

Acustica

Lezione 5

*Battimenti, suoni di combinazione,  
banda critica e l'involuppo di  
ampiezza*

Luigi Manfrin

# *Interferenza*

- L'**interferenza** in fisica generale → è il fenomeno per cui due o più onde si sovrappongono nello stesso punto dello spazio e nello stesso istante, combinando le loro ampiezze in modo costruttivo o distruttivo.
- In acustica, l'**interferenza** → è la sovrapposizione di due o più onde sonore che, combinandosi, possono rafforzarsi, attenuarsi o annullarsi reciprocamente.

Si distinguono pertanto 2 casi fondamentali:

1. ***Interferenza costruttiva*** → le onde sono in *concordanza di fase*. Le ampiezze si sommano, aumentando l'intensità del suono.
2. ***Interferenza distruttiva*** → le onde sono in *opposizione di fase*. Le ampiezze si sottraggono, riducendo l'intensità del suono o annullandolo.

Tra questi due estremi esistono molti casi intermedi, determinati dalla differenza di fase e dalle ampiezze relative delle onde.

In fisica acustica → l'interferenza tra onde di frequenza vicina può generare i ***battimenti***, fenomeno che trova importanti applicazioni musicali.

## *I battimenti: interferenza e accordatura*

I *battimenti acustici* nell'accordatura del pianistica.

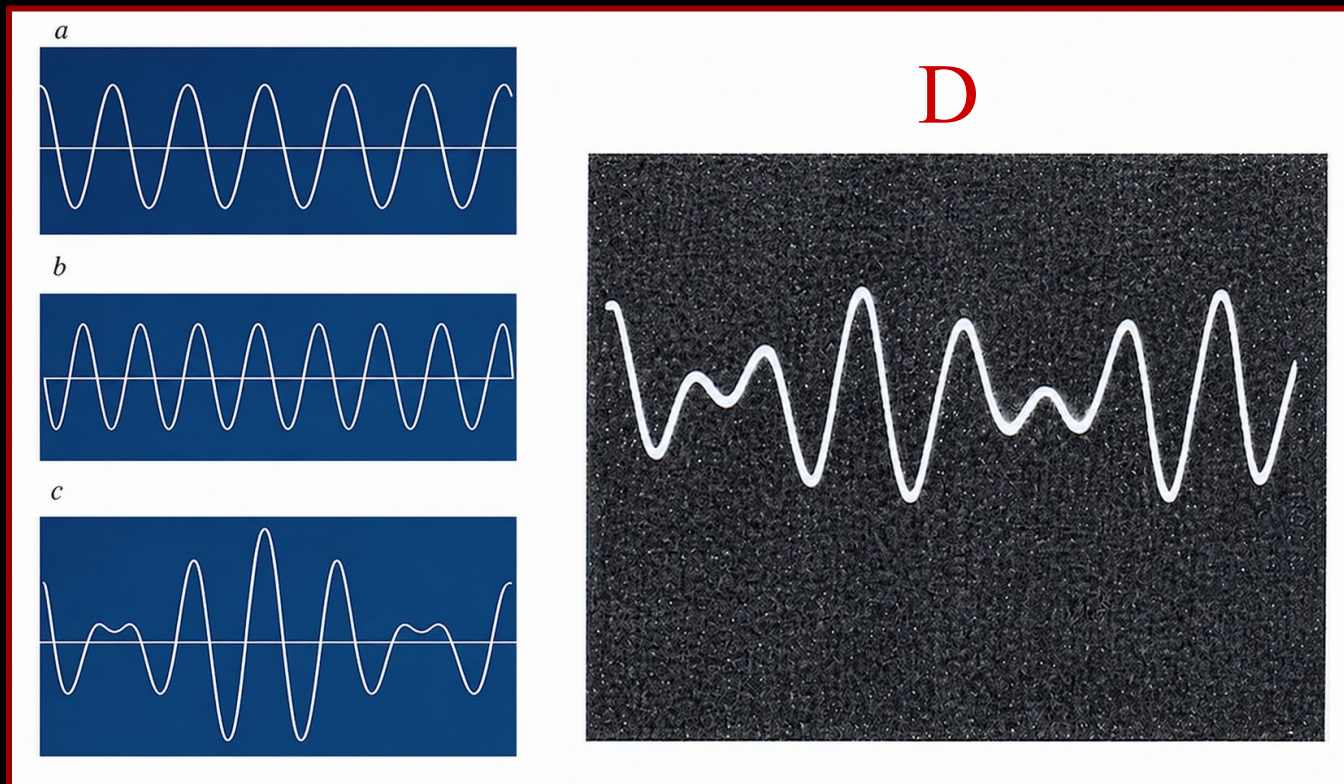
Un accordatore di pianoforti, quando accorda un'8va, regola progressivamente la tensione delle corde finché i battimenti diventano impercettibili.

→ Questo è il segnale che l'intervallo è correttamente accordato.

Cosa sono i battimenti? *Procediamo dalle sinusoidi.*

I *battimenti* prodotti in laboratorio (*sintetici*) → nascono dalla somma di due onde sinusoidali con frequenze molto vicine tra loro. La loro combinazione produce un'unica onda la cui ampiezza aumenta e diminuisce periodicamente.

- Dal punto di vista percettivo, non sentiamo due suoni distinti, ma un unico suono che pulsa, come se il volume oscillasse regolarmente → questo è il fenomeno del battimento.
- Più le due frequenze si avvicinano, più i battimenti diventano lenti. Quando infine le frequenze coincidono perfettamente, i battimenti scompaiono del tutto e il suono viene percepito come stabile, con ampiezza costante.



La figura mostra il fenomeno dei battimenti (sintetici). Le ampiezze di due onde sinusoidali (illustrate in A e B) le cui frequenze sono molto vicine si sommano producendo l'onda illustrata in C che assomiglia molto a un'onda sinusoidale di ampiezza lentamente variabile.

La fotografia di uno schermo di oscilloscopio in D mostra il battimento fra due altezze di 4000 e 4100 Hz. Quando la differenza di frequenza è piccola, l'effetto è quello di un'onda sinusoidale la cui intensità sale e scende. Come le frequenze delle due onde si avvicinano, la velocità con la quale l'ampiezza oscilla (la *frequenza del battimento*) decresce, finché, quando le frequenze sono uguali, scompare del tutto

# L'esempio dei due podisti: *un modello euristico dei battimenti*

## L'ESEMPIO DEI DUE PODISTI

Due podisti percorrono l'anello di una pista.  
Nel tempo in cui uno di loro compie **20 giri**,  
l'altro ne compie **24**.

Nello stesso intervallo di tempo:

- il più veloce (rosso) supererà l'altro **4 volte**;
- e **4 volte** si troveranno in punti opposti della pista.

Quando sono affiancati, le loro energie si sommano  
(**somma positiva**).

Quando sono in opposizione, la somma dà  
**risultato negativo**, come se le forze si contrastassero.

Questo rende evidente ciò che avviene in acustica  
quando due o più suoni di frequenza diversa  
si propagano contemporaneamente.



**Podista lento**

Compie 20 giri nel tempo T



**Podista veloce**

Compie 24 giri nello stesso tempo T

### COSA SUCCEDDE?

Nel tempo in cui il podista blu compie 20 giri,  
il podista rosso ne compie 24.

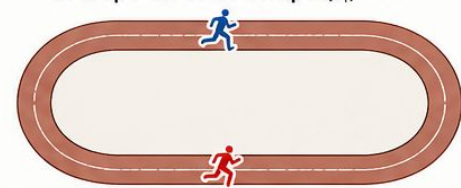
- Si incontrano (sono affiancati) **4 volte**.
- Si trovano in punti opposti **4 volte**.

1. Inizio ( $t = 0$ )



**Affiancati → somma positiva**  
(le energie si sommano)

2. Dopo un certo tempo ( $t_1$ )



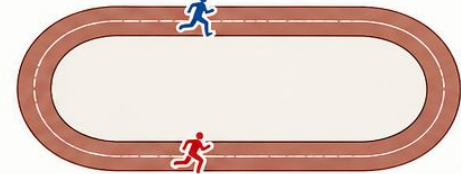
**In opposizione → somma negativa**  
(le energie si contrastano)

3. Dopo altro tempo ( $t_2$ )



**Affiancati → somma positiva**  
(il veloce ha superato il lento)

4. Dopo altro tempo ( $t_3$ )



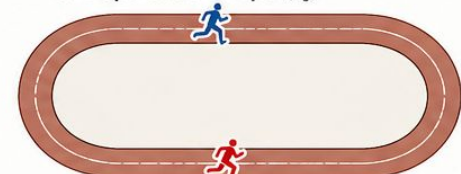
**In opposizione → somma negativa**

5. Dopo altro tempo ( $t_4$ )



**Affiancati → somma positiva**

6. Dopo altro tempo ( $t_5$ )



**In opposizione → somma negativa**

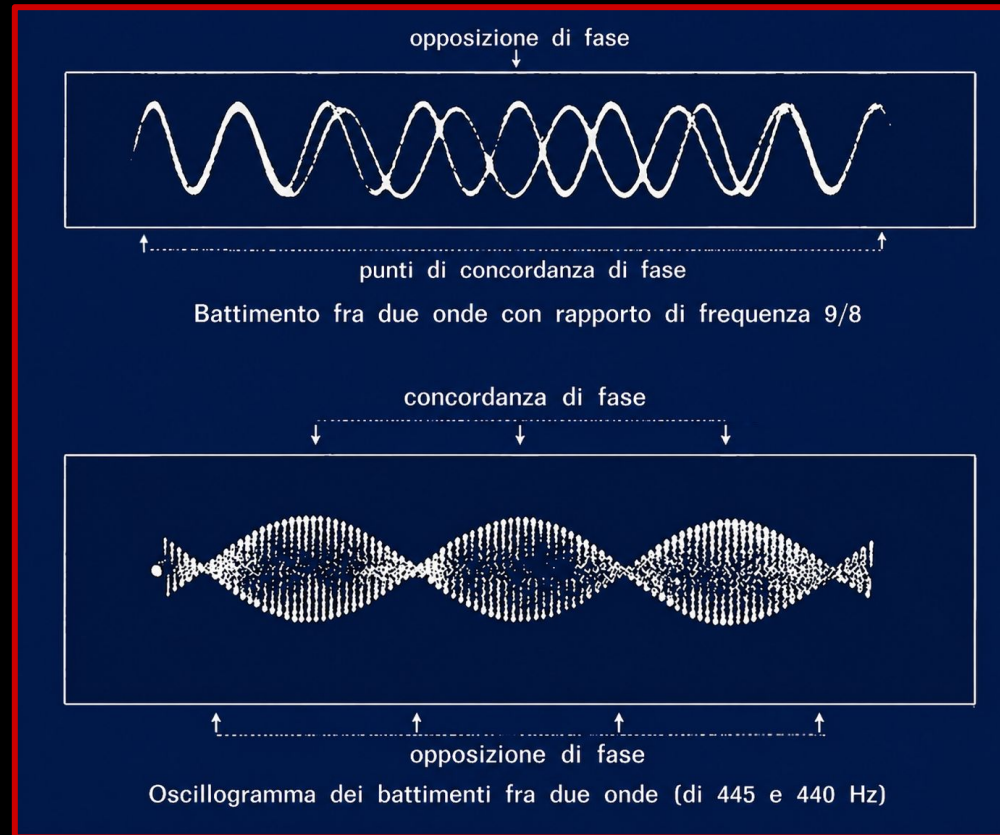
### RICHIAMO ACUSTICO

Quando due suoni di frequenza diversa si propagano insieme:

- in certe fasi si **sommano** (interferenza costruttiva) → risultato **positivo**;
- in altre si **oppongono** (interferenza distruttiva) → risultato **negativo**.

Questo fenomeno dà origine a effetti come i **battimenti**.

## *Battimenti: alternanza periodica di concordanza e opposizione di fase*



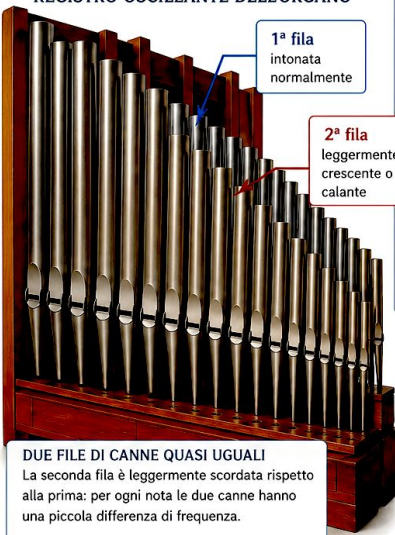
Nei punti di concordanza il suono si rinforza, in quelli di opposizione si attenua. Questa alternanza periodica di rinforzo e attenuazione genera una fluttuazione dell'intensità, detta **battimento**. Nella seconda figura in basso è mostrato l'oscillogramma della fluttuazione di ampiezza prodotta dal battimento tra due onde sinusoidali.

