

Acustica

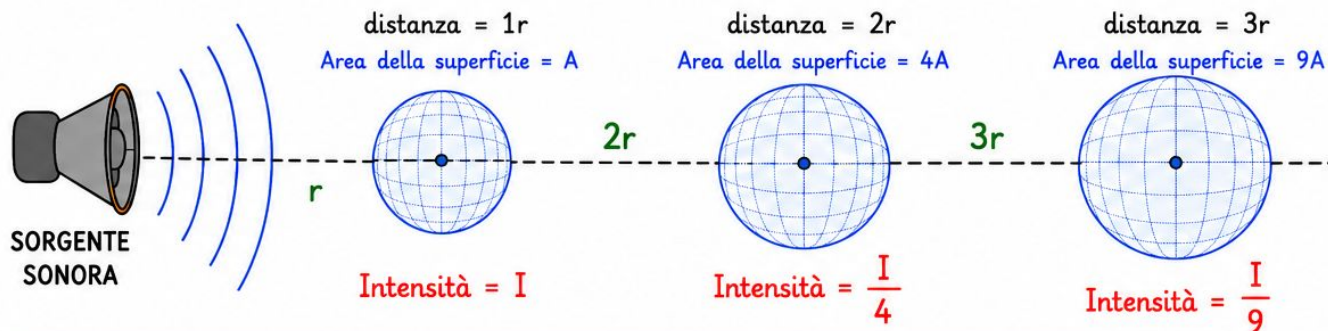
Lezione 7

*percezione uditiva, mascheramento
sonoro e sistemi di intonazione*

Luigi Manfrin

LA LEGGE DELL'INVERSO DEL QUADRATO

L'intensità sonora diminuisce **col quadrato** della distanza dalla sorgente.



RELAZIONE MATEMATICA

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

$\propto$ si legge "è proporzionale a"

cioè:

$$I = \frac{k}{r^2}$$

dove k è una costante che dipende dalla sorgente e dall'ambiente.

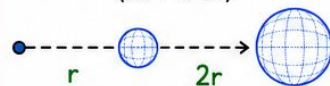


IDEA CHIAVE

Il suono si propaga in tutte le direzioni. Allontanandoci dalla sorgente, la **stessa energia** si distribuisce su una **superficie sempre più grande**. Quindi, **l'intensità diminuisce!**

COSA SUCCEDDE ALL'INTENSITÀ

Se raddoppio la distanza (da r a $2r$)



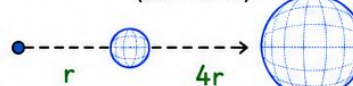
L'intensità diventa **$I/4$** (un quarto)

Se triplico la distanza (da r a $3r$)



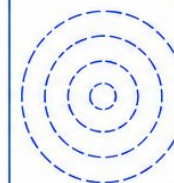
L'intensità diventa **$I/9$** (un nono)

Se quadruplico la distanza (da r a $4r$)



L'intensità diventa **$I/16$** (un sedicesimo)

IN SINTESI



Più ti allontani dalla sorgente, più il suono si "sparge" nello spazio su una superficie sempre più grande e diventa meno intenso.



OGNI VOLTA CHE LA DISTANZA VIENE MOLTIPLICATA PER n , L'INTENSITÀ VIENE DIVISA PER n^2 .

Esempi:

- $n = 1 \rightarrow I : 1$ (nessun cambiamento)
- $n = 2 \rightarrow I : 4$ (un quarto)
- $n = 3 \rightarrow I : 9$ (un nono)
- $n = 4 \rightarrow I : 16$ (un sedicesimo)

LA STESSA ENERGIA
SI DISTRIBUISCE SU UNA SUPERFICIE
SEMPRE PIÙ GRANDE $\rightarrow$
L'INTENSITÀ DIMINUISCE

L'orecchio umano: dalla vibrazione sonora alla percezione

1. ORECCHIO ESTERNO

Padiglione auricolare
raccoglie il suono

ONDA SONORA

Canale uditivo
convoglia il suono e presenta risonanze che amplificano selettivamente alcune frequenze

CELLULE CILIATE INTERNE
(trasduzione)

trasducono le vibrazioni meccaniche in segnali elettrici che vengono inviati al nervo uditivo.

