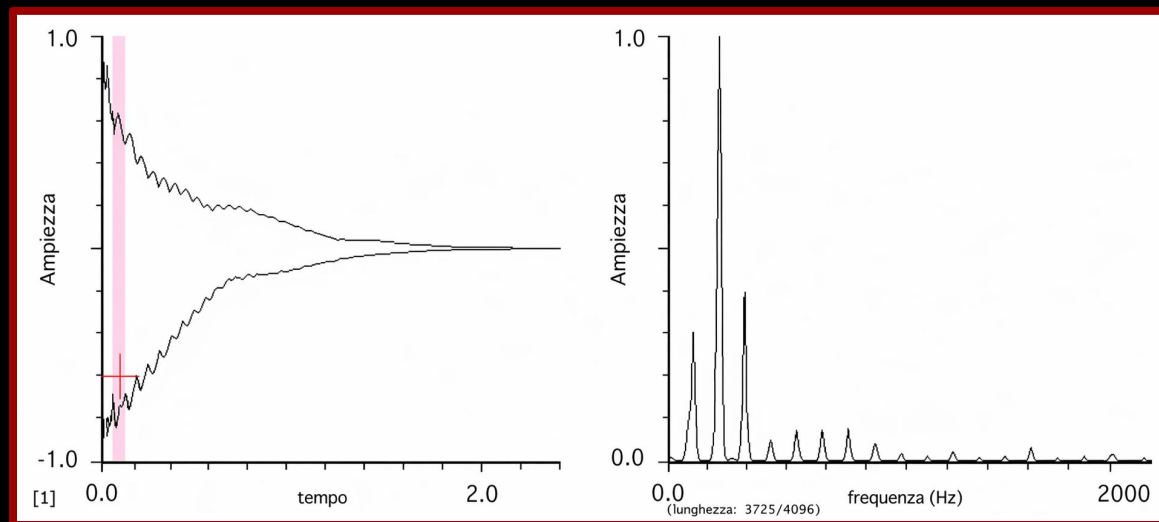
Osserviamo lo spettro di una chitarra subito dopo l'attacco.

- L'*eccitatore* (corda pizzicata) introduce una energia impulsiva che genera un insieme di componenti in frequenza (parziali), visibili nello spettro come picchi discreti.
- Il *risonatore* (cassa armonica), messo in vibrazione dalla corda, non genera nuove frequenze ma seleziona e modella quelle presenti, determinando nello spettro l'*inviluppo spettrale*, cioè la curva che descrive la distribuzione in ampiezza delle componenti in funzione della frequenza, evidenziando le bande maggiormente amplificate.

Nello spettro, la struttura fine dei picchi è prodotta dall'eccitatore, mentre la struttura globale (inviluppo) è determinata dal risuonatore.

Es. Il suono della chitarra risulta dall'interazione tra la corda e l'elemento risonante: la corda genera le componenti spettrali, mentre la cassa armonica ne seleziona e modella la distribuzione in ampiezza, determinando il timbro (vedi la slide successiva).

Analisi del suono della chitarra del punto segnato in rosa, poco dopo l'attacco.



Il grafico a sinistra è una rappresentazione nel *dominio del tempo del segnale*.

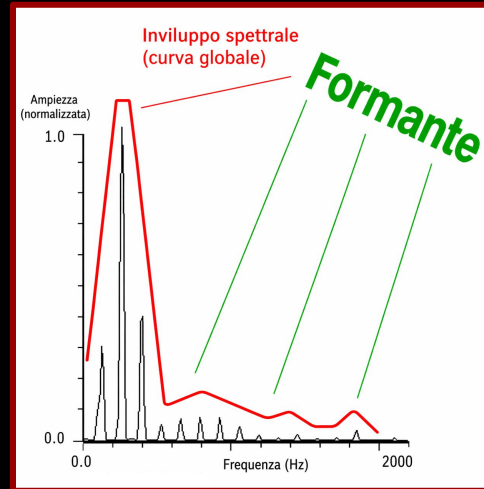
- L'asse orizzontale (tempo) indica l'evoluzione temporale del segnale (in secondi).
- L'asse verticale (ampiezza) indica il valore istantaneo del segnale (tra -1 e 1).
- La curva è l'oscillazione della pressione sonora (o spostamento) nel tempo.
- Si osserva un'oscillazione che decresce progressivamente: è un tipico andamento di smorzamento (*decay*).

Di solito → una corda vibrante isolata produce una fondamentale seguita da armonici con ampiezza progressivamente decrescente. Ci si chiede allora perché, in questo caso, la seconda e la terza parziale risultino più intense della fondamentale, e perché le successive non mostrino un decadimento regolare.

→ *questo spettro evidenzia la presenza di formanti* (vedi slide successiva).

Le *formanti* nello spettro sonoro - esempio della chitarra

La *formante* è una concentrazione di energia acustica in una determinata banda di frequenze. Ne consegue che le parziali comprese in quella banda presentano un'ampiezza maggiore rispetto alle altre.



Nella figura sono evidenziati i formanti nello spettro della chitarra

Le formanti sono determinate principalmente dalle risonanze della cassa armonica (o cavità risonante), che amplificano alcune bande di frequenza più di altre; tali risonanze dipendono dalla geometria della cavità, dal volume d'aria e dal materiale.

Ma intervengono anche le onde sonore riflesse all'interno della cavità, che possono sommarsi in fase (rinforzo) o in controfase (attenuazione), producendo picchi e avvallamenti nello spettro sonoro.

La cassa armonica agisce quindi come un filtro selettivo: la corda produce uno spettro ricco di armoniche, che viene rimodellato in base alle risonanze della cassa.

→ *Il suono finale è il risultato dell'interazione tra eccitatore e risuonatore.*

→ *Le formanti determinano il timbro caratteristico dello strumento.*

Quale relazione tra Fourier e la teoria formantica?

L'analisi matematica di Fourier ci dice che:

- un suono può essere scomposto nelle sue componenti in frequenza;
- lo spettro mostra quali frequenze sono presenti e con quale ampiezza;
- descrive il suono in un dato intervallo temporale → dice di quali componenti è fatto.

Limiti della descrizione classica di Fourier:

- non indica l'origine fisica delle componenti;
- non spiega perché alcune frequenze sono privilegiate;
- non rappresenta direttamente l'evoluzione nel tempo (attacco, decadimento, variazioni del timbro).

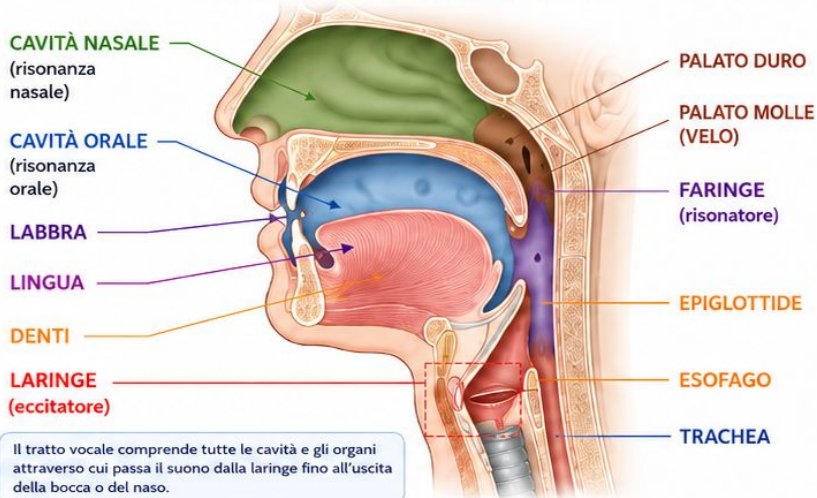
Teoria formantica. Il suono nasce dall'interazione tra:

- eccitatore → genera le componenti sonore;
- risonatore → seleziona e amplifica alcune bande di frequenza (formanti).

Le proprietà del risonatore sono relativamente stabili nel tempo, mentre lo spettro del segnale evolve: ciò spiega perché il suono mantiene una certa configurazione timbrica pur variando nel tempo. L'analisi di Fourier descrive la composizione spettrale del suono, ma fatica a rappresentarne l'evoluzione temporale; la teoria formantica spiega invece l'organizzazione e la persistenza di alcune regioni energetiche dello spettro.

→ Il timbro può quindi essere inteso come una forma spettrale dinamica, modellata dal risonatore.