# *L'Unda maris: applicazione musicale del fenomeno dei battimenti*

Quando i battimenti sono lenti (circa 5–6 al secondo), possono produrre un effetto gradevole e dare al suono una particolare espressività. Per questo, nell'organo esistono registri appositi, come l'*Unda maris* o la *Voce celeste*, che sfruttano questo fenomeno.

## UNDA MARIS

REGISTRO OSCILLANTE DELL'ORGANO



1ª fila  
intonata  
normalmente

2ª fila  
leggermente  
crescente o  
calante

**DUE FILE DI CANNE QUASI UGUALI**  
La seconda fila è leggermente scordata rispetto alla prima: per ogni nota le due canne hanno una piccola differenza di frequenza.

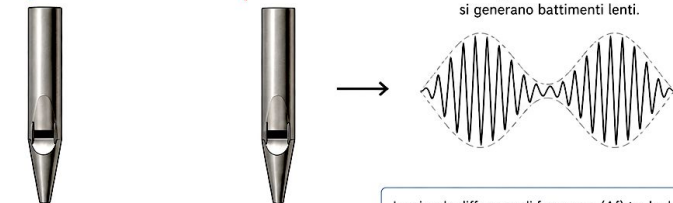
**UNDA MARIS** (lat. "onda del mare")  
È un registro oscillante dell'organo, normalmente di 8 piedi, formato da due file di canne quasi uguali: una intonata normalmente, l'altra leggermente crescente o calante. La piccola differenza di frequenza genera battimenti lenti, producendo il tipico effetto ondulante.

### PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

1ª fila  
frequenza  $f$

2ª fila  
frequenza  $f \pm \Delta f$

Sovrapposizione delle due onde:  
si generano battimenti lenti.



La piccola differenza di frequenza ( $\Delta f$ ) tra le due file genera battimenti lenti percepiti come un caratteristico effetto ondulante.

### EFFETTO SONORO

I battimenti lenti (circa 5–6 al secondo) producono un effetto ondulante e una particolare espressività sonora, simile al movimento delle onde del mare.



### 8 PIEDI: SIGNIFICATO



Il termine 8 piedi indica la lunghezza teorica della canna più grave del registro: circa 2,44 metri (8 piedi inglesi).  
Corrisponde all'altezza reale del registro, cioè all'unisono con la tastiera (nessuna trasposizione di ottava).

### DOVE È PIÙ EFFICACE

I battimenti risultano:

- meno gradevoli nei suoni molto gravi
- poco percepibili nelle ottave molto acute

La fascia di frequenze in cui l'effetto è più efficace è, in generale, compresa tra 150 e 1500 Hz.



I battimenti risultano invece meno gradevoli nei suoni molto gravi e poco percepibili nelle ottave molto acute. La fascia di frequenze in cui il loro effetto è più efficace è compresa, in generale, tra 150 e 1500 Hz.

## *Battimenti: frequenza e percezione*

1. *Frequenza dei battimenti* → è la differenza tra le due frequenze.

$$f_b = |f_1 - f_2|$$

Es. 550 Hz e 500 Hz → 50 battimenti al secondo.

2. L'orecchio:

- fino a circa 5–10 Hz → battimenti distinti e percepibili chiaramente;
- tra circa 10–20 Hz → percezione meno netta;
- oltre circa 20 Hz → il battimento tende a fondersi in una sensazione di *ruvidità/dissonanza*.

La *frequenza dei battimenti* dipende dalla differenza tra le frequenze dei due suoni.

I battimenti sono percepibili come pulsazioni distinte solo quando la differenza di frequenza è piccola. Se la frequenza dei battimenti aumenta troppo (oltre circa 15–20 al secondo), l'orecchio non li distingue più separatamente e il suono assume un carattere di ruvidità o dissonanza.

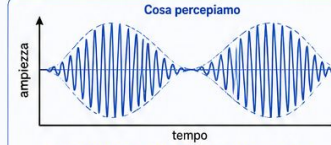
# 1 ESPERIENZA ACUSTICO-PERCETTIVA

Il fenomeno così come lo ascoltiamo



**Ascolto dei battimenti:**  
pulsazione, variazione periodica dell'ampiezza percepita, instabilità e "movimento" del suono.

**Esperienza soggettiva:**  
il suono cresce e diminuisce periodicamente.

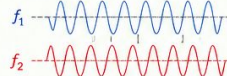


## 2 ANALISI FISICO-MATEMATICA

Costruiamo e misuriamo il fenomeno in laboratorio

Il battimento nasce dalla sovrapposizione di due onde sinusoidali di frequenza molto vicina.

Sovrapposizione di due onde sinusoidali



**Modello di partenza**

$$s_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1)$$

$$s_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t)$$

Onda risultante: ampiezza modulata (battimenti)

Esperimenti di laboratorio



**Sintesi di toni puri**  
con oscillatore o software.



**Analisi spettrale**  
(osserviamo le due frequenze nello spettro).



**Misurazione delle frequenze**  
e della loro differenza.



**Visualizzazione dell'onda risultante**  
e delle interferenze (oscilloscopio o software).

## 3 MODELLO TEORICO

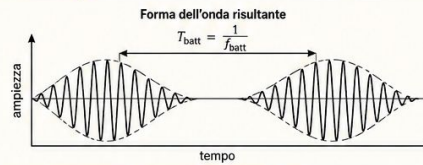
Spieghiamo con la fisica

L'interferenza tra due onde sinusoidali vicine in frequenza produce un'onda la cui ampiezza varia periodicamente.

**Frequenza del battimento**  
(numero di pulsazioni al secondo):

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

$$\text{Periodo del battimento: } T_{\text{batt}} = \frac{1}{|f_1 - f_2|}$$



Se  $f_1 = f_2$   
nessun battimento  
(assenza di battimenti percepibili: suono stabile)

Se  $f_1 \approx f_2$   
battimenti lenti  
(pulsazioni udibili)

Se  $f_1$  e  $f_2$  molto diverse  
pulsazioni troppo rapide  
per essere percepite

## 4 RITORNO AL FENOMENO SONORO

Comprendiamo e applichiamo

Il modello ci permette di interpretare e usare i battimenti nel mondo reale e in musica.



**Accordatura**

Regoliamo le frequenze finché i battimenti diventano impercettibili: l'intervallo è accordato.



**Dissonanza**

Battimenti lenti e percipibili producono tensione e instabilità percepita.



**Instabilità timbrica**

Nei suoni complessi, battimenti tra parziali vicini modulano il timbro nel tempo.



**Strumenti musicali**

Su corde, fiati e voci i battimenti sono parte essenziale del suono e dell'espressività.

Accordatura di un'ottava

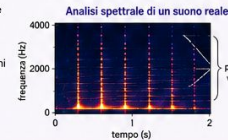


battimenti forti → battimenti impercettibili

Dissonanza tra due note



battimenti lenti → tensione percepita



**Esempio: violino**



Battimenti tra le parziali delle corde contribuiscono al timbro caratteristico.



**DAL FENOMENO ALLA COMPrensIONE:** ascoltiamo → modelliamo → spieghiamo → comprendiamo.  
La fisica dell'acustica ci permette di dare senso all'esperienza sonora e di usarla consapevolmente in musica.

Torniamo all'esperienza con nuova consapevolezza

Nuove domande e nuove ascolti alimentano il ciclo

## *Intonazione naturale e intonazione temperata*

**Intonazione naturale** (o giusta) → Si basa su rapporti semplici tra frequenze, derivati dalla serie armonica (2:1, 3:2, 4:3, 5:4). Questi rapporti favoriscono una maggiore coincidenza tra le parziali dei suoni, riducendo le interferenze. Conseguenze acustiche:

- maggiore stabilità sonora;
- minima presenza di battimenti;
- consonanza più pura.

Limite: il sistema non mantiene gli stessi rapporti in tutte le tonalità.

**Intonazione temperata** (temperamento equabile) → Divide l'ottava in 12 semitoni uguali, ciascuno definito dal rapporto costante:

$$2^{\frac{1}{12}} = \sqrt[12]{2} \approx 1.05946$$

Gli intervalli risultano leggermente modificati rispetto a quelli naturali, distribuendo uniformemente lo scarto. Conseguenze acustiche:

- possibilità di modulare in tutte le tonalità;
- maggiore equilibrio del sistema;
- presenza di lievi battimenti, dovuti allo scarto rispetto agli intervalli naturali.

Intonazione naturale → i battimenti tendono a ridursi.

Intonazione temperata → i battimenti sono accettati e distribuiti per garantire la funzionalità globale del sistema tonale.

## *Gli intervalli consonanti*

Alcuni intervalli sono detti consonanti perché le componenti, eseguite insieme, *con-suonano* in modo stabile e coerente, unendosi percettivamente. Questi intervalli corrispondono a rapporti semplici tra loro. La tabella mostra i principali intervalli consonanti, il loro rapporto ideale di frequenza e il numero di semitoni che li separa.

I rapporti consonantici  
puri

Temperati

| Nome dell'intervallo | Note (in chiave di Do maggiore) | Rapporto ideale di frequenza | Numero dei semitoni |
|----------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Ottava               | Do-Do                           | 2                            | 12                  |
| Quinta               | Do-Sol                          | $3/2$                        | 7                   |
| Quarta               | Do-Fa                           | $4/3$                        | 5                   |
| Terza maggiore       | Do-Mi                           | $5/4$                        | 4                   |
| Terza minore         | Mi-Sol                          | $6/5$                        | 3                   |
| Sesta maggiore       | Do-La                           | $5/3$                        | 9                   |
| Sesta minore         | Mi-Do                           | $8/5$                        | 8                   |

Intervalli consonanti, con l'ideale rapporto di frequenza e il numero di semitoni.

## *L'accordatura del pianoforte nel sistema temperato*

Accordare un pianoforte secondo i rapporti puri degli intervalli consonanti conduce all'*intonazione giusta*, ma non al *temperamento equabile*. In quest'ultimo, l'ottava è divisa in 12 semitoni uguali e gli intervalli, eccetto l'ottava, sono leggermente modificati rispetto ai rapporti armonici semplici, così da rendere possibile l'uso di tutte le tonalità con la stessa struttura intervallare.

Esempio. Do<sub>3</sub> = 264 Hz. Costruiamo una quinta pura (sol<sub>3</sub>), usando il rapporto  $3/2 \rightarrow 264 \cdot 3/2 = 396$  Hz. Da questo Sol<sub>3</sub> costruiamo un'altra quinta pura e otteniamo un Re<sub>4</sub> = 594 Hz. Riportandolo nell'ottava di base dividendo per 2  $\rightarrow 594/2 = 297$  Hz.

Ma nel sistema temperato, ogni semitono ha rapporto  $2^{1/12} = 1.059463094\dots$    
Perciò, il Re si calcola:  $Re = 264 (\text{Do}_3) \cdot 2^{2/12}$  [ossia  $264 \cdot 1.122462048\dots$ ]  $\approx 296.33$  Hz.

Quindi il Re puro o naturale (297 Hz) e il Re temperato (296,33 Hz) non coincidono. La differenza è piccola, ma si accumula lungo la costruzione della scala.

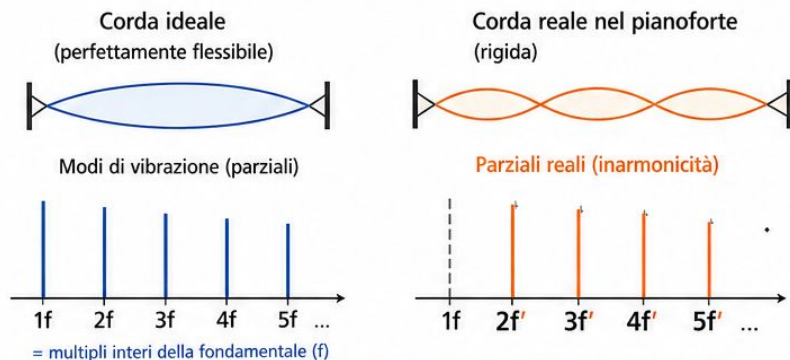
Gli accordatori professionisti accordano prima un'ottava campione nella zona centrale della tastiera, regolando le dodici note attraverso la velocità dei battimenti in intervalli di riferimento. Da questa ottava estendono poi l'accordatura al resto della tastiera, accordando le ottave per coincidenza dei suoni ed eliminazione dei battimenti. In questo modo lo scarto di intonazione si distribuisce uniformemente, rendendo praticabili tutte le tonalità.