CELLULE CILIATE ESTERNE
(amplificatore cocleare)

amplificano attivamente le vibrazioni della membrana basilare, aumentando sensibilità e selettività frequenziale.

IL PERCORSO DEL SUONO



IN SINTESI: l'orecchio non è solo un microfono: è un intelligente che trasforma le vibrazioni in informazioni significative per il cervello. La psicoacustica studia come queste informazioni vengono percepite e interpretate.

2. ORECCHIO MEDIO

Ossicini (martello, incudine, staffa)
trasmettono e amplificano le vibrazioni del timpano, permettendo il trasferimento efficiente dell'energia sonora dall'aria ai liquidi della coclea.

MEMBRANA TIMPANICA (TIMPANO)

è una sottile membrana elastica che separa l'orecchio esterno dall'orecchio medio. Vibra in risposta alle onde sonore, trasformando le variazioni di pressione dell'aria in vibrazioni meccaniche.

TUBA DI EUSTACCHIO
(collega l'orecchio medio al rinofaringe)

Permette l'equalizzazione della pressione tra l'orecchio medio e l'ambiente esterno (attraverso il rinofaringe), consentendo la corretta vibrazione della membrana timpanica e equilibra la pressione dell'aria ai due lati del timpano.

MAPPA TONOTOPICA DELLA COCLEA



La posizione lungo la coclea determina la frequenza percepita.

3. ORECCHIO INTERNO

Canali semicircolari
(organi dell'equilibrio)

Coclea
trasforma le vibrazioni meccaniche in impulsi elettrici.

ANALISI DELLE FREQUENZE

La membrana basilare presenta una **composizione tonotopica**: diverse zone sono sensibili a diverse frequenze.



Nervo uditivo
trasporta gli impulsi elettrici al cervello.

Cellule ciliate
trasformano le vibrazioni meccaniche in impulsi elettrici.



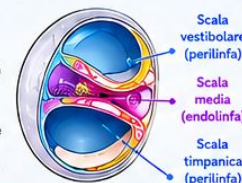
PERCEZIONE

LA COCLEA: DUE LIQUIDI

La coclea contiene due liquidi:

- PERILINFA** (nelle scale vestibolare e timpanica)
- ENDOLINFA** (nella scala media)

Le vibrazioni della membrana basilare, immerse in questi liquidi, permettono alle cellule ciliate di trasformare il movimento in impulsi nervosi.



IN PSICOACUSTICA (in modo semplice)

- ALTEZZA:** percezione correlata principalmente alla frequenza
- SONORITÀ (Loudness):** percezione dell'intensità sonora
- TIMBRO:** percezione legata alla composizione spettrale e all'evoluzione temporale del suono

IL MASCHERAMENTO

Quando un suono rende un altro suono meno udibile

1. CHE COS'È?

Il mascheramento è un fenomeno percettivo: la presenza di un suono (mascherante) rende più difficile o impossibile percepire un altro suono (mascherato), anche se entrambi sono fisicamente presenti.



È UN FENOMENO PERCETTIVO, NON FISICO.

Il suono mascherato NON scompare: è ancora presente nell'aria, ma il nostro orecchio/cervello non lo percepisce chiaramente.

2. IN QUALI CONDIZIONI SI REALIZZA?



SIMULTANEITÀ TEMPORALE

I due suoni devono essere presenti nello stesso intervallo di tempo (mascheramento simultaneo). Il mascheramento può persistere per un breve intervallo prima o dopo il suono mascherante (mascheramento temporale: forward e backward masking).



VICINANZA IN FREQUENZA

Il mascheramento è più forte quando i due suoni hanno frequenze vicine, cioè cadono nella stessa banda critica (o in bande molto vicine).



DIFFERENZA DI INTENSITÀ (LIVELLO)

Il mascherante deve essere più intenso del mascherato. Maggiore è la differenza di livello (in dB), più forte è il mascheramento.