1. IL TRATTO VOCALE: ANATOMIA



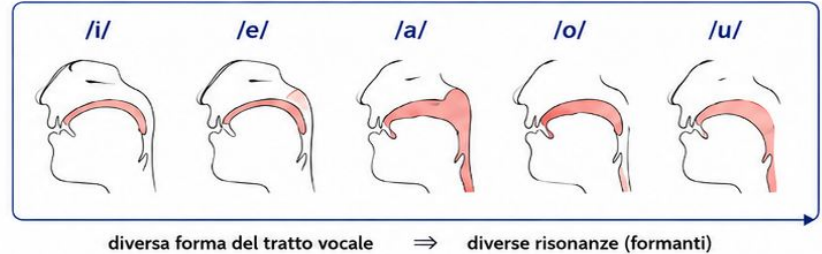
2. IL TRATTO VOCALE COME RISONATORE VARIABILE

Il tratto vocale è un tubo risonante la cui forma e volume cambiano continuamente grazie al movimento di lingua, labbra, mandibola e palato.

Queste variazioni modificano:

- la lunghezza effettiva del tubo
- le sezioni trasversali lungo il percorso
- le condizioni di riflessione del suono

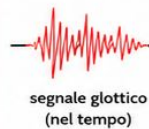
⇒ cambiano le risonanze e le frequenze di picco = **FORMANTI**.



3. ECCITATORE + RISONATORE = SUONO (MODELLO SORGENTE-FILTRO)

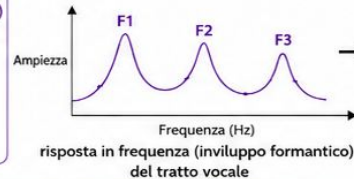
ECCITATORE: LARINGE

Le pliche vocali (corde vocali) vibrano periodicamente. Producono un segnale ricco di armoniche (spettro a pettine).



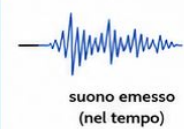
RISONATORE: TRATTO VOCALE (FILTRO)

Il tratto vocale seleziona, rinforza (amplifica) e attenua diverse bande di frequenza. Le bande privilegiate sono le **FORMANTI** (F1, F2, F3, ...), che dipendono dalla sua forma istantanea.



USCITA: SUONO EMESSO

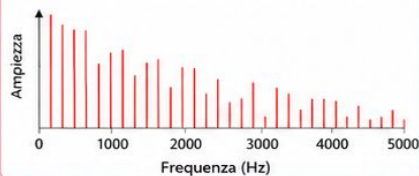
Il segnale risultante conserva l'impronta delle formanti. È questo che determina in gran parte il timbro (es. vocali diverse).



4. VISIONE IN FREQUENZA: COME NASCE LO SPETTRO DEL SUONO

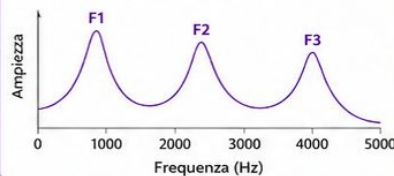
A. SPETTRO DELL'ECCITATORE (LARINGE)

ricco di armoniche (spettro a pettine)



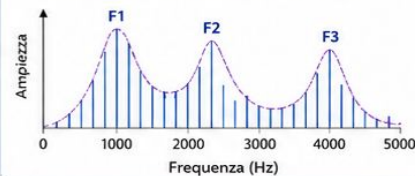
B. RISPOSTA IN FREQUENZA DEL TRATTO VOCALE

(involuppo formantico)



C. SPETTRO DEL SUONO EMESSO

armoniche modellate dall'involuppo formantico



Spettro del suono emesso = Spettro dell'eccitatore × Risposta in frequenza del tratto vocale

5. IN SINTESI

- 1 La laringe (eccitatore) produce un segnale periodico ricco di armoniche.
- 2 Il tratto vocale (risonatore) seleziona, rinforza e attenua alcune bande di frequenza: le **FORMANTI** (F1, F2, F3, ...).
- 3 Il suono emesso ha uno spettro modellato dalle formanti.
- 4 La posizione e l'intensità delle formanti determinano in gran parte il **TIMBRO** delle vocali e, più in generale, della voce.



FORMANTI (F1, F2, F3, ...): picchi dell'involuppo spettrale prodotti dalle risonanze del tratto vocale.



Le formanti non sono singole frequenze pure, ma bande di frequenza con ampiezza massima.



Il timbro non dipende solo dalle formanti: anche dall'intensità relativa delle armoniche, dall'attacco, dalla durata, dal rumore e dalla dinamica del suono.

Risonanza della cassa armonica: esempio del violino

- La cassa armonica agisce come risonatore.
- Modifica il timbro del suono.

Il grafico.

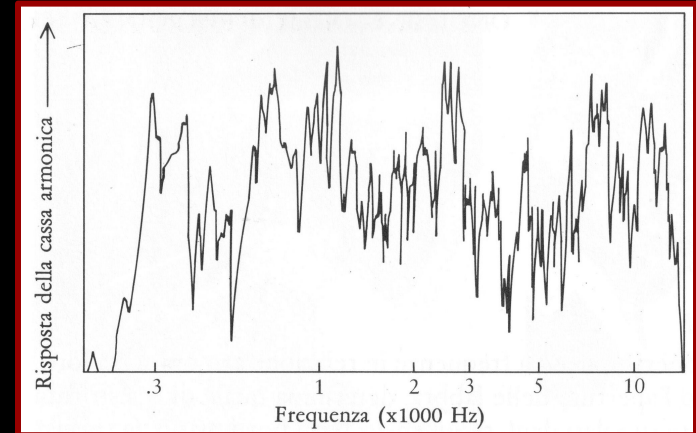
- Asse orizzontale → frequenza.
- Asse verticale → risposta della cassa armonica.
- La curva irregolare mostra che la cassa:
 - amplifica alcune bande di frequenza;
 - attenua altre.

Di conseguenza, alcune parziali del suono vengono rafforzate, altre ridotte.

→ Il timbro del violino dipende in gran parte da questa selezione spettrale.

Qualità dello strumento

- Buon violino → curva molto variabile.
 - suono ricco e musicale.
- Violino scadente → curva piatta.
 - suono aspro e povero.



La cassa armonica di un violino risuona più a certe frequenze che ad altre. Questo è il diagramma dell'intensità dell'onda sonora prodotta eccitando il ponticello di un famoso Guarneri

Il timbro del violino nasce dal filtro risonante della cassa armonica.

Filtri elettronici e analisi del suono.

Per analizzare un suono oggi si usano filtri elettronici (non risonatori meccanici).

Come funziona?

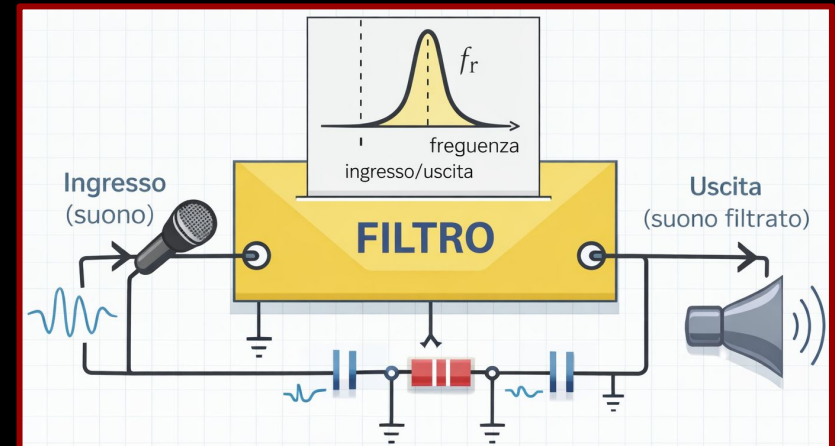
- Microfono → trasforma il suono in segnale elettrico.
- Filtro → seleziona le frequenze.
→ permette di individuare le armoniche.

Il filtro (grafico).

- Asse orizzontale → frequenza.
- Asse verticale → rapporto uscita/ingresso.
- Picco in f_r (frequenza di risonanza).
→ quella frequenza viene amplificata.
→ le altre vengono attenuate.

Funzione.

- Il filtro “isola” una banda di frequenze.
- Analisi precisa delle componenti del suono.



Il filtro elettronico è un risonatore controllato per studiare il suono.

Analizzatore di spettro.

Strumento elettronico per analizzare il suono.

Mostra uno schermo con un grafico:

- Asse orizzontale → frequenza.
- Asse verticale → ampiezza.

Lo *spettro*.