## *Inarmonicità e stretch tuning nell'accordatura del pianoforte*

- Le corde del pianoforte non sono perfettamente flessibili: la loro rigidità fa sì che le armoniche superiori risultino leggermente più alte dei multipli interi della fondamentale (inarmonicità). In altre parole, il suono reale della corda non segue esattamente la serie armonica ideale.
- Nell'accordatura delle ottave si confrontano le armoniche corrispondenti (per esempio, la 2° armonica della nota grave con la fondamentale della nota acuta), regolando la tensione delle corde fino a eliminare i battimenti.
- Poiché queste armoniche sono leggermente “stirate”, anche la nota superiore deve essere accordata un po' più alta per farle coincidere: l'ottava risulta così leggermente più ampia del rapporto teorico 2:1.
- Da qui deriva lo *stretch tuning* → le ottave vengono accordate progressivamente più alzate, soprattutto nelle regioni estreme della tastiera, per compensare l'inarmonicità e contribuire alla brillantezza e all'equilibrio del suono.

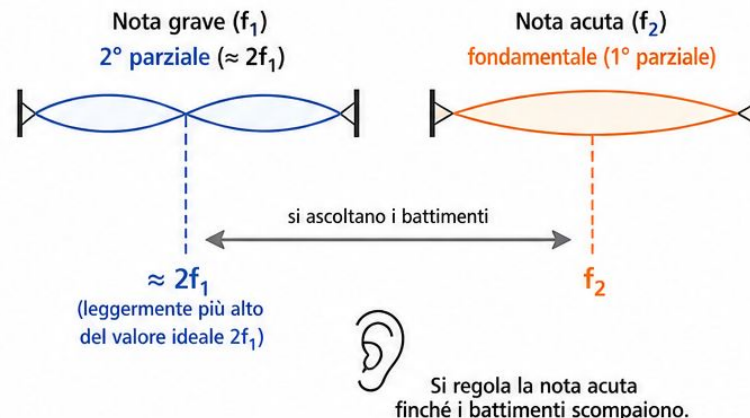
# Perché le ottave nel pianoforte sono leggermente "stirate" (stretch tuning)

## 1 INARMONICITÀ: i parziali superiori sono leggermente più alti dei multipli interi della fondamentale



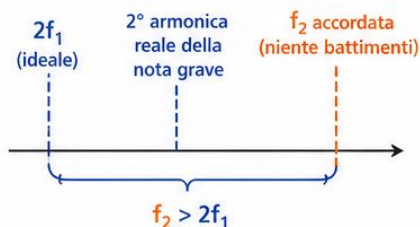
All'aumentare dell'ordine del parziale, lo scostamento dai multipli interi cresce.

## 2 ACCORDATURA DELL'OTTAVA: si confrontano i parziali corrispondenti



## 3 PERCHÉ L'OTTAVA RISULTA PIÙ AMPIA DI 2:1

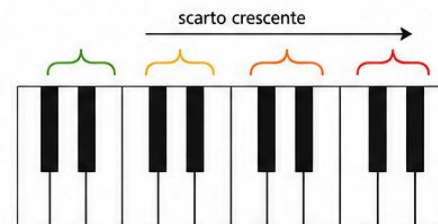
La 2° armonica reale della nota grave è leggermente più alta del valore armonico ideale  $2f_1$ .  
Per farla coincidere (eliminare i battimenti), la fondamentale della nota acuta ( $f_2$ ) deve essere accordata un po' più alta.



Quindi l'ottava reale è leggermente più ampia di 2:1.

## 4 STRETCH TUNING

Questo scarto aumenta andando verso le note più acute (corde più corte e rigide).  
→ Le ottave vengono quindi accordate **progressivamente** più "ampie".



✓ **Risultato:** si compensa l'inarmonicità e il suono risulta più **brillante** e **ricco**.



IN SINTESI



Parziali superiori leggermente più alti (inarmonicità)



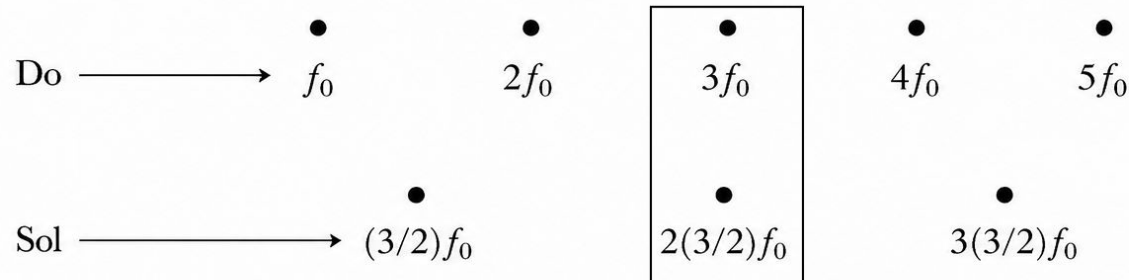
Confronto dei parziali corrispondenti ed eliminazione dei battimenti



Nota acuta accordata più alta → ottava più ampia di 2:1



Stretch tuning: ottave crescenti → suono più brillante e ricco



La figura mostra le armoniche di un Do di frequenza fondamentale  $f$  e di un Sol superiore di frequenza  $\frac{3}{2}f$  (quinta perfetta). Si vede che la terza armonica del Do coincide con la seconda armonica del Sol, perché:

$$3f = 2\left(\frac{3}{2}f\right)$$

Se Do e Sol non sono ben intonati, queste armoniche producono battimenti udibili. Quando i battimenti scompaiono, il Sol è accordato esattamente nel rapporto 3:2 rispetto al Do: si ottiene così una quinta perfetta.

Lo stesso principio vale per altri intervalli consonanti: una quarta ( $4/3$ ), dove la 3° armonica del Fa coincide con la 4° del Do; una terza maggiore ( $5/4$ ), dove la 4° armonica del Mi coincide con la 5° del Do; e una terza minore ( $6/5$ ), dove la 5° armonica della nota corrispondente coincide con la 6° armonica del Do.

In generale, l'assenza di battimenti tra armoniche coincidenti permette di ottenere una corretta intonazione degli intervalli consonanti.

## ***I suoni di combinazione***

I suoni di combinazione possono emergere quando due suoni vengono prodotti simultaneamente. Non corrispondono necessariamente ai suoni emessi direttamente dalla sorgente, ma possono essere generati dall'interazione tra le frequenze: da due suoni iniziali possono comparire nuovi suoni.

Due tipi principali.

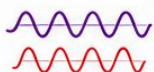
- ***Suoni differenziali*** → nascono dalla differenza tra le frequenze dei due suoni generatori. Sono più gravi dei suoni iniziali.
- ***Suoni somma*** → sono più acuti dei suoni iniziali e in genere meno evidenti.

Il fenomeno è complesso → una volta generato un nuovo suono, questo può a sua volta interagire con i suoni iniziali, producendo ulteriori combinazioni in cascata.

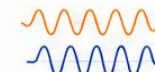
I suoni di combinazione possono avere una doppia origine:

- ***Fisica*** → possono nascere dall'interazione reale tra le onde sonore o dalla non linearità dello strumento.
- ***Fisiologica*** → possono nascere dal funzionamento interno dell'orecchio, soprattutto dalla *non linearità della coclea*.

I suoni di combinazione non sono né semplici fenomeni fisici, né semplici illusioni percettive. Sono fenomeni psicofisiologici: nascono dall'interazione tra il suono reale e il sistema uditivo. L'ascolto è un processo attivo, capace di generare nuove realtà sonore.



# SUONI DI COMBINAZIONE: DOPPIA ORIGINE



Quando due suoni interagiscono con un sistema **NON LINEARE**, possono nascere nuove frequenze chiamate suoni di combinazione. Queste frequenze non erano presenti nei suoni originali.

1

## ORIGINE FISICA

Nascono dalla **non linearità** del sistema fisico: strumenti, materiale, aria, diffusori, circuiti...

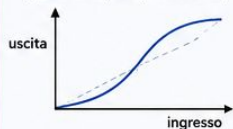
DUE SUONI IN INGRESSO



$f_1 = 440 \text{ Hz}$

$f_2 = 550 \text{ Hz}$

SISTEMA NON LINEARE  
(strumento, aria, diffusore...)



L'uscita non è proporzionale all'ingresso.

SEGNALI GENERATI  
= prodotti di combinazione

SUONI DIFFERENZIALI (più gravi)

$$f_d = |f_2 - f_1| = 110 \text{ Hz}$$



Nascono dalle interazioni non lineari tra le onde.

SUONI SOMMA (più acuti)

$$f_s = f_1 + f_2 = 990 \text{ Hz}$$



Di solito meno intensi dei suoni iniziali.

IL FENOMENO È COMPLESSO



Questi nuovi suoni possono interagire a loro volta con i suoni iniziali...

...generando ulteriori combinazioni in cascata.



Nella realtà fisica, la non linearità del sistema è ciò che genera frequenze di combinazione (differenza, somma e altre).

2

## ORIGINE FISIOLÓGICA

Nascono dalle non linearità del sistema uditivo, in particolare della coclea.

DUE SUONI IN INGRESSO



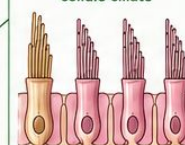
$f_1 = 440 \text{ Hz}$

$f_2 = 550 \text{ Hz}$

COCLEA: SISTEMA NON LINEARE



DETTAGLIO cellule ciliate



La risposta delle cellule ciliate non è proporzionale allo stimolo.

SEGNALI GENERATI DALL'ORECCHIO

SUONI DIFFERENZIALI (più gravi)

$$f_d = |f_2 - f_1| = 110 \text{ Hz}$$



Prodotti di combinazione generati dalla non linearità della coclea.

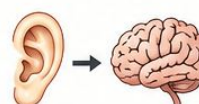
SUONI SOMMA (più acuti)

$$f_s = f_1 + f_2 = 990 \text{ Hz}$$

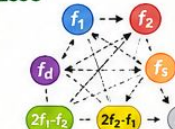


Di solito meno intensi dei suoni iniziali.

IL FENOMENO È COMPLESSO



Le frequenze generate possono interagire con gli stimoli originali e con altre frequenze...



...producendo ulteriori combinazioni percettive.



L'orecchio umano non è lineare: può generare frequenze di combinazione che non sono presenti fisicamente nello stimolo.



IN SINTESI

Due suoni puri



SISTEMA LINEARE



Si sentono solo  $f_1$  e  $f_2$ .

SISTEMA NON LINEARE



Compaiono nuove frequenze (differenza, somma e altre).

ORIGINE FISICA  
(strumenti, aria, diffusori, circuiti)



ORIGINE FISIOLÓGICA  
(coclea e sistema uditivo)



PERCEZIONE COMPLESSA



Più ricca, più articolata, più realistica.

❶ I suoni di combinazione sono fondamentali nella musica, nella percezione del timbro e nella comprensione del suono reale. ➔ Due origini diverse, un unico ascolto.

## Il *terzo suono* di *Giuseppe Tartini*

### La distinzione tra *interazione lineare* e *non lineare*

- L'organista **Georg Andreas Sorge** (1703–1778) osservò, intorno al 1740, probabilmente sull'organo, che dall'esecuzione simultanea di una quinta giusta emergeva un suono più grave, non appartenente ai due suoni originari (è stato uno dei primi a discuterlo in termini teorici).
  - Parallelamente, **Giuseppe Tartini** (1692–1770) aveva già osservato lo stesso fenomeno fin dal 1714 sul violino, ma lo pubblicò nel 1754 nel *Trattato di musica secondo la vera scienza dell'armonia*, introducendo la teoria del *terzo suono*.
- In acustica, il terzo suono → suono di combinazione o un tono di differenza:

$$f_3 = f_2 - f_1$$

Il terzo suono non nasce per semplice interferenza, ma per *interazione non lineare* tra due frequenze simultanee, nel sistema vibrante (strumento) o nel sistema uditivo (orecchio interno), generando una nuova frequenza assente nei suoni originari.

#### *Distinzione fondamentale in acustica*

*Interazione lineare* → semplice sovrapposizione di frequenze esistenti → produce *battimenti* (nessuna nuova frequenza) →  $f_b = f_1 - f_2$

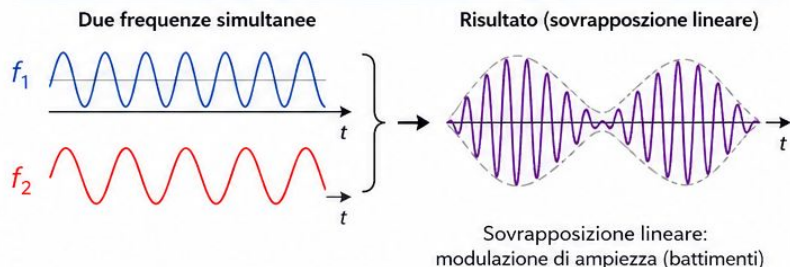
*Interazione non lineare* → genera nuove frequenze di combinazione → produce il terzo suono di Tartini.