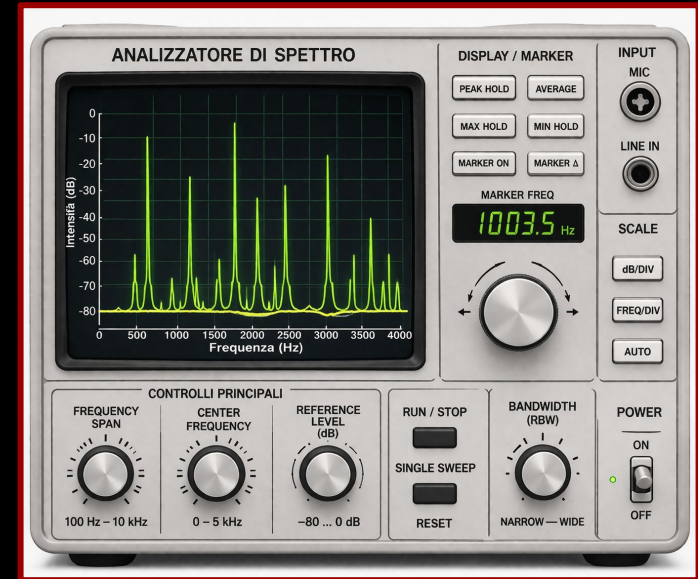
- La curva visualizzata = spettro del suono.
- Composta da più picchi.
- Ogni picco = una frequenza precisa
- Ogni picco = una parziale → chiamata riga dello spettro.

Funzione.

→ Permette di “vedere” le componenti del suono.

→ Analisi chiara delle parziali e del timbro.

Il suono complesso diventa un insieme di frequenze visibili.



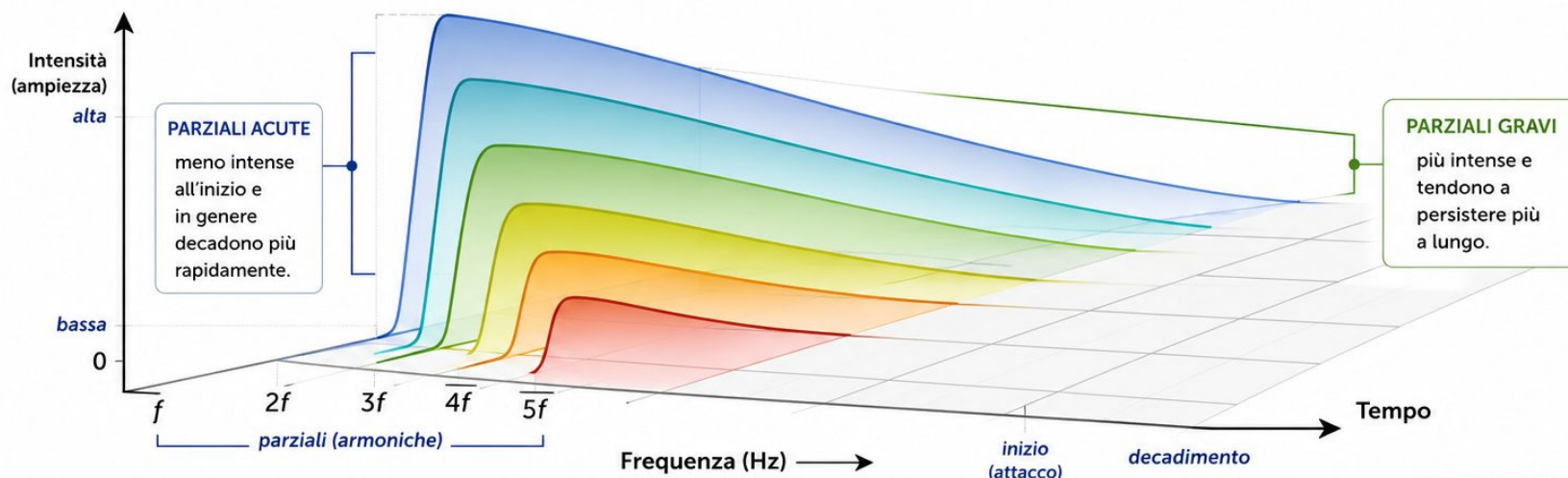
EVOLUZIONE TEMPORALE DELLE PARZIALI



IDEA CHIAVE → L'INTENSITÀ DELLE PARZIALI CAMBIA NEL TEMPO.

Le parziali acute tendono generalmente a decadere più rapidamente, mentre quelle gravi persistono più a lungo.
→ Il timbro non è statico, ma evolve nel tempo.

- Ogni curva rappresenta l'evoluzione temporale (involuppo) di una singola parziale.
- Più la curva è alta, maggiore è l'intensità (ampiezza) di quella parziale in quel momento.



CHE COSA SIGNIFICA?

Ogni parziale ha una sua "storia" di intensità nel tempo (involuppo temporale). Questo determina:

- ✓ l'attacco (come nasce il suono)
- ✓ il decadimento (come si spegne)
- ✓ il timbro dinamico dello strumento

CONSEGUENZA SUL SUONO

All'inizio sono presenti molte parziali (suono ricco e brillante).

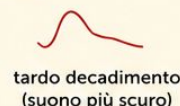
Con il passare del tempo, le parziali acute diminuiscono più velocemente e il suono diventa via via più "scuro" (rimangono soprattutto le gravi).



tempo →



tempo →



i NOTA

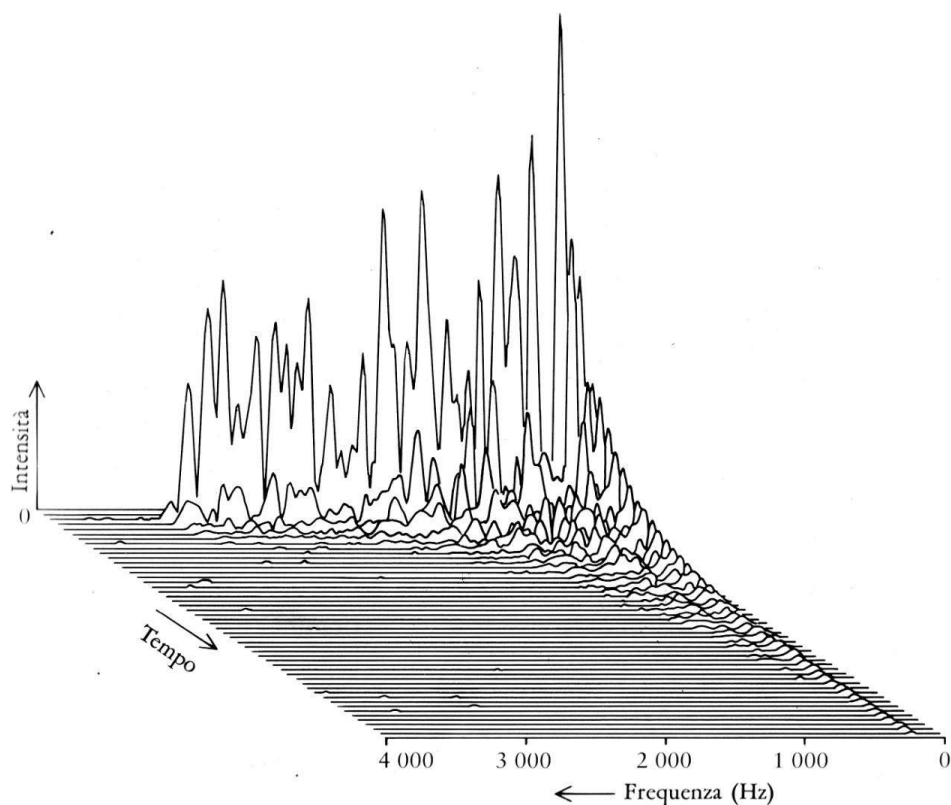
La forma precisa degli involuppi dipende dallo strumento, dal materiale, dalla posizione dell'arco, dalla dinamica e dalla tecnica esecutiva.



IN SINTESI

Le parziali non hanno tutte la stessa intensità né la stessa durata: ogni parziale evolve nel tempo in modo diverso. La cassa di risonanza e la struttura dello strumento modellano queste evoluzioni, determinando il timbro caratteristico.

Il disegno in prospettiva costituito da una sequenza di spettri a picchi di un tam-tam; si può vedere come i molti picchi di frequenza o risonanze siano piuttosto ampi.



Rappresentazione di come lo spettro del suono di un tam-tam varia col tempo dopo che lo strumento è stato percosso.

Sonografia: visualizzazione e analisi del suono come sistema di filtri

La sonografia è una tecnica che rappresenta un suono nel tempo mostrando quali frequenze sono presenti e con quale intensità → *spettrogramma*.

- Deriva dagli studi di acustica e delle telecomunicazioni (XX secolo).
- è stata sviluppata per analizzare la voce (telefono, fonetica).
- ha ricevuto un'evoluzione digitale col computer → *spettrogrammi* ad alta precisione.

È una “radiografia del suono”: vuole rendere visibile in immagine (lo *spettrogramma*) ciò che l'orecchio percepisce.

È un sistema di filtri.

- Il segnale viene scomposto tramite *filtri passa-banda* (un sistema che lascia passare solo le frequenze comprese tra due limiti - bassa e alta - attenuando le altre. Ogni filtro “isola” una zona di frequenze).
- Nel tempo si applicano finestre per effettuare analisi locale.

Tanti filtri lavorano insieme per “scorporare” il suono e visualizzarlo internamente.

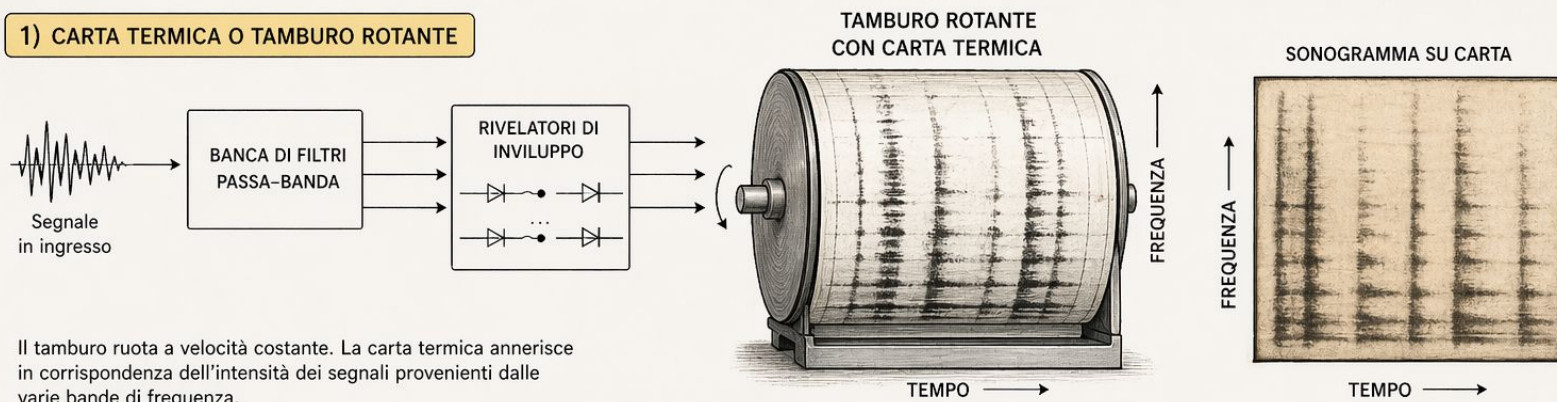
- Vantaggi → Visualizza la struttura interna del suono, permette di analizzarlo (formanti, armonici, transienti).
- Limiti → Compromesso tempo vs frequenza (non si possono avere entrambi perfetti).
- Dipende dai parametri scelti (finestre, risoluzione).

Non rappresenta direttamente la percezione umana.

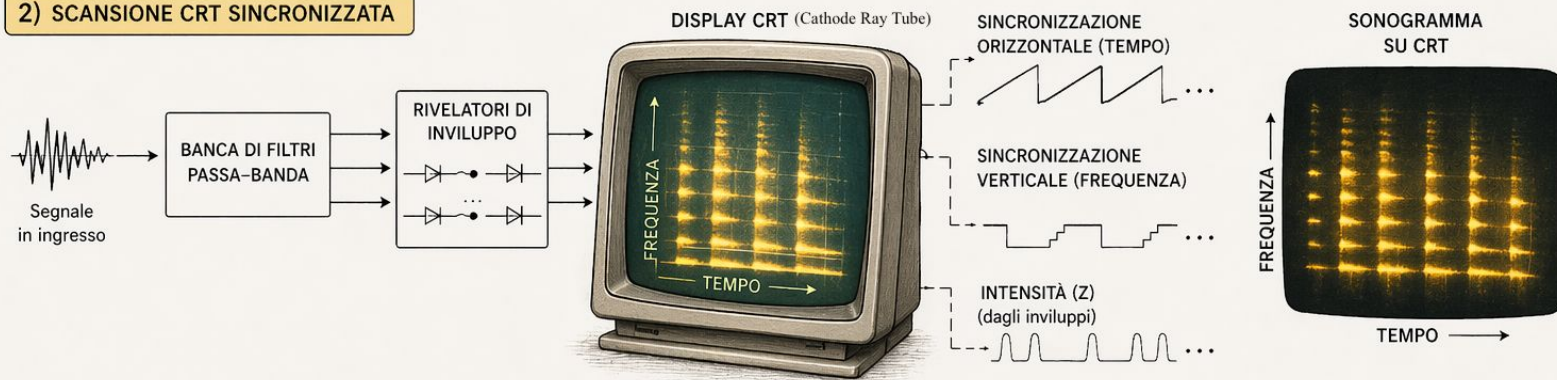
→ è uno strumento analitico valido, ma non neutro: ciò che si vede dipende da come si filtra il suono.

SONOGRAFI CLASSICI: SISTEMI DI SCRITTURA/SCANSIONE

1) CARTA TERMICA O TAMBURO ROTANTE



2) SCANSIONE CRT SINCRONIZZATA



Il fascio elettronico del CRT viene spostato orizzontalmente nel tempo e verticalmente in frequenza in modo sincronizzato. La luminosità del punto è modulata dall'ampiezza dei segnali (inviluppi) delle varie bande.

Asse orizzontale: TEMPO → scorrimento nel tempo
 Asse verticale: FREQUENZA → posizioni delle bande filtrate
 Luminosità/nerografia: intensità del segnale

Qui la frequenza *non* è continua: ogni posizione verticale corrisponde a una banda filtrata.
 Il sonogramma è quindi una mappa nel tempo delle energie per banda.

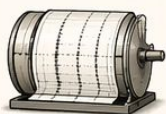
SONOGRAFI: PERIODI DI APPLICAZIONE

Evoluzione storica dei principali sistemi di sonografia

1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 →

SONOGRAFI A CARTA

(carta termica o tamburo rotante)



NASCITA E SVILUPPO

anni '40

Utilizzati principalmente in ricerca militare, telecomunicazioni, fonetica sperimentale e analisi acustica.

USO DIFFUSO

anni '50 – '70

DECLINO PROGRESSIVO

fine anni '70 – anni '80

PROGRESSIVAMENTE SOSTITUITI

forte riduzione d'uso dalla fine degli anni '70 agli anni '80

SONOGRAFI CON TUBO CATODICO (CRT)



INTRODUZIONE E SVILUPPO

anni '50

Permettono la visualizzazione in tempo reale del sonogramma. Standard in molti laboratori per analisi acustica, voce, musica, ecc.

USO MOLTO DIFFUSO

anni '60 – '80

DECLINO

fine anni '80 – anni '90

SUPERATI DAI DISPLAY DIGITALI

diffusione massiccia dei sistemi digitali a partire dagli anni '90

SONOGRAFI DIGITALI



SVILUPPO TECNOLOGICO (primi sistemi digitali di ricerca)

anni '70 – '80

Maggior precisione, flessibilità, memorizzazione, elaborazione avanzata e integrazione con software di analisi.

DIFFUSIONE E STANDARD

anni '90 – 2000s

TECNOLOGIA ATTUALE

2000s – oggi

TECNOLOGIA ATTUALE

in continua evoluzione (fino a oggi)

SINTESI CRONOLOGICA

-  Sonografi a carta anni '40 – fine anni '70 (declino anni '80)
-  Sonografi con CRT anni '50 – fine anni '80 / anni '90
-  Sonografi digitali sviluppo anni '70–'80 → diffusione anni '90 → oggi



IN BREVE

- **Carta:** registrazione fisica su supporto (carta termica o tamburo).
- **CRT:** visualizzazione elettronica in tempo reale.
- **Digitale:** elaborazione computerizzata, massima flessibilità e archiviazione.

NOTA

Le date indicano periodi di prevalenza tecnologica; nei laboratori i sistemi hanno spesso convissuto in anni di transizione.



Fonti storiche principali: sviluppo dei sistemi di sonografia nei laboratori di ricerca e nelle applicazioni di fonetica, musica e acustica (anni '40–oggi).

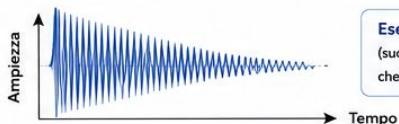
DUE TIPI DI SONOGRAMMA

Ogni sonogramma è una rappresentazione tempo-frequenza del suono.
La scelta della “banda” (larghezza della finestra di analisi) cambia ciò che vediamo.