# INTERAZIONE LINEARE vs INTERAZIONE NON LINEARE

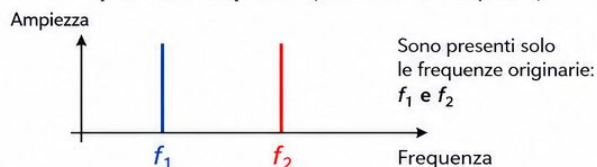
Due frequenze simultanee: confronto tra sovrapposizione lineare e interazione non lineare

## INTERAZIONE LINEARE

(sovrapposizione di frequenze)



### Spettro in frequenza (dominio delle frequenze)



Conseguenza acustica:

**nessuna nuova frequenza.**

Si percepiscono battimenti (variazione periodica di intensità).

**Interazione lineare → battimenti (modulazione di ampiezza)**

**Frequenza di modulazione (battimenti):  $f_b = |f_1 - f_2|$**

Non è una nuova frequenza dello spettro, ma la frequenza della modulazione.

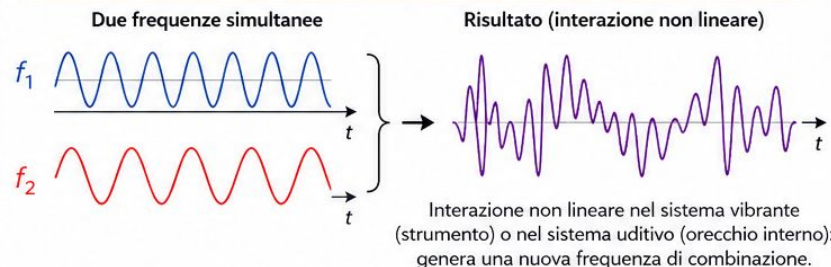
## INTERAZIONE LINEARE



- Sovrapposizione lineare (principio di sovrapposizione).
- Nessuna nuova frequenza nello spettro.
- Effetto percepito: battimenti (modulazione di ampiezza).

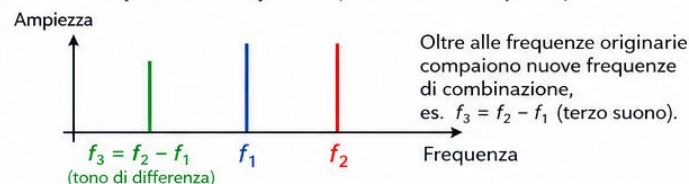
## INTERAZIONE NON LINEARE

(generazione di frequenze di combinazione)



**Tono di differenza (terzo suono):  $f_3 = f_2 - f_1$**

### Spettro in frequenza (dominio delle frequenze)



Conseguenza acustica:

**si genera una nuova frequenza di combinazione**  
(reale o percepita): terzo suono di Tartini.

**Interazione non lineare → generazione di frequenze di combinazione**

**Tono di differenza (terzo suono):  $f_3 = f_2 - f_1$**

## INTERAZIONE NON LINEARE

- Interazione non lineare del sistema (strumento o orecchio).
- Generazione di frequenze di combinazione.
- Effetto percepito: terzo suono di Tartini (tono di differenza).



Nota: i battimenti derivano da interferenza lineare tra frequenze vicine. Il terzo suono deriva da interazione non lineare che genera nuove frequenze di combinazione.

## *Battimenti*

Se due frequenze vicine  $f_1$  e  $f_2$  si sovrappongono:  $\Delta f = |f_2 - f_1|$

Se  $\Delta f$  è piccolo  $\rightarrow$  l'orecchio non separa i due toni e percepisce una sola *altezza media* con *modulazione d'ampiezza*: i *battimenti*. La frequenza del battimento è:  $f_b = |f_2 - f_1|$

### *Dal battimento alla ruvidità*

Aumentando  $\Delta f \rightarrow$  i battimenti diventano rapidi e oltre una certa soglia non sono più contabili, diventano *ruvidità (roughness)*. Questo avviene dentro la *banda critica*  $\rightarrow$  la regione in cui due frequenze interagiscono fortemente nella stessa regione cocleare.

### *Il tono di differenza (terzo suono)*

Quando due suoni sono emessi simultaneamente, la non linearità del sistema uditivo (coclea) o dello strumento stesso può generare una nuova componente alla frequenza di differenza: il tono di differenza (o terzo suono, noto come tono di Tartini).  $f_3 = f_2 - f_1$

Matematicamente, battimenti e tono di differenza dipendono dalla stessa differenza di frequenza. Percettivamente, però, sono fenomeni diversi: nei battimenti si percepisce una pulsazione d'intensità dovuta all'interferenza tra due frequenze vicine; nel tono di differenza si percepisce invece una nuova altezza, generata dalla non linearità del sistema uditivo (o talvolta dello strumento).

## *Battimento e suono differenziale*

Soglia orientativa di percezione

0 – 15 Hz circa → Percezione prevalente di battimento

Il suono pulsa: si percepiscono oscillazioni periodiche di intensità.

15 – 20 Hz circa → Zona di transizione

Il battimento accelera e la percezione diventa meno distinta.

Oltre 20 – 30 Hz circa → Possibile percezione del suono differenziale

La differenza tra le frequenze può essere percepita come una nuova altezza sonora.

Idea chiave. La differenza fondamentale non è matematica, ma percettiva.

Battimento → variazione periodica dell'intensità.

Suono differenziale → comparsa di una nuova altezza percepita.

Nota importante.

Queste soglie sono orientative e possono variare in base all'intensità del suono, al timbro, al registro e alla sensibilità dell'ascoltatore.

## *Il suono differenziale nella serie armonica*

Se due suoni appartengono alla stessa serie armonica, il loro suono differenziale può appartenere alla stessa serie.

Come si individua? Si sottrae il numero d'ordine delle due armoniche.  
Il risultato indica l'armonica differenziale.

Esempio 1.

Suoni generatori: 27<sup>a</sup> armonica, 19<sup>a</sup> armonica, differenza:  $27 - 19 = 8$   
Il suono differenziale corrisponde alla 8<sup>a</sup> armonica.

Esempio 2.

Il bicordo di Tartini. Suoni generatori: 3<sup>a</sup> armonica, 2<sup>a</sup> armonica, differenza:  $3 - 2 = 1$   
Il suono differenziale corrisponde alla fondamentale della serie.

Da due armoniche superiori può emergere il suono fondamentale.

*Questo vale solo se i due suoni appartengono alla stessa serie armonica.*

Il tono differenziale può rendere udibile una fondamentale assente (*missing fundamental*), o almeno rafforzarne la percezione.

## *Battimenti, ruvidità e banda critica nella consonanza e nella dissonanza*

Riprendiamo l'accordatore di pianoforte.

I *battimenti* e l'*asprezza* (*ruvidità*) → fenomeni fondamentali per la consonanza e l'armonia. Nell'accordatura, il tecnico regola gli intervalli controllando i battimenti: in alcuni casi cerca di eliminarli, in altri di ottenere una precisa velocità di battimento, caratteristica del temperamento.

*Hermann von Helmholtz* → cercò di spiegare consonanza e dissonanza soprattutto in termini di battimenti e ruvidità. Secondo lui → un intervallo è consonante quando tra le parziali vi sono pochi o nessun battimento; al contrario, negli intervalli dissonanti alcune parziali sono così vicine da produrre battimenti rapidi e ruvidità, percepiti come dissonanza.

Il lavoro di *Reinier Plomp* (1976) e di altri → ha mostrato che la spiegazione di Helmholtz è troppo semplice.

I battimenti lenti non producono dissonanza, ma vengono percepiti come una modulazione periodica dell'intensità (tremolo). Aumentando la distanza tra due frequenze sinusoidali, i battimenti diventano più rapidi fino a non essere più distinguibili come pulsazioni; in questa regione si avverte una sensazione di asprezza (*roughness*), che costituisce una componente importante della dissonanza.

*La gamma di frequenze entro cui si percepiscono battimenti o asprezza è chiamata larghezza di banda critica.*

## Dai battimenti alla ruvidità: la **banda critica**

La **banda critica** comprende l'intera regione di forte interazione tra due frequenze vicine, e dentro questa regione possono manifestarsi sia i **battimenti** sia la **ruvidità**.

Più precisamente:

- differenza molto piccola → battimenti lenti, percepiti come pulsazioni distinte ( $\approx$  tremolo);
- differenza maggiore → le modulazioni diventano più rapide e non sono più distinguibili separatamente; la sensazione diventa ruvidità (roughness);
  - vicino al limite della banda critica → la ruvidità raggiunge il massimo;
- oltre la banda critica → l'interazione diminuisce, i due suoni vengono percepiti distintamente e l'asprezza si attenua.

Quindi:

i battimenti sono la forma lenta dell'interazione; la ruvidità è la forma rapida dell'interazione. Entrambe appartengono alla stessa regione: la banda critica.

In forma schematica, dentro la banda critica

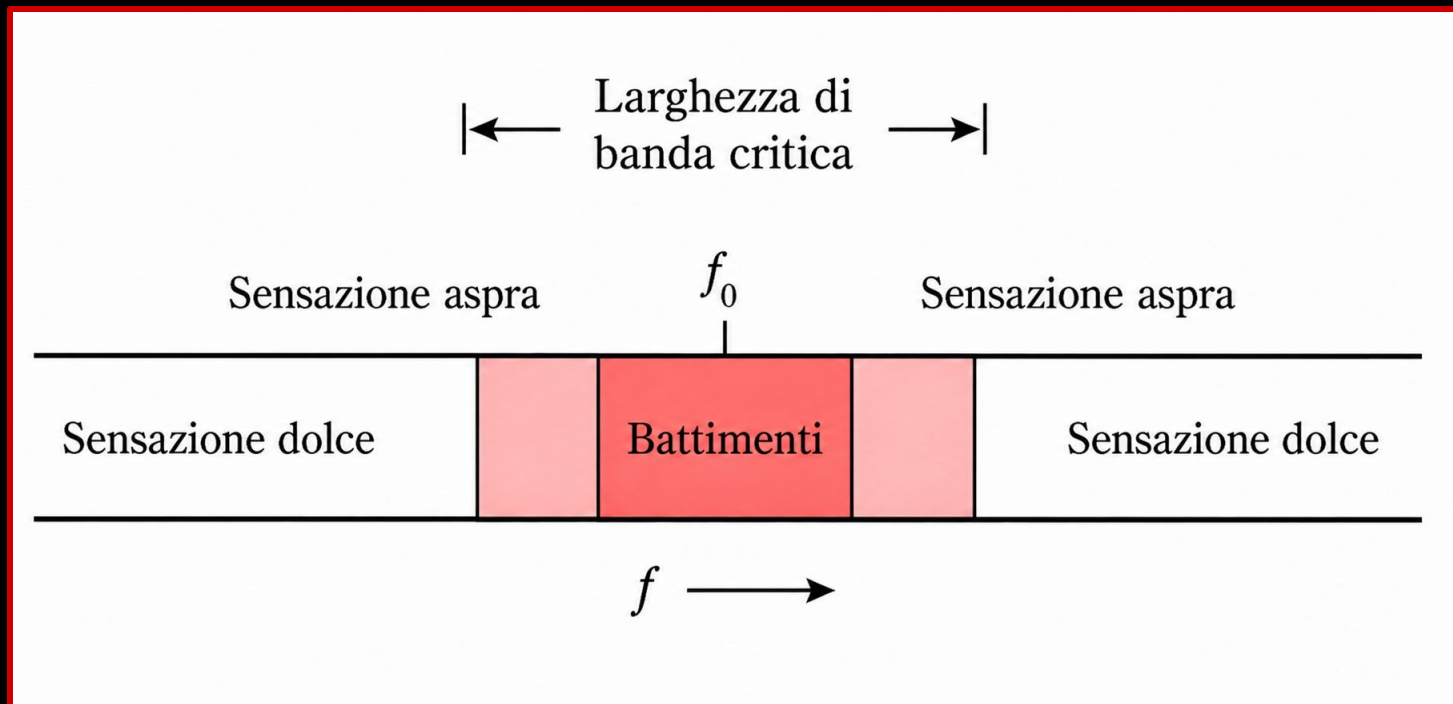
battimenti → ruvidità

oltre la banda critica

separazione percettiva dei due suoni + diminuzione della ruvidità.

Due suoni puri (onde sinusoidali) con frequenze molto vicine danno luogo ai battimenti: si percepisce una modulazione periodica dell'ampiezza. Aumentando la distanza tra le frequenze, i battimenti diventano più rapidi fino a trasformarsi in una sensazione di asprezza (roughness). Se la distanza aumenta ancora, superando la banda critica, i due suoni vengono percepiti distintamente e la sensazione torna più dolce.