1 BANDA STRETTA (finestra lunga)

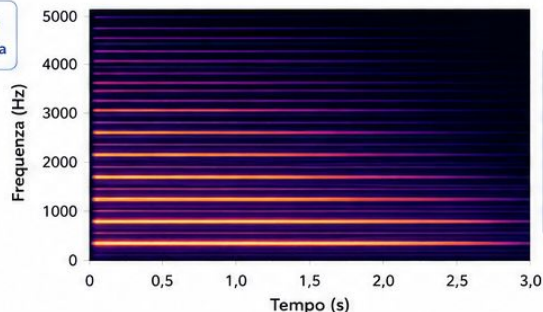
- ✓ mostra bene le singole armoniche;
- ✓ le armoniche appaiono come linee orizzontali sottili;
- ✓ ha una buona risoluzione in frequenza;
- ✓ rappresenta meno bene i dettagli temporali rapidi.

Segnale
nel tempo



Esempio: nota di violino
(suono complesso con molte armoniche)
che decade nel tempo.

Sonogramma
a banda stretta



Le armoniche
sono chiare
(linee orizzontali),
ma i cambiamenti
rapidi nel tempo
sono smoothed
(poco dettagliati).

Finestra
di analisi

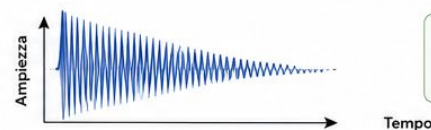


Finestra lunga → buona risoluzione in frequenza, scarsa in tempo

2 BANDA LARGA (finestra corta)

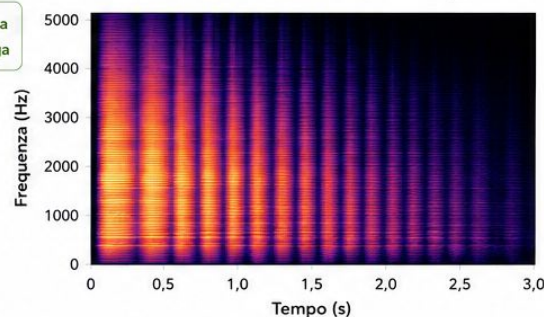
- ✓ evidenzia meglio l'evoluzione temporale del suono;
- ✓ compaiono striature verticali legate al periodo T della vibrazione;
- ✓ ha una buona risoluzione temporale;
- ✓ non distingue chiaramente le singole armoniche.

Segnale
nel tempo



Stesso suono:
nota di violino
che decade nel tempo.

Sonogramma
a banda larga

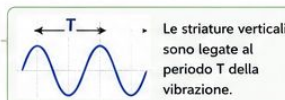


Si vedono bene
i cambiamenti rapidi
(striature verticali
legate al periodo T),
ma le armoniche
non sono risolte.

Finestra
di analisi



Finestra corta → buona risoluzione in tempo, scarsa in frequenza



IL COMPROMESSO TEMPO-FREQUENZA

Esiste un compromesso fondamentale:
se aumentiamo la precisione in frequenza (finestra lunga),
perdiamo precisione nel tempo.
Se aumentiamo la precisione nel tempo (finestra corta),
perdiamo precisione in frequenza.



Scarsa
risoluzione
temporale

Finestra di analisi sempre più LUNGA

Buona
risoluzione
in frequenza

Finestra di analisi sempre più CORTA

Buona
risoluzione
temporale

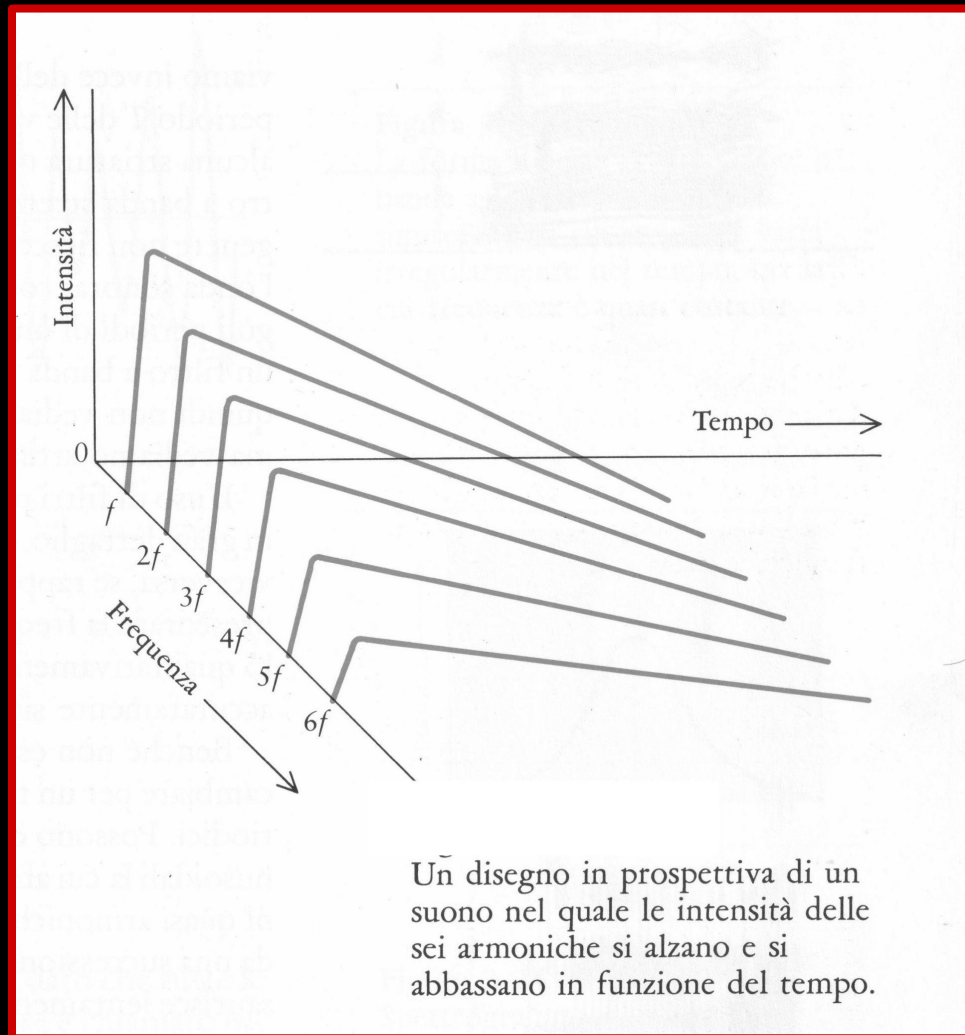
Scarsa
risoluzione
in frequenza

IN SINTESI

Non si possono osservare
perfettamente insieme
tempo e frequenza:
ogni scelta privilegia uno
e limita l'altro.

Grafici in prospettiva.

I grafici “in prospettiva” → sono solo qualitativi (non esatti).



Spettro continuo (rumore e voce bisbigliata).

- Non sempre lo spettro ha picchi distinti.
- Può essere una curva continua (a campana).

Caratteristiche.

- Insieme continuo di frequenze.
- Non descrivibile con poche armoniche.
- Tipico di suoni come:
 -
 - voce bisbigliata.

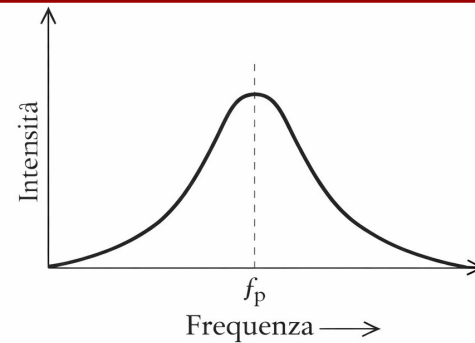
Ruolo delle risonanze.

- Il tratto vocale seleziona le frequenze
 - crea un massimo nello spettro (f_p).

Esempio vocali

- “i” bisbigliata → frequenze *alte* enfatizzate → suono acuto.
- “u” bisbigliata → frequenze *basse* enfatizzate → suono grave.

Anche senza armoniche discrete, la risonanza determina l'altezza percepita.



Spettrogramma di un rumore costituito da un numero infinito di componenti di frequenza le cui fasi sono casuali e quindi non hanno il loro massimo nello stesso istante. Esse invece danno luogo a una distribuzione a campana familiare in statistica.

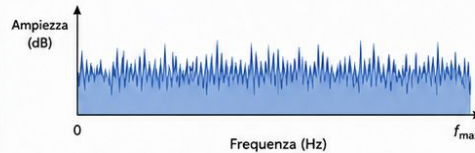
Un rumore con uno spettro di questo tipo indurrà una sensazione di altezza corrispondente alla frequenza f_p , corrispondente al picco dello spettro.

RUMORE: BANDA LARGA E BANDA STRETTA

Il rumore può avere energia distribuita:
su una banda molto ampia (**banda larga**); oppure concentrata attorno a una regione più limitata (**banda stretta**).

RUMORE A BANDA LARGA

- molte frequenze presenti contemporaneamente;
- energia distribuita su un ampio intervallo di frequenze;
- nessun picco dominante evidente.



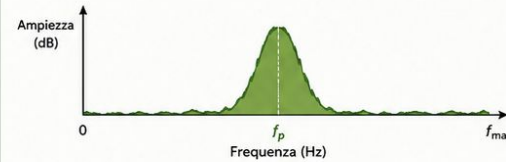
Segnale nel tempo



→ esempio: rumore bianco, suono "soffiato".

RUMORE A BANDA STRETTA

- l'energia è concentrata attorno a una frequenza centrale (f_p);
- compare un picco nello spettro;
- può emergere una sensazione di altezza.

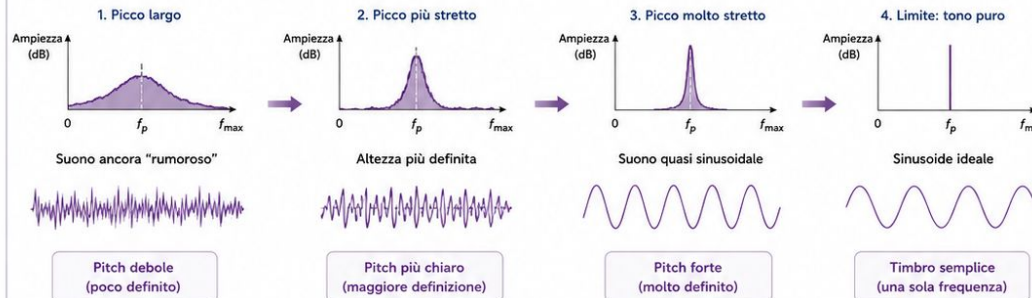


Segnale nel tempo



La presenza del picco può far emergere una sensazione di altezza.

EVOLUZIONE PERCETTIVA: DA RUMORE A TONO



→ Più lo spettro è concentrato attorno a una frequenza, più il suono appare intonato.



PUNTO TEORICO IMPORTANTE

La larghezza della banda spettrale determina la percezione dell'altezza:

Rumore (banda molto larga) → Pitch debole (incerto) → Pitch definito (più stretto) → Tono quasi puro (molto stretto)

Transizione continua: dal rumore disordinato al tono intonato



PERCHÉ È IMPORTANTE?

- ✓ Psicoacustica: studia come percepiamo l'altezza e il rumore.
- ✓ Sintesi sonora: molti suoni sintetici usano rumore filtrato (passa-banda) per ottenere altezze.
- ✓ Orchestrazione: l'intensità del rumore e la sua banda influenzano il colore timbrico degli strumenti.
- ✓ Elettroacustica: progettazione di filtri, effetti e suoni creativi.



NOTA: Il concetto di "altezza" con rumore a banda stretta è detto anche *pitch residue* o *pitch* da rumore periodico. Il nostro sistema uditivo è molto sensibile anche a picchi spettrali molto larghi.

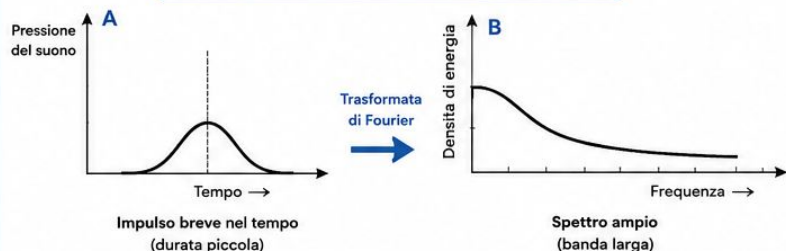
Largh. banda → Stretta banda



PERCHÉ IMPULSO BREVE → BANDA LARGA; IMPULSO LUNGO → BANDA STRETTA

Un segnale molto localizzato nel tempo cambia **rapidamente**: per rappresentarlo servono **molte frequenze** diverse.
Un segnale che varia lentamente può essere descritto con poche frequenze.

IMPULSO BREVE → BANDA LARGA



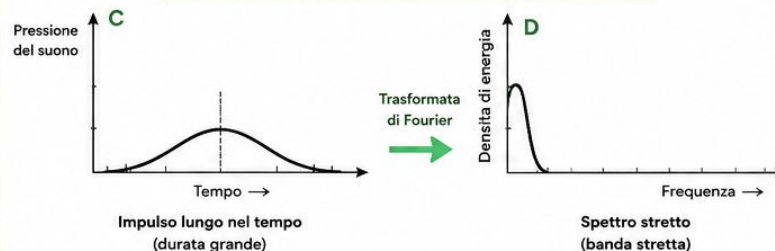
PERCHÉ?

- L'impulso breve ha fronti molto ripidi (cambia rapidamente).
- Le variazioni rapide richiedono molte frequenze (sovrapposte).
- L'energia si distribuisce su una gamma ampia di frequenze.

Suono percepito: "click"



IMPULSO LUNGO → BANDA STRETTA



PERCHÉ?

- L'impulso lungo varia lentamente (fronti dolci).
- Le variazioni lente possono essere descritte con poche frequenze.
- L'energia è concentrata in una regione ristretta di frequenze.

Suono percepito: "thump"



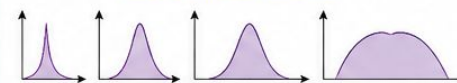
IDEA CHIAVE: COMPROMESSO TEMPO-FREQUENZA

Più localizziamo il suono nel tempo, meno riusciamo a localizzarlo in frequenza e viceversa.

Al diminuire della durata dell'impulso...



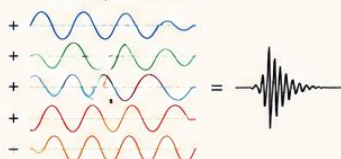
...la banda spettrale aumenta.



PERCHÉ SUCCEDE? (spiegazione intuitiva)

- 1 Una sinusoide pura ha una sola frequenza, ma dura idealmente per sempre.
- 2 Per ottenere un evento concentrato nel tempo (come un "click"), dobbiamo sommare molte sinusoidi di frequenze diverse con fasi diverse.
- 3 La sovrapposizione di molte frequenze permette di costruire variazioni molto rapide → impulso breve.

Somma di molte sinusoidi (di frequenze diverse)



ESEMPI NEL MONDO REALE



IN SINTESI

- Impulso breve → variazione rapida → molte frequenze → banda larga → suono "click".
- Impulso lungo → variazione lenta → poche frequenze → banda stretta → suono "thump".



COLLEGAMENTO TEORICO

Questo è il principio dell'**incertezza tempo-frequenza** (relazione di Fourier):

$\Delta t \cdot \Delta f \geq \text{costante}$ → non possiamo avere contemporaneamente alta precisione nel tempo e alta precisione in frequenza.

Accensione brusca di una sinusoide: si sente un “click”

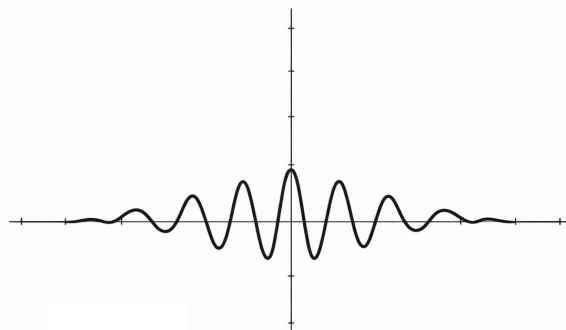
Quando un'onda sinusoidale viene accesa o interrotta improvvisamente, il segnale non è più una sinusoide pura: le variazioni rapide dell'ampiezza introducono componenti frequenziali aggiuntive e ampliano lo spettro.

Per questo si percepisce un “click” quando il suono viene acceso o spento bruscamente.

Es., se si ascolta l'emissione di un oscillatore audio e si interrompe improvvisamente il collegamento con l'altoparlante tramite un interruttore, si avverte un click.

Per ottenere un suono percepito come puro ed evitare il click, occorre far crescere e decrescere gradualmente l'intensità del segnale (involuppo morbido).

Una sinusoide con intensità variabile non è una sinusoide pura in senso matematico, poiché una sinusoide ideale avrebbe ampiezza costante e durata infinita. Tuttavia, se le variazioni di intensità sono lente e progressive, il suono continua a essere percepito come quasi puro.