Si immagini un suono puro di frequenza  $f_0$  e un secondo suono di frequenza variabile  $f$ . Se  $f$  varia da valori molto inferiori a  $f_0$  a valori molto superiori, la percezione attraversa simmetricamente diverse regioni: sensazione dolce, asprezza, battimenti (in prossimità di  $f_0$ ), di nuovo asprezza e infine ancora sensazione dolce.



# LA LARGHEZZA DI BANDA CRITICA

La larghezza di banda critica (B.C.) è la gamma di frequenze entro la quale due suoni interagiscono fortemente. Fuori da questa gamma, l'interazione diminuisce e i suoni vengono percepiti più distintamente.

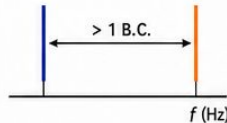
## 1. ANALOGIA CON LA RADIO

L'orecchio analizza i suoni suddividendoli in bande di frequenza, in modo analogo a una sintonizzazione selettiva.



## 2. INTERAZIONE TRA DUE FREQUENZE ( $f_0$ = frequenza di riferimento)

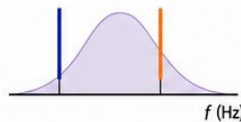
Frequenze molto distanti (separate da più di 1 B.C.)



Percezione:  
due suoni distinti  
(sensazione dolce)



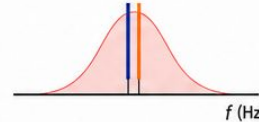
Frequenze vicine ma non coincidenti (entro la B.C.)



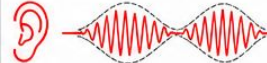
Percezione:  
asprezza (ruvidità)



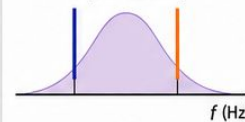
Frequenze quasi coincidenti (differenza molto piccola)



Percezione:  
battimenti (pulsazioni lente)



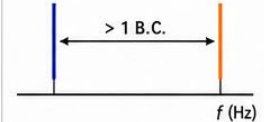
Frequenze vicine ma non coincidenti (entro la B.C.)



Percezione:  
asprezza (ruvidità)



Frequenze molto distanti (separate da più di 1 B.C.)

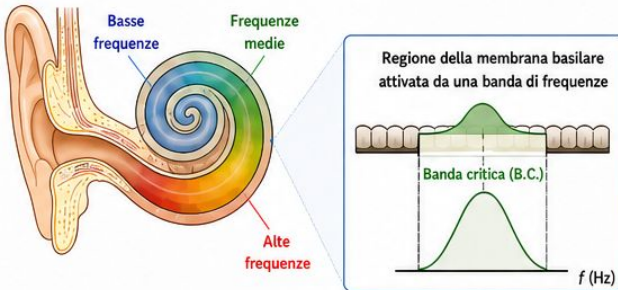


Percezione:  
due suoni distinti  
(sensazione dolce)



$f$  molto più bassa di  $f_0$  ← fuori dalla B.C. — entro la B.C. — vicinissimo a  $f_0$  (dentro la B.C.)  $f \approx f_0$  — entro la B.C. — fuori dalla B.C. →  $f$  molto più alta di  $f_0$

## 3. L'ORECCHIO ANALIZZA LE FREQUENZE

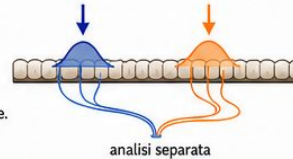


La membrana basilare è organizzata in modo tonotopico: ogni posizione risponde a una diversa frequenza.

## 4. COME L'ORECCHIO "RISOLVE" LE FREQUENZE

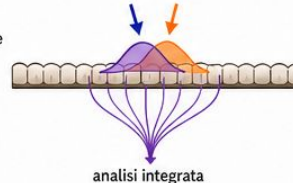
Distanza > 1 B.C.

Attivazione di regioni diverse della membrana basilare  
→ analisi (codifica) separata  
→ suoni percepiti distintamente.



Distanza < 1 B.C.

Attivazione della stessa regione della membrana basilare  
→ analisi (codifica) integrata  
→ interazione percettiva (battimenti, ruvidità, mascheramento).



## 5. EFFETTI DELLA BANDA CRITICA SULLA PERCEZIONE



**Intensità percepita:**

l'integrazione energetica entro la banda critica influenza il volume percepito.



**Timbro:**

la distribuzione dell'energia nelle bande critiche determina il colore del suono.



**Rumore:**

la distribuzione del rumore nelle bande critiche ne influenza la percezione.



**Mascheramento (copertura):**

un suono può mascherare un altro se cadono nella stessa banda critica.

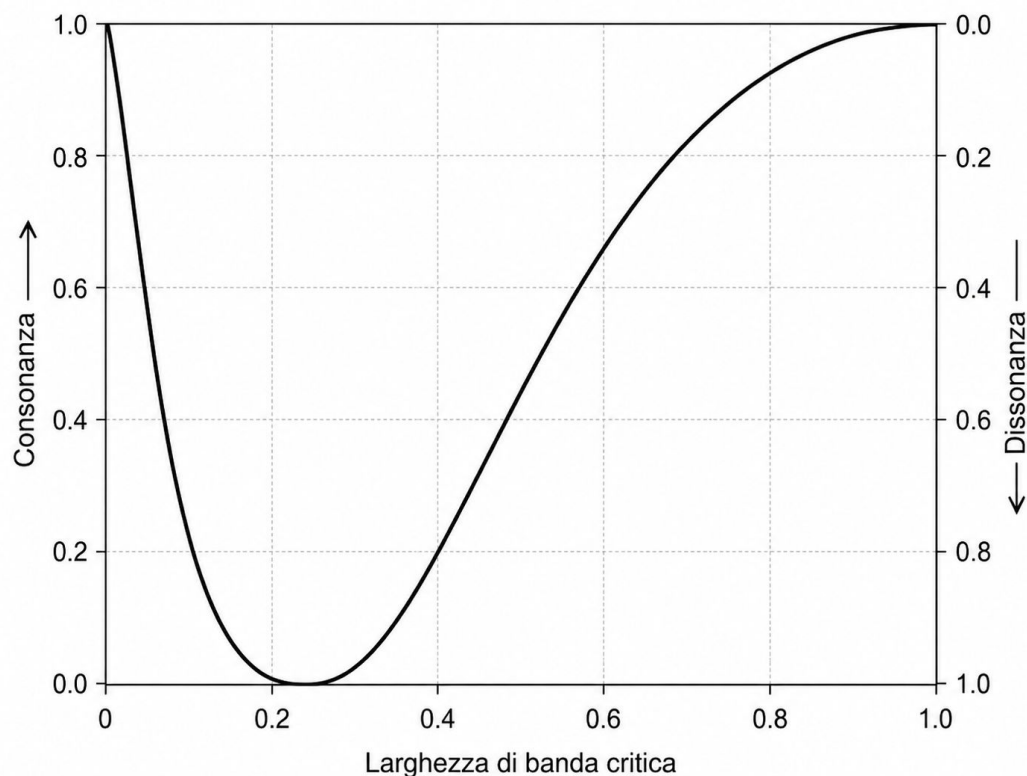
## IN SINTESI

La larghezza di banda critica è il limite frequenziale entro cui due componenti interagiscono fortemente. All'interno della B.C. si percepiscono battimenti o ruvidità e avvengono integrazione percettiva, mascheramento e altre interazioni. Fuori dalla B.C. l'interazione diminuisce e i suoni vengono percepiti più distintamente.

# La relazione tra distanza frequenziale e dissonanza sensoriale

Nel grafico si osserva che la massima dissonanza si verifica quando la distanza tra le frequenze di 2 suoni puri è pari a circa  $1/4$  della larghezza di banda critica.

Per separazioni maggiori, la ruvidità diminuisce progressivamente; oltre la larghezza di banda critica, i due suoni vengono percepiti sempre più distintamente e la sensazione tende verso una maggiore consonanza.



La Curva rappresenta la consonanza sensoriale (e inversamente la dissonanza) di due suoni *puri* in funzione della differenza tra le loro frequenze, espressa come frazione della larghezza di banda critica. L'accordo è più consonante quando la differenza è molto piccola (battimenti lenti) o uguale o superiore alla larghezza di banda critica; la massima dissonanza si verifica a circa  $1/4$  della banda critica. Le scale verticali indicano consonanza e dissonanza (da 0 a 1), mentre la scala orizzontale rappresenta la differenza di frequenza in frazioni della banda critica.

# BANDA CRITICA, INTERVALLI E PERCEZIONE: DAI BATTIMENTI ALLA RUVIDITÀ

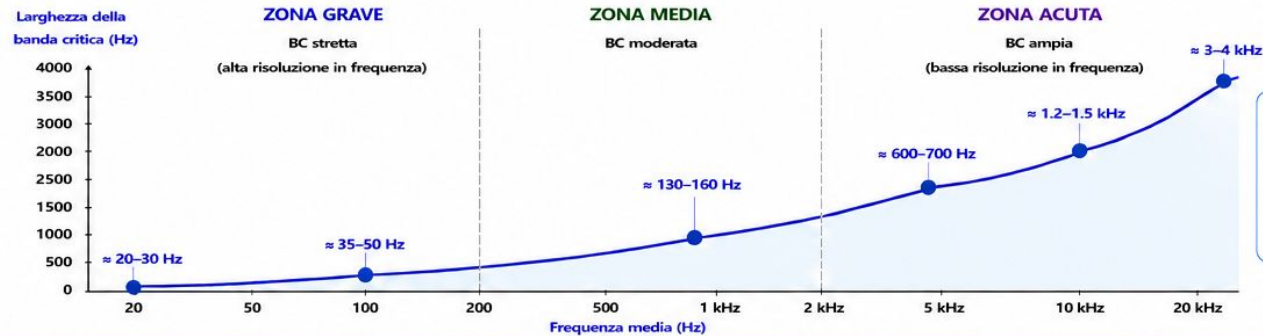
La banda critica si allarga con la frequenza: la stessa distanza musicale produce interazioni diverse nei vari registri

## AVVERTENZA IMPORTANTE

Tutti i grafici mostrano il comportamento di DUE SINUSOIDI PURE in interazione.

La curva descrive la RUVIDITÀ (roughness) che nasce dall'interazione cocleare, INDIPENDENTEMENTE dal riconoscimento percettivo dell'intervallo musicale.

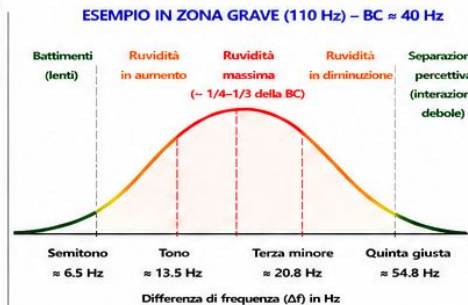
Nei suoni acustici complessi (strumenti reali, voci) entrano in gioco armonicità, involucri temporali, mascheramento, contesto tonale e apprendimento musicale: la percezione armonico-musicale può risultare molto diversa dalla ruvidità predetta solo dalla banda critica.



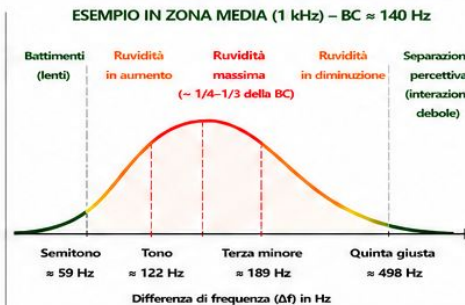
All'aumentare della frequenza, la BC si allarga: servono distanze sempre maggiori per uscire dalla banda critica.

## INTERAZIONE TRA DUE SINUSOIDI PURE ALL'INTERNO DELLA BANDA CRITICA

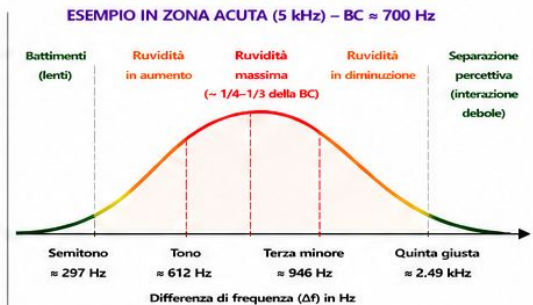
Alta (dissonanza)  
↑  
Ruvidità (roughness)  
↓  
Bassa (consonanza)



BC stretta: anche intervalli piccoli (semitono, tono, terza minore) possono stare dentro la BC e produrre ruvidità. La posizione del picco di ruvidità è entro la BC, circa a 1/4-1/3 della sua larghezza.



BC moderata: il semitono e il tono sono dentro o sul bordo della BC e producono ruvidità; la terza minore è oltre il limite e la quinta giusta è molto oltre, con interazione quasi nulla. Il picco di ruvidità è circa a 1/4-1/3 della BC.



BC ampia: molti intervalli (fino al tono) stanno ancora dentro la BC e i due suoni si percepiscono distintamente. Il picco di ruvidità è circa a 1/4-1/3 della BC. Dalla terza minore in poi gli intervalli tendono a uscire dalla BC.

## LEGENDA

- Battimenti (lenti) (pulsazioni distinte)
- Ruvidità in aumento (battimenti più rapidi)
- Ruvidità massima (modulazioni troppo rapide per essere distinte)
- Ruvidità in diminuzione (interazione che cala)
- Separazione percettiva (interazione debole)

## SINTESI DEL FENOMENO (DUE SINUSOIDI PURE)



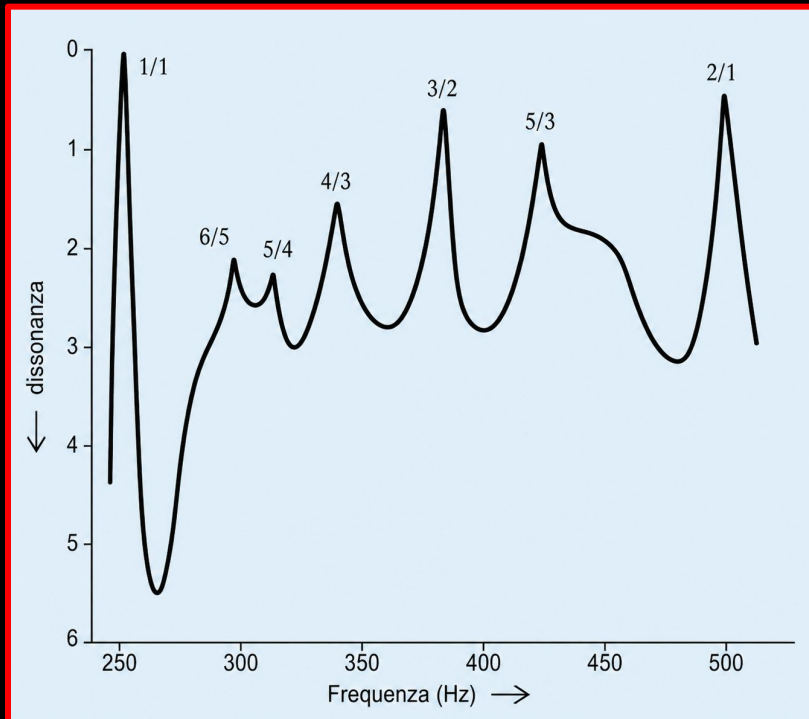
**RICORDA:** Il grafico descrive l'interazione cocleare tra due SINUSOIDI PURE. Nei suoni reali la percezione armonica dipende anche dall'involuppo temporale, mascheramento, contesto tonale e apprendimento musicale: intervalli che producono ruvidità tra sinusoidi pure (es. terza minore nei gravi) possono risultare musicalmente stabili nei suoni complessi.



## IDEA CHIAVE

La banda critica cresce con la frequenza. Per questo, la stessa distanza musicale (in Hz) produce interazioni diverse nei vari registri.

## *Dalla dissonanza alla consonanza: differenziazione percettiva di due suoni complessi*



Conoscendo la larghezza di banda critica, è possibile stimare la consonanza (o dissonanza sensoriale) di due suoni complessi, ciascuno formato da una fondamentale e sei armoniche, in funzione della distanza tra le loro frequenze fondamentali. La curva della figura deriva da questo calcolo. La fondamentale del suono grave è fissata a 250 Hz, mentre quella del suono acuto varia da poco meno di 250 Hz fino a poco più di 500 Hz (cioè un'ottava sopra). I minimi di dissonanza (massimi di consonanza) corrispondono ai principali intervalli consonanti tradizionali: 1/1 (unisono), 6/5 (terza minore), 5/4 (terza maggiore), 4/3 (quarta), 3/2 (quinta), 5/3 (sesta maggiore), 2/1 (ottava). disposti più apertamente.

L'ottava, il caso più evidente → se indichiamo con  $f$  la fondamentale del suono grave (qui 250 Hz), le sue armoniche sono  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ,  $5f$ ,  $6f$ ,  $7f$ ,  $8f$ , mentre quelle del suono all'ottava superiore sono  $2f$ ,  $4f$ ,  $6f$ ,  $8f$ ,  $10f$ . In questo modo molte armoniche coincidono, e le altre risultano sufficientemente distanziate, riducendo battimenti e ruvidità.

## *Perché la quinta è l'intervallo più consonante dopo l'ottava*

Dopo l'ottava, la quinta è l'intervallo tradizionalmente più consonante.

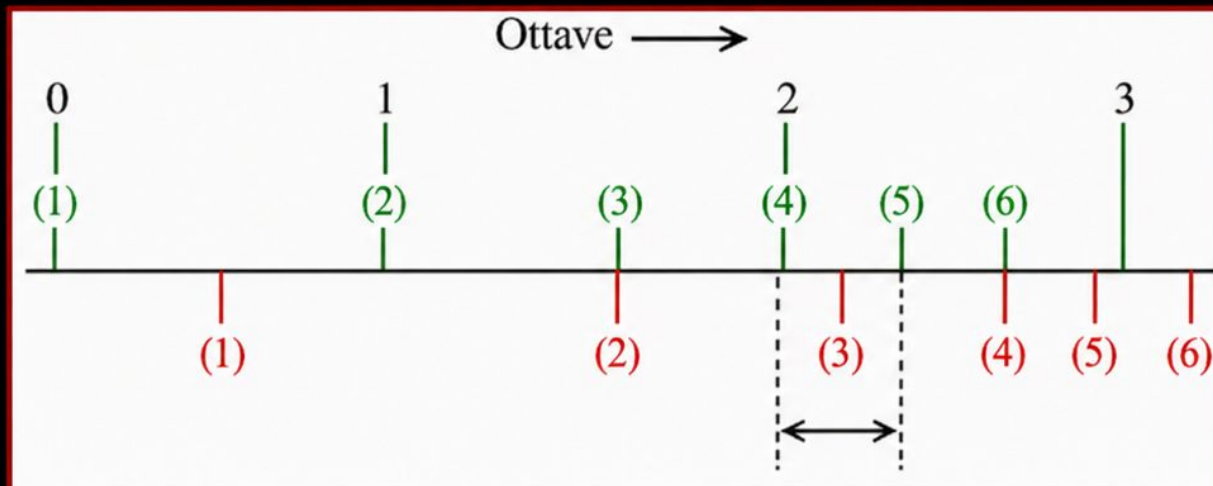
La figura mostra perché.

L'asse orizzontale → la distanza tra le frequenze espressa in ottave.

Un'ottava corrisponde al rapporto 2:1.

Una quinta corrisponde al rapporto 3:2 (circa metà ottava).

Le armoniche della nota grave → sopra l'asse, quelle della nota acuta sotto. Alcune armoniche coincidono esattamente (per esempio la 2<sup>a</sup> della nota acuta con la 3<sup>a</sup> della nota grave, la 4<sup>a</sup> con la 6<sup>a</sup>), riducendo battimenti e ruvidità; le altre restano abbastanza distanziate da non produrre forte dissonanza. Questo spiega l'elevato grado di consonanza della quinta.



## *Corrispondenze armoniche e consonanza*

The image displays two systems of musical notation, each consisting of a bass staff and a treble staff. The notation illustrates harmonic correspondences and consonance between the two systems. Arrows indicate the mapping of notes between the staves.

**System 1 (Top):**

- Bass Staff:** Notes include G<sub>2</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, D<sub>3</sub>, E<sub>3</sub>, F<sub>3</sub>, G<sub>3</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, D<sub>4</sub>, E<sub>4</sub>, F<sub>4</sub>, G<sub>4</sub>, A<sub>4</sub>, B<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>.
- Treble Staff:** Notes include G<sub>4</sub>, A<sub>4</sub>, B<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, D<sub>5</sub>, E<sub>5</sub>, F<sub>5</sub>, G<sub>5</sub>, A<sub>5</sub>, B<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, D<sub>6</sub>, E<sub>6</sub>, F<sub>6</sub>, G<sub>6</sub>, A<sub>6</sub>, B<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>.
- Arrows:** Connect corresponding notes between the two staves, showing a perfect octave relationship (e.g., G<sub>2</sub> to G<sub>4</sub>, A<sub>2</sub> to A<sub>4</sub>, etc.).

**System 2 (Bottom):**

- Bass Staff:** Notes include G<sub>2</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, D<sub>3</sub>, E<sub>3</sub>, F<sub>3</sub>, G<sub>3</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, D<sub>4</sub>, E<sub>4</sub>, F<sub>4</sub>, G<sub>4</sub>, A<sub>4</sub>, B<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>.
- Treble Staff:** Notes include G<sub>4</sub>, A<sub>4</sub>, B<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, D<sub>5</sub>, E<sub>5</sub>, F<sub>5</sub>, G<sub>5</sub>, A<sub>5</sub>, B<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, D<sub>6</sub>, E<sub>6</sub>, F<sub>6</sub>, G<sub>6</sub>, A<sub>6</sub>, B<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>.
- Arrows:** Connect corresponding notes between the two staves, showing a perfect octave relationship (e.g., G<sub>2</sub> to G<sub>4</sub>, A<sub>2</sub> to A<sub>4</sub>, etc.).

## *La forma del suono nel tempo: l'inviluppo d'ampiezza*

1. Con la trasformata di Fourier (3<sup>a</sup> lezione) abbiamo visto che un suono può essere analizzato come somma di componenti sinusoidali. Ma questa descrizione mostra quali frequenze sono presenti, non come evolvono nel tempo.
2. Con i battimenti abbiamo visto che due frequenze vicine non introducono nuove frequenze, ma producono una variazione periodica dell'ampiezza. Il tempo entra così nella percezione del suono come pulsazione energetica.
3. Con il tono di differenza abbiamo visto come dalla combinazione di due suoni può emergere una nuova componente frequenziale. Il suono non è solo somma, ma anche generazione.
4. I battimenti e i suoni differenziali mostrano fenomeni temporali locali. Ora dobbiamo iniziare a considerare la forma complessiva del suono: come nasce, si sviluppa e si estingue.
5. *L'inviluppo d'ampiezza* descrive il profilo globale dell'ampiezza nel tempo: l'attacco, il regime stazionario e l'estinzione.
6. Con la risonanza (4<sup>o</sup> lezione) abbiamo visto quali frequenze un sistema seleziona e amplifica. Ora, con l'inviluppo vedremo come queste frequenze prendono forma nel tempo. È qui che il problema del timbro inizia a chiarirsi più profondamente.

Ogni fenomeno fisico, che implica un trasferimento di energia, richiede un tempo finito per trasformarsi. Così anche un suono non passa istantaneamente dal silenzio alla massima ampiezza, ma attraversa una fase iniziale di crescita: il *transitorio di attacco*. Quando l'energia cessa, il suono si estingue gradualmente: il *transitorio di estinzione*.



La figura schematizza in 4 fasi l'evoluzione nel tempo dell'ampiezza di un suono.

- Attacco (**attack**) → fase iniziale: l'ampiezza cresce progressivamente da zero fino al valore massimo;
- Decadimento (**decay**) → fase successiva in cui l'ampiezza diminuisce fino a raggiungere un livello di stabilizzazione;
- Costanza (**sustain**) → fase in cui l'ampiezza si mantiene relativamente stabile per la durata del suono;
- Estinzione (**release**) → fase finale in cui l'ampiezza decresce gradualmente fino al silenzio.

L'andamento dell'ampiezza di picco di un suono (la linea ideale che unisce i massimi della sua forma d'onda) → l'*inviluppo d'ampiezza* (o inviluppo del suono).

## *L'inviluppo d'ampiezza e il ruolo dei transitori*

1. L'inviluppo rappresenta, a livello macroscopico, l'evoluzione dell'ampiezza di un suono nel tempo, collegando idealmente i suoi picchi (massimi).
2. La forma d'onda descrive tutte le variazioni istantanee dell'ampiezza (micro-livello). L'inviluppo, invece, ne mostra soltanto il profilo globale (macro-livello).
3. Non tutti i suoni seguono lo schema ADSR completo: in alcuni casi può mancare la fase di decadimento (*decay*) o quella di costanza (*sustain*). Esempio, nel pianoforte non smorzato, dopo l'attacco il suono passa direttamente alla fase di estinzione. In questi casi, nella terminologia inglese, la fase finale è talvolta indicata come *decay* anziché *release*; in italiano si usa generalmente il termine estinzione.
4. L'andamento dei transitori, soprattutto del transitorio d'attacco, è essenziale nella percezione e riconoscimento del timbro. Suoni con strutture spettrali diverse possono talvolta essere percepiti come simili se presentano transitori simili. Viceversa, suoni con struttura spettrale simile possono essere percepiti come molto diversi se differiscono nel loro andamento transitorio.