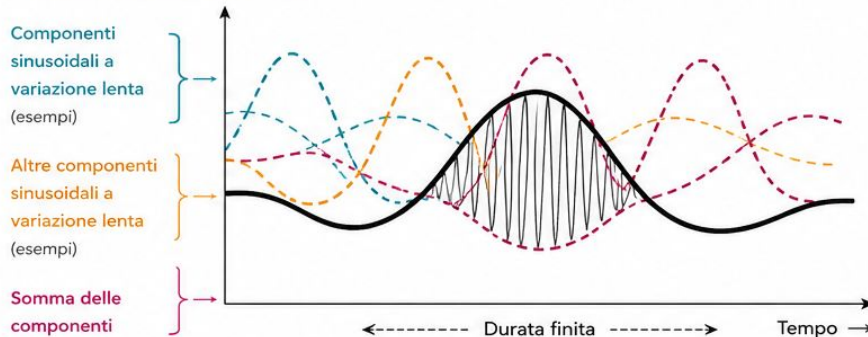
Se un'onda sinusoidale viene accesa e spenta lentamente non si avverte alcun “click”. Matematicamente questa non è un'onda sinusoidale ma, in pratica, suona come un'onda sinusoidale.

$$G = \frac{1}{D}$$

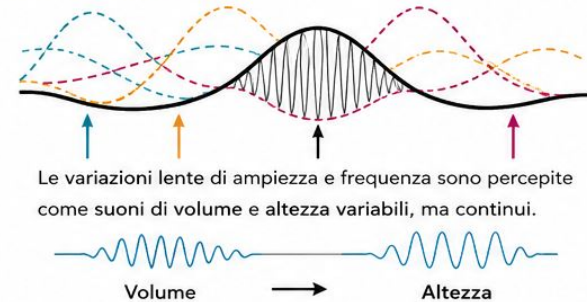
ONDE SINUSOIDALI A VARIAZIONE LENTA

Un suono reale può essere visto come somma di molte componenti sinusoidali la cui **ampiezza, frequenza o fase** cambiano **lentamente** nel tempo.

1 COMPONENTI E SOMMA



2 COSA PERCEPIAMO



i Combinazioni di onde sinusoidali a variazione lenta → suoni **"puliti"**, senza click.

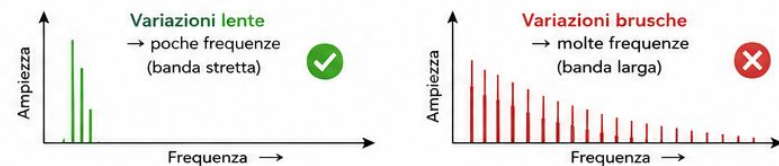
3 VARIAZIONI BRUSCHE: CLICK / TWANG



Una **variazione troppo rapida** (discontinuità)

- introduce molte frequenze (banda larga)
- produce un "click" o "twang"
- il suono risulta ruvido o sporco.

NELLO SPETTRO (idea generale)



IDEA CHIAVE

Più le variazioni nel tempo sono lente e graduali, più il suono è stabile e piacevole.
Più sono brusche, più il suono contiene molte frequenze e risulta impulsivo o rumoroso.

IN SINTESI



- Un suono è la somma di molte onde sinusoidali a variazione lenta.
- L'orecchio percepisce le variazioni lente come cambiamenti di volume, altezza o timbro.
- Le variazioni brusche introducono componenti ad alta frequenza e producono click (transizioni improvvise).
- La qualità del suono dipende dalla lentezza delle variazioni nel tempo.

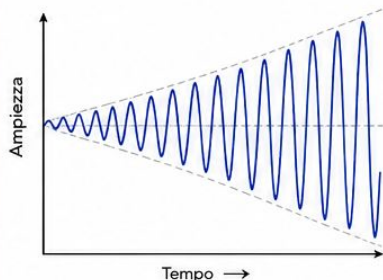


In pratica: il "suono buono" ha inviluppi e modulazioni lente; le discontinuità generano rumore.

1. CAMBIA L'AMPIEZZA, NON LA FREQUENZA

1A. Suono nel tempo

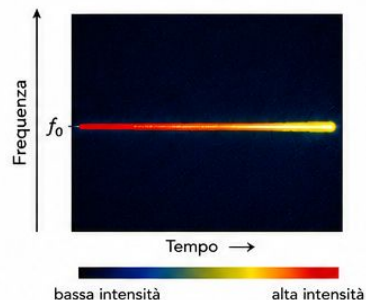
Suono puro (sinusoidale) con ampiezza crescente lentamente



i La frequenza resta costante, mentre l'ampiezza aumenta.

1B. Spettrogramma

Rappresentazione tempo-frequenza (spettrogramma)



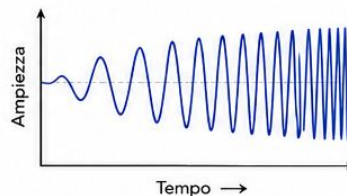
i La riga orizzontale è alla stessa frequenza f_0 : la sua **intensità** (colore) aumenta nel tempo.

✓ CONCLUSIONE: il suono diventa **più forte** (aumenta l'intensità), ma **non cambia altezza** (frequenza).

2. CAMBIA LA FREQUENZA, QUINDI CAMBIA L'ALTEZZA

2A. Suono nel tempo

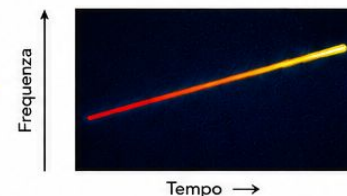
Frequenza crescente (glissando ascendente)



i La riga **sale**: la frequenza aumenta nel tempo.

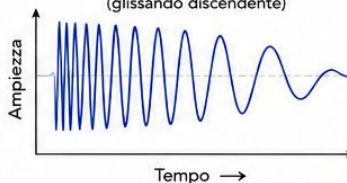
2B. Spettrogramma

Rappresentazione tempo-frequenza (spettrogramma)



2C. Suono nel tempo

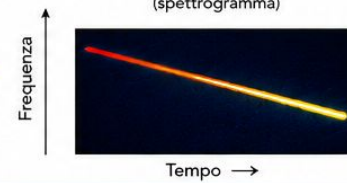
Frequenza decrescente (glissando discendente)



i La riga **scende**: la frequenza diminuisce nel tempo.

2D. Spettrogramma

Rappresentazione tempo-frequenza (spettrogramma)



Nota: nei riquadri degli spettrogrammi il colore indica l'intensità della componente.

SPIEGAZIONE



Nel tempo: se cambia solo l'ampiezza di un suono, il volume (a intensità) aumenta o diminuisce, ma la **frequenza** (distanza tra le oscillazioni) resta la **stessa**.



Nello spettrogramma: compare una sola componente (la frequenza fondamentale f_0), rappresentata da una **riga orizzontale** alla stessa **frequenza**; cambia solo la sua **intensità** (colore).

COSA CI DICONO LE DUE SITUAZIONI

- L'**ampiezza** controlla l'intensità (quanto forte è il suono).
- La **frequenza** controlla l'altezza (quanto acuto o grave è il suono).



Nel tempo: se cambia la frequenza (lentamente), la distanza tra le oscillazioni aumenta o diminuisce: percepiamo quindi un **cambiamento di altezza**.



Nello spettrogramma: la riga non è più orizzontale, ma si sposta in **alto** (frequenza crescente) o in **basso** (frequenza decrescente).



1. Variazione di ampiezza (intensità)

Aumentare o diminuire l'ampiezza → aumenta o diminuisce l'intensità (volume), ma non cambia la frequenza (altezza).

2. Variazione di frequenza (altezza)

Aumentare o diminuire la frequenza → cambia l'altezza percepita (più acuto o più grave), e la riga nello spettrogramma si sposta.

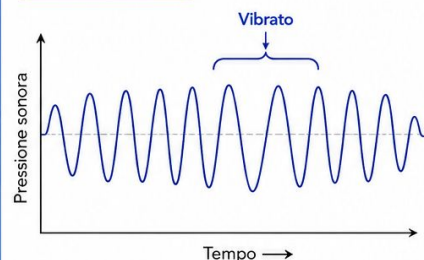
IN SINTESI

Volume = ampiezza
Altezza = frequenza

IL VIBRATO

Variazione periodica e lenta della frequenza (vibrato musicale)

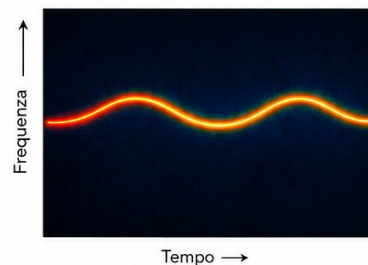
1. NEL TEMPO



i Il vibrato è una variazione periodica e lenta della frequenza: la distanza tra le oscillazioni aumenta e diminuisce regolarmente, mentre l'ampiezza (pressione sonora) resta circa costante.