## *Esempi di inviluppo: flauto, tromba, pianoforte*

**Flauto** → L'inviluppo è caratterizzato da un attacco relativamente rapido, seguito da una lieve flessione iniziale (legata all'articolazione del colpo di lingua), da una fase di relativa stabilità e da un'estinzione piuttosto rapida.

**Tromba** → Particolarmente caratteristico è il transitorio d'attacco della tromba (e più in generale degli strumenti a bocchino), spesso segnato da un doppio attacco, dovuto alla complessa messa in vibrazione delle labbra e della colonna d'aria.

**Pianoforte** → L'inviluppo del pianoforte presenta un attacco molto rapido, seguito da un decadimento ad andamento approssimativamente esponenziale.

**Pianoforte smorzato** → L'azione degli smorzatori interrompe anticipatamente la vibrazione delle corde, abbreviando la fase di decadimento e accelerando l'estinzione del suono.



## *Esempi di inviluppo: violino, contrabbasso, organo e Wood block*

**Violino** → Attacco relativamente rapido, seguito da una fase di stabilità e da un'estinzione anch'essa rapida. La continuità dell'arco permette di sostenere e controllare il suono.

**Contrabbasso** → Dotato di corde di massa maggiore, oppone una maggiore inerzia meccanica nella messa in vibrazione e nell'estinzione. Per questo i transitori di attacco e di estinzione risultano generalmente più lenti rispetto al violino.

**Organo** → Attacco e estinzione molto rapidi, poiché l'emissione sonora dipende dall'apertura e chiusura immediata del flusso d'aria. Tuttavia, il riverbero dell'ambiente (spesso ecclesiastico) prolunga il suono contribuendo alla percezione timbrica.

**Wood block** → Attacco impulsivo e brevissimo, seguito da una rapida estinzione. L'assenza di una vera fase di sustain ne accentua il carattere percussivo.

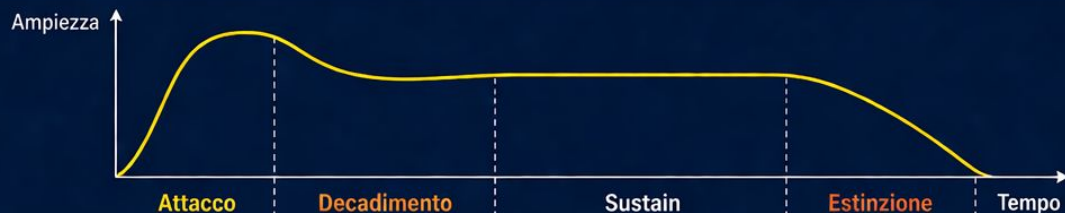


Il confronto evidenzia come il timbro dipenda non solo dalla struttura spettrale, ma anche dalla diversa temporalità dei transitori e dell'estinzione.

# I TRANSITORI: VARIAZIONI DI AMPIEZZA, ALTEZZA E SPETTRO

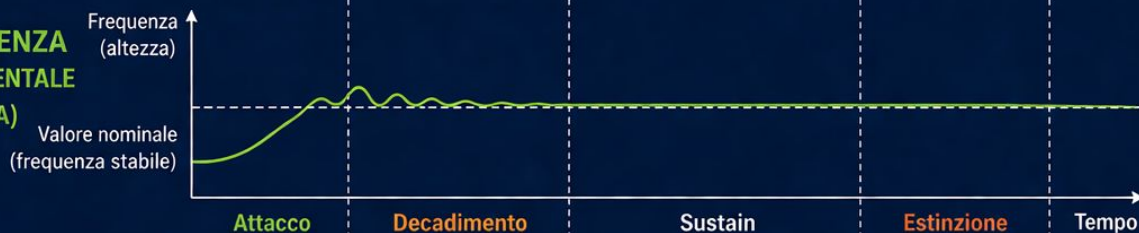
Nei transitori dei suoni di strumenti acustici varia soprattutto l'ampiezza, ma anche – in misura minore – la **frequenza fondamentale (altezza)** e la **distribuzione armonica (spettro)**.

## 1. AMPIEZZA (INVILUPPO)



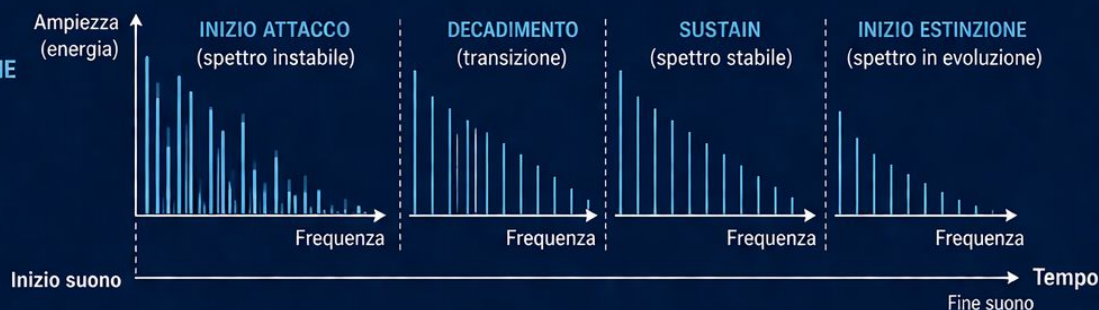
L'ampiezza cresce rapidamente nell'**attacco**, può diminuire durante il **decadimento**, rimane pressoché costante nella fase di sustain e diminuisce nell'**estinzione**.

## 2. FREQUENZA FONDAMENTALE (ALTEZZA)



Durante l'attacco la frequenza fondamentale è **inizialmente instabile**: spesso parte leggermente **più bassa**, può oscillare intorno al valore nominale, quindi si **stabilizza** su di esso. In estinzione rimane generalmente stabile.

## 3. SPETTRO (DISTRIBUZIONE ARMONICA)



All'inizio dell'attacco la distribuzione armonica è instabile e può contenere molte componenti alte. Durante il decadimento e il sustain lo spettro si stabilizza. Nell'estinzione la distribuzione armonica **si modifica progressivamente** (in modi diversi a seconda dello strumento).

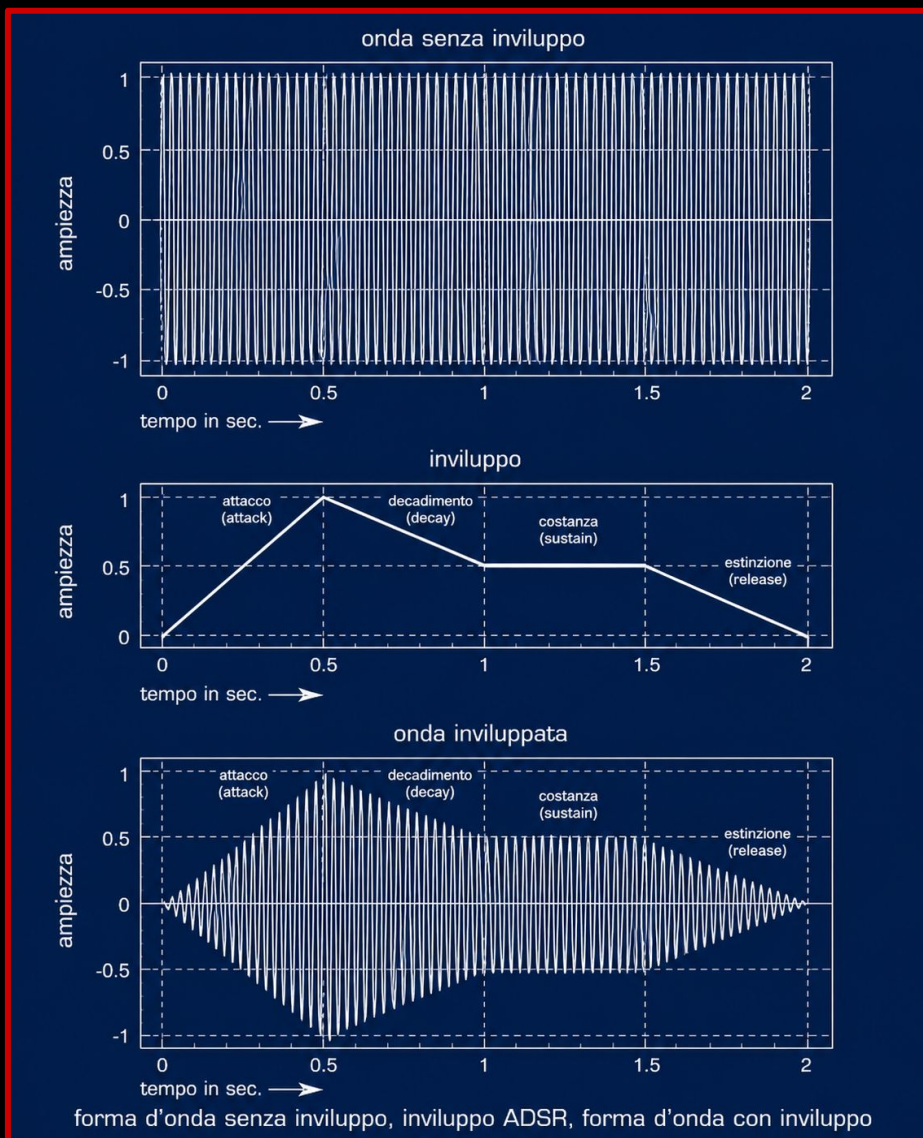


**OSSERVAZIONE:** Nei transitori non è solo l'ampiezza a cambiare, ma anche la frequenza fondamentale (altezza) e la distribuzione armonica. Queste variazioni – sebbene in misura minore – sono importanti per la percezione del timbro e per il riconoscimento degli strumenti.

— Ampiezza (inviluppo)  
— Frequenza fondamentale (altezza)  
— Spettro (distribuzione armonica)

Per realizzare al computer una variazione dell'ampiezza di un suono nel tempo - cioè un inviluppo - occorre definire una funzione di controllo (per esempio composta da segmenti lineari o esponenziali) e applicarla al segnale sonoro.

Nella sintesi digitale, l'inviluppo è generalmente rappresentato come una successione di segmenti collegati tra loro. Anche questi segmenti sono descritti come sequenze di valori numerici (campioni), analogamente al segnale audio, e vengono utilizzati per modulare nel tempo l'ampiezza del suono.



## *Inviluppi lineari e inviluppi esponenziali*

Le diverse fasi (ADSR) dell'involuppo digitale possono essere realizzate mediante segmenti lineari, cioè successioni di valori in cui l'incremento (o il decremento) tra un campione e il successivo rimane costante (come nella slide precedente).

Tuttavia, un andamento lineare non sempre permette di modellare in modo realistico il comportamento dei suoni naturali. Per questo, nella sintesi digitale si utilizzano spesso segmenti curvilinei, soprattutto esponenziali, che descrivono variazioni più progressive o più rapide nel tempo.

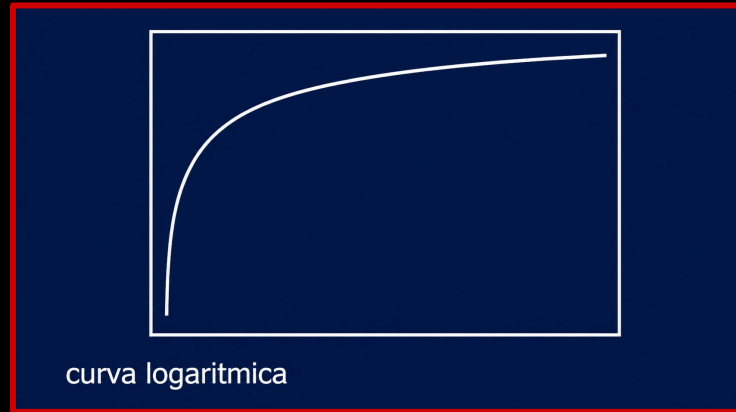
In una curva esponenziale di crescita, l'incremento tra valori successivi aumenta progressivamente; in una curva esponenziale di decadimento, invece, la diminuzione è inizialmente rapida e poi rallenta gradualmente. Questo tipo di andamento si avvicina spesso meglio al comportamento fisico reale dei sistemi vibranti.



curva esponenziale

## *Curve logaritmiche nell'inviluppo*

L'andamento logaritmico → una crescita inizialmente rapida che rallenta progressivamente: l'incremento tra valori successivi diventa via via minore, e la curva tende gradualmente ad appiattirsi.