Questa variazione viene percepita come un cambiamento periodico di altezza (pitch).

2. NELLO SPETTROGRAMMA



i Nel tempo-frequenza (spettrogramma) la riga non è orizzontale: si muove su e giù in frequenza. Il colore indica l'intensità della componente.



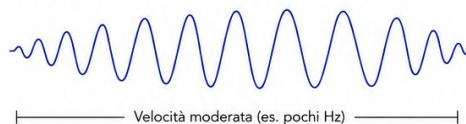
Il vibrato è una modulazione di frequenza periodica e lenta.

La frequenza aumenta e diminuisce regolarmente attorno a un valore centrale.

VELOCITÀ DEL VIBRATO E COLORE TIMBRICO DEL SUONO

VIBRATO LENTO (velocità moderata)

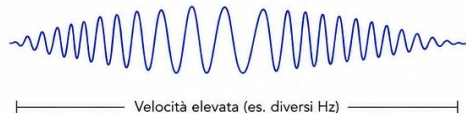
Percepito come variazione di altezza



Le oscillazioni variano lentamente: il vibrato è udito come un'oscillazione di altezza.

VIBRATO RAPIDO (velocità elevata)

Non percepito come variazione di altezza



Le oscillazioni variano rapidamente: il vibrato non è più percepito come altezza distinta.



Se la modulazione della frequenza diventa sufficientemente rapida, non viene più percepita come una variazione distinta di altezza, ma contribuisce al **colore timbrico** del suono.



IN SINTESI

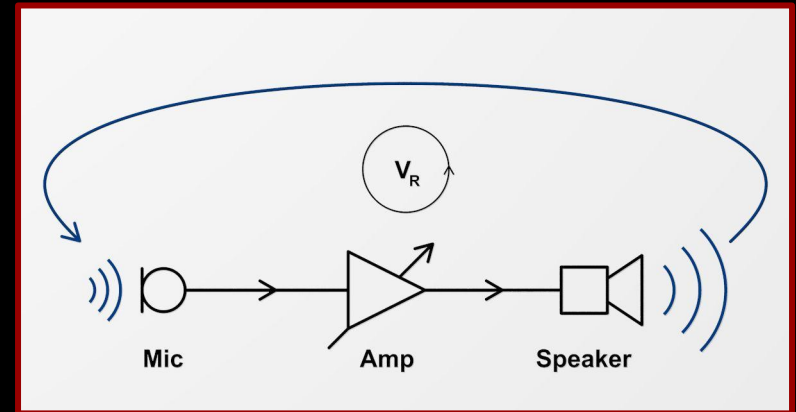
- Il **vibrato** è una variazione periodica e lenta della frequenza (modulazione di frequenza).
- A **velocità moderate** → è percepito come variazione di altezza (vibrato).
- A **velocità elevate** → non è più percepito come altezza, ma modifica il colore timbrico.
- Nel tempo-frequenza, la riga si muove periodicamente su e giù in frequenza.

I Am Sitting in a Room 1969 con successive versioni *Alvin Lucier* (1932-2021): *rendere udibile la risonanza*

<https://www.youtube.com/watch?v=bhtO4DsSazc>

L'idea è tanto semplice quanto radicale → si basa su un processo iterativo di registrazione e riproduzione:

1. Lucier registra la propria voce mentre legge un testo.
2. Riproduce la registrazione in una stanza.
3. Registra nuovamente il suono riprodotto.
4. Ripete il processo molte volte.



Ad ogni iterazione, le frequenze risonanti della stanza vengono enfatizzate, mentre le altre si attenuano. Il risultato è una progressiva trasformazione:

- da linguaggio articolato (parola comprensibile)
- a puro fenomeno sonoro (risonanze armoniche, quasi musicali)

Tecnicamente, è un esempio di:

- feedback acustico controllato (è il dispositivo che rende udibile la risonanza);
- filtraggio naturale dello spazio;
- auto-trasformazione del segnale attraverso il medium.

I Am Sitting in a Room: la valorizzazione segnico-artistica della risonanza

Dice il performer: «Sono seduto in una stanza diversa da quella in cui vi trovate ora.

Sto registrando il suono della mia voce parlante e lo riprodurrò di nuovo nella stanza, ancora e ancora, fino a che *le risonanze della stanza rinforzeranno se stesse così tanto che ogni parvenza del mio discorso, con forse l'eccezione del ritmo, sarà distrutta.*

Ciò che sentirete saranno le frequenze risonanti naturali della stanza articolate dal linguaggio. Considero questa attività non tanto come una dimostrazione di un fatto fisico, ma piuttosto come un modo per smussare ogni irregolarità che il mio modo di parlare potrebbe avere.»

Ruolo centrale della risonanza (focus acustico).

- La stanza agisce come sistema risonante.
- Le frequenze proprie vengono amplificate iterativamente.
 - Le altre frequenze vengono eliminate.
 - Emergenza dello spettro dello spazio.
 - *La risonanza è il principio generativo.*

Significato → la trasformazione dal linguaggio in suono puro con la perdita progressiva del contenuto semantico. Lo spazio/la stanza diventa udibile o acusticamente attiva. La voce individuale si trasforma e scompare, l'identità del parlante viene assorbita dal processo. La forma emerge attraverso la ripetizione nel tempo.

→ *Si tratta di un processo iterativo in cui la risonanza dello spazio seleziona e sostituisce il linguaggio, trasformando la voce in pura struttura acustica.*

LA LIRA DI HERMES

IL PRIMO STRUMENTO MUSICALE

Secondo il mito, Hermes inventò la lira usando un guscio di tartaruga e corde tese. Donò lo strumento ad Apollo, in segno di pace e armonia.

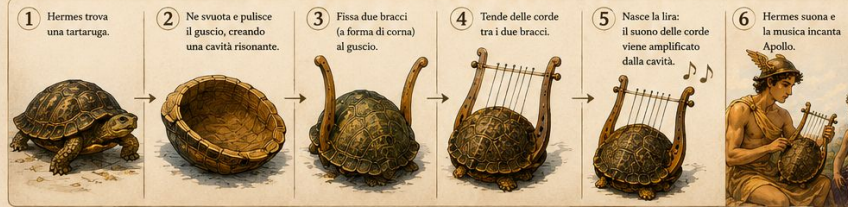
Dopo aver rubato le mandrie di Apollo, Hermes temeva la sua ira. Costruì allora uno strumento meraviglioso e, suonandolo, incantò il dio con la musica. La musica trasformò il conflitto in armonia.

La musica è il linguaggio che riconcilia.

Hermes suona la sua lira e Apollo, incantato, la accetta in dono. La musica unisce ciò che prima era in conflitto.



COME NASCE LA LIRA



IL PRINCIPIO ACUSTICO: LA CAVITÀ RENDE IL SUONO PIÙ FORTE E PIÙ RICCO

CORDA SOLA	CORDA + CAVITÀ RISONANTE	PERCHÉ SUONA?
Suono debole e poco udibile	Suono forte e pieno	
✗ La corda vibra ma sposta poca aria.	✓ La corda mette in vibrazione la cavità e l'aria interna.	Le corde vibrano quando vengono pizzicate.
✗ Il suono è debole e si disperde.	✓ La cavità entra in risonanza a certe frequenze (risonanze proprie).	✓ Le vibrazioni si trasmettono al corpo dello strumento e all'aria interna.
	✓ Il suono è amplificato e irradiato con maggiore efficacia.	✓ La cavità risonante rinforza selettivamente alcune frequenze di risonanza.
		✓ Il suono viene irradiato dal corpo dello strumento e dall'aria interna, ed è percepito più forte e più ricco.

DAL MITO ALLA SCIENZA MODERNA

La lira di Hermes è il primo esempio conosciuto di cassa armonica risonante: trasforma le piccole vibrazioni delle corde in un suono ampio, pieno e udibile.



LO STESSO PRINCIPIO OGGI



Tutti questi strumenti usano una cavità risonante per amplificare il suono delle corde.

IL SIGNIFICATO DEL MITO



DALLA NATURA ALLA MUSICA
Dalla forma della natura (il guscio) nasce l'arte che trasforma il mondo.



DALLA CONFLITTUALITÀ ALL'ARMONIA
La musica non è solo suono: è pace, bellezza e relazione.



UN'INTUIZIONE SENZA TEMPO
Il principio della risonanza, scoperto dal mito, è alla base di tutti gli strumenti musicali.



"Con la lira, Hermes insegnò agli uomini che il vuoto può far risuonare la bellezza."