L'inviluppo di molti suoni reali è spesso formato da segmenti curvilinei, soprattutto esponenziali e talvolta logaritmici (es., percussioni e corde pizzicate). Anche nella sintesi digitale si usano inviluppi di questo tipo per avvicinarsi al comportamento dei suoni naturali.



# CURVA ESPONENZIALE

Matematicamente, una **curva esponenziale** è descritta da una funzione in cui la variabile compare all'esponente di una costante positiva (detta base).

La forma generale è:

$$y = a^x$$

dove:

- $a$  è la base (costante positiva, con  $a > 0$  e  $a \neq 1$ );
- $x$  è la variabile.

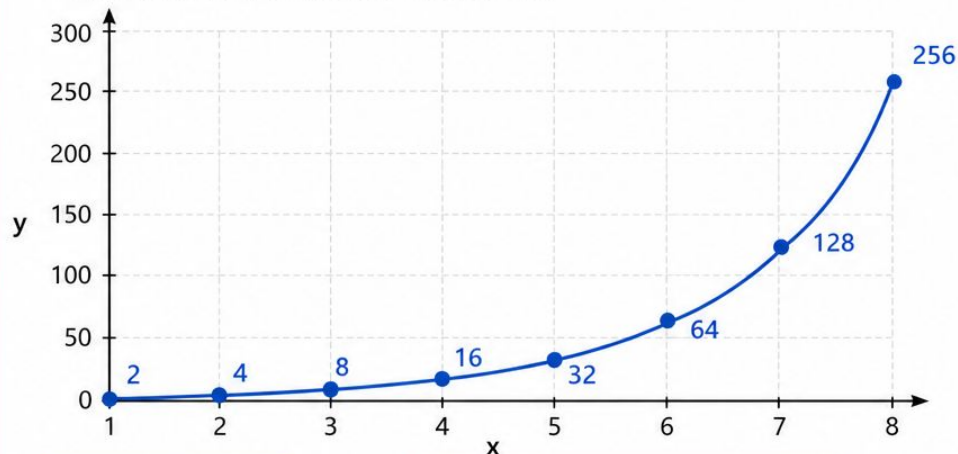
Questo significa che, aumentando di una unità il valore di  $x$ , il valore di  $y$  viene ogni volta moltiplicato per la stessa costante.

Per esempio, se la **base è 2**:

| $x$ | Calcolo | $y = 2^x$ | Valore di $y$ |
|-----|---------|-----------|---------------|
| 1   | $2^1$   | 2         | 2             |
| 2   | $2^2$   | 4         | 4             |
| 3   | $2^3$   | 8         | 8             |
| 4   | $2^4$   | 16        | 16            |
| 5   | $2^5$   | 32        | 32            |
| 6   | $2^6$   | 64        | 64            |
| 7   | $2^7$   | 128       | 128           |
| 8   | $2^8$   | 256       | 256           |

Si osserva così che i valori **crescono sempre più rapidamente**: questa è la caratteristica fondamentale dell'andamento esponenziale.

Come si può osservare, all'aumentare di  $x$  i valori di  $y$  crescono sempre più rapidamente: questa accelerazione della crescita è caratteristica dell'andamento esponenziale.



In questo esempio:

$$a = 2$$
$$y = 2^x$$

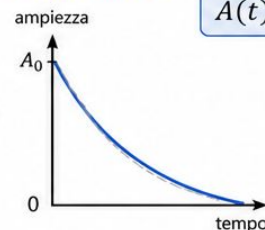


Per ogni aumento di 1 unità in  $x$ , il valore di  $y$  viene moltiplicato per 2.

È questo il motivo per cui i valori crescono sempre più rapidamente.

## INVILUPPO D'AMPIEZZA ESPONENZIALE

Molti fenomeni fisici, compresi i suoni, presentano un decadimento esponenziale. L'ampiezza diminuisce nel tempo secondo una legge esponenziale.



$$A(t) = A_0 e^{-kt}$$

$A_0$  = ampiezza iniziale  
 $k$  = costante di decadimento ( $k > 0$ )  
 $t$  = tempo  
 $e$  = costante di Eulero (circa 2,71828)  
La base  $e$  è un numero irrazionale e appare naturalmente in molti fenomeni di crescita o decadimento continuo.

Ogni intervallo di tempo uguale riduce l'ampiezza della stessa proporzione.

La **curva logaritmica** si definisce invece come

$$y = \log_a x$$

Ovvero, per calcolare il valore di  $y$  per ciascun valore di  $x$  dobbiamo calcolare il logaritmo in base  $a$  di  $x$ .

Il logaritmo  $\log_a x$  indica a quale esponente bisogna elevare la base  $a$  per ottenere il valore  $x$  (con  $a > 0$ ,  $a \neq 1$  e  $x > 0$ ).

Utilizzando sempre la costante 2, abbiamo:

$x = 1$ ;  $y = \log_2 1 = 0$  (perché  $2^0 = 1$ )  
 $x = 2$ ;  $y = \log_2 2 = 1$   
 $x = 3$ ;  $y = \log_2 3 \approx 1.585$   
 $x = 4$ ;  $y = \log_2 4 = 2$   
 $x = 5$ ;  $y = \log_2 5 \approx 2.322$   
 $x = 6$ ;  $y = \log_2 6 \approx 2.585$   
 $x = 7$ ;  $y = \log_2 7 \approx 2.807$   
 $x = 8$ ;  $y = \log_2 8 = 3$

| $x$ | Calcolo    | $y = \log_2 x$ | Valore di $y$ |
|-----|------------|----------------|---------------|
| 1   | $\log_2 1$ | 0              | 0             |
| 2   | $\log_2 2$ | 1              | 1             |
| 3   | $\log_2 3$ | 1.585          | 1.585         |
| 4   | $\log_2 4$ | 2              | 2             |
| 5   | $\log_2 5$ | 2.322          | 2.322         |
| 6   | $\log_2 6$ | 2.585          | 2.585         |
| 7   | $\log_2 7$ | 2.807          | 2.807         |
| 8   | $\log_2 8$ | 3              | 3             |

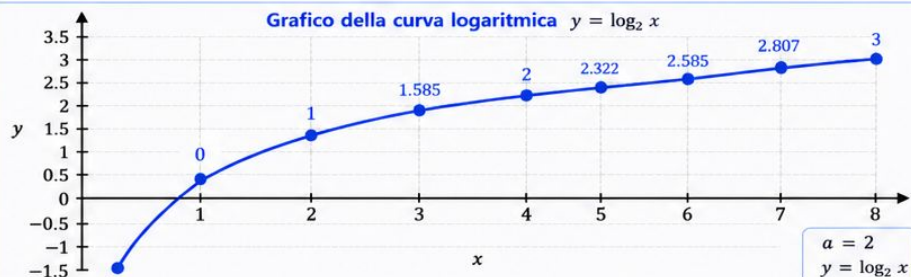
#### Interpretazione:

$y = \log_a x$  indica l'esponente  $a$  cui bisogna elevare la base  $a$  per ottenere  $x$ .

Esempio:  $\log_2 8 = 3$  perché  $2^3 = 8$

Dominio:  $x > 0$

Come si può osservare, all'aumentare di  $x$  i valori di  $y$  continuano a **crescere**, ma **sempre più lentamente**: il ritmo della crescita diminuisce progressivamente, che è la caratteristica dell'andamento logaritmico.



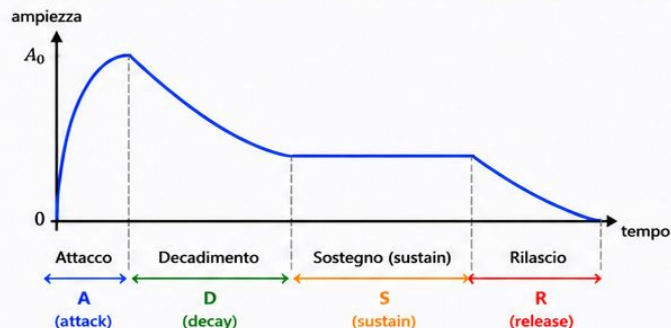
**Nel caso della base 2:** quando  $x$  **raddoppia**, il logaritmo  $y$  **aumenta di 1**.  
 Più in generale: per ottenere **incrementi uguali di  $y$**  servono **variazioni sempre maggiori di  $x$** .  
 Per questo motivo la curva logaritmica cresce sempre più lentamente.

## RAPPRESENTAZIONE LOGARITMICA DELL'INVILUPPO

In molti suoni reali, alcune fasi dell'inviluppo (soprattutto il decadimento) possono essere approssimate da curve esponenziali.

La scala logaritmica (in decibel) permette di rappresentare queste variazioni in modo più comprensibile, perché segue la percezione umana.

### Inviluppo d'ampiezza nel tempo (ampiezza lineare)

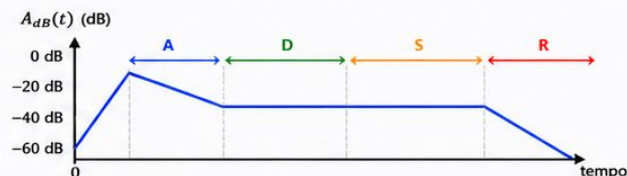


Matematicamente, l'ampiezza  $A(t)$  può essere descritta da funzioni esponenziali:

- Attacco:  $A(t) = A_0 (1 - e^{-t/\tau_A})$
- Decadimento:  $A(t) = A_0 e^{-t/\tau_D}$
- Sostegno (sustain):  $A(t) = A_S$  (costante)
- Rilascio:  $A(t) = A_S e^{-t/\tau_R}$

dove  $\tau_A$ ,  $\tau_D$ ,  $\tau_R$  sono costanti di tempo.

### Vista dell'inviluppo sulla scala logaritmica (decibel)



In decibel, un decadimento esponenziale appare come una variazione lineare. Questo rende la scala logaritmica molto utile in acustica e nella percezione sonora, poiché è più vicina al modo in cui l'orecchio umano percepisce le variazioni di intensità.

# GIACINTO SCELSI

1905 - 1988

## LA FIGURA

Compositore italiano radicale e visionario.

Vita segnata da una crisi psicospirituale (anni '40).

Ricerca interiore, meditazione, interesse per filosofie orientali e misticismo.

Rifiuto della forma musicale tradizionale.

Ricerca del suono nella sua purezza originaria.

Grande uso dell'improvvisazione, delle onde sonore e della registrazione.

"Il suono è sferico, il suono ci avvolge."

## RIFERIMENTI MITICI COSMOGONICI

### CHAOS

Apertura originaria, indistinta e vibrante, da cui tutto nasce.

### ECO

Voce senza corpo, presenza intermittente, fantasma sonoro.

### ERACLITO

L'armonia nasce dai contrari. L'identico contiene differenza.

### APEIRON

L'indefinito, il senza confini, il continuum originario.

## LA POETICA DEL SUONO

Una sola nota non è immobilità, ma un campo infinito di possibilità.

"Il suono non è un oggetto statico, ma un organismo vivente."

Microintervalli, battimenti, interferenze.

Il tempo nasce dal suono stesso.

L'attenzione si sposta dalla nota in sé alla sua vita interna.

Involuppi dinamici, oscillazioni timbriche, trasformazioni infinite.

## UNA SOLA NOTA

NON È IMMOBILITÀ

MA UN CAMPO INFINITO DI POSSIBILITÀ

## QUATTRO PEZZI SU UNA NOTA SOLA (1959)

Ogni pezzo è costruito attorno a una sola altezza fondamentale.

### I PEZZO

Fa



densità oscura, pulsazione lenta, gravità sonora

1959

### III PEZZO

Si



tensione vibrante, interferenze, oscillazioni

1959

### III PEZZO

Lab



espansione timbrica, instabilità armonica, suono "respirante"

1959

### IV PEZZO

La



energia e rarefazione, spazio sonoro aperto, dissoluzione nella vibrazione

1959

## ASCOLTO MICROSCOPICO



ENTRARE NEL SUONO, NELLE SUE SOGLIE, NELLE SUE INSTABILITÀ.

## LA COSMOLOGIA DEL SUONO SECONDO SCELSI

Dal fondo indistinto alla molteplicità: il cosmo come vibrazione.

1. UNITÀ ORIGINARIA indistinta (come il Chaos)

2. VIBRAZIONE la nota unica inizia a vibrare internamente

3. DIFFERENZIAZIONE microdifferenze tra frequenze quasi identiche

4. BATTIMENTI nasce la pulsazione, il tempo, il suono differenziale

5. IL MOLTEPLICE il cosmo emerge dalla vibrazione originaria

L'universo non è che il suono che ascolta se stesso.

<https://www.youtube.com/watch?v=MfTjz6emd7c>