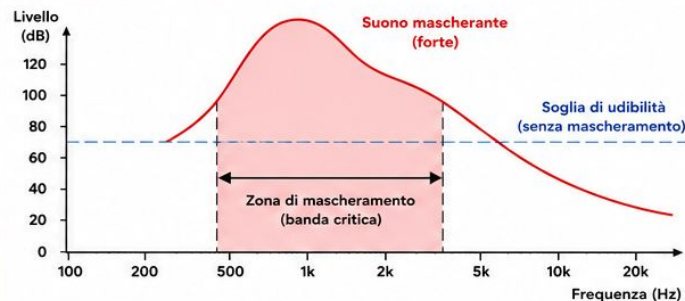


PROSSIMITÀ SPAZIALE

Suoni provenienti dalla stessa zona spaziale mascherano di più. La separazione spaziale può ridurre il mascheramento (binaural unmasking).

3. COME FUNZIONA? (livello e frequenza)

Ogni suono mascherante crea una "zona di mascheramento" attorno alla sua frequenza.



Un suono mascherato che cade dentro questa zona e che ha un livello inferiore alla curva di mascheramento NON si percepisce (o è molto attenuato). Fuori da questa zona, o se è più intenso, può essere percepito.

4. QUALE FENOMENO PERCETTIVO COMPORTA?



Il mascheramento riduce l'intelligibilità e la chiarezza sonora, ma non elimina fisicamente il suono mascherato.

5. SU QUALI PARAMETRI MUSICALI AGISCE?



FREQUENZA (ALTEZZA)

Suoni vicini in frequenza si mascherano di più (perché cadono nella stessa banda critica).



INTENSITÀ (LIVELLO)

Più è grande la differenza di livello, più forte è il mascheramento.



DURATA (TEMPO)

Il mascheramento può persistere per un breve intervallo prima o dopo il suono mascherante (forward e backward masking).



SPAZIO (LOCALIZZAZIONE)

Suoni co-localizzati (stessa posizione) mascherano di più; la separazione spaziale può ridurre il mascheramento.



SPETTRO (TIMBRO)

Suoni ricchi di armoniche (spettri complessi) possono mascherare più facilmente altri suoni.

6. QUALI IMPLICAZIONI HA IN MUSICA?



INTELLIGIBILITÀ

Influisce sulla comprensione di melodie, testi cantati, dialoghi, assoli.



SCRITTURA E ARRANGIAMENTO

Guida la scelta di registri, timbri e dinamiche per evitare che strumenti o voci si coprano tra loro.



MIX E PRODUZIONE

Si usano equalizzazioni, livelli, panoramica stereo, compressione e riverberi per ridurre il mascheramento e ottenere chiarezza.



PERCEZIONE DELLA DINAMICA E DEL COLORE

Influisce sull'equilibrio sonoro e sull'impatto emotivo di un brano.

8. MASCHERAMENTO E TIMBRO

Due strumenti che condividono molte componenti spettrali nello stesso registro tendono a mascherarsi più facilmente.

La distinzione timbrica (e quindi la trasparenza dell'insieme) dipende da quanto i loro spettri sono diversi.



Principio chiave per compositori, orchestratori e arrangiatori.

7. ESEMPI MUSICALI



Voce e pianoforte nella stessa zona media e presenza di consonanti (C, S, T, P...): un accompagnamento pianistico troppo intenso può ridurre l'intelligibilità della voce mascherandone alcune componenti spettrali.



Soluzione: ridurre il livello del piano, suonare in un registro più acuto o usare un timbro più leggero; lasciare spazio alle zone importanti della voce.



Cassa e basso possono mascherarsi quando condividono regioni spettrali simili nelle basse frequenze (fondamentale e prime armoniche).

Soluzione: EQ mirata (es. eliminare frequenze inutili o "impastate"); valorizzare l'attacco della cassa (2-5 kHz) e definire la fondamentale del basso.



Clarinetto e corno nello stesso registro possono mascherarsi facilmente: condividono alcune bande di frequenza importanti, perdendo distinguibilità timbrica.

Soluzione: separare i registri, modificare dinamiche, scegliere timbri complementari o usare orchestrazione alternativa.



In cuffia o in stereo, una panoramica più ampia e una buona equalizzazione possono ridurre il mascheramento tra strumenti.

Soluzione: panoramica, EQ mirata, riverbero e gestione dei livelli.



Il mascheramento nasce dall'interazione percettiva tra suoni: tempo + frequenza + livello + spazio + spettro determinano quanto un suono può diventare meno udibile di un altro.

Conoscerlo significa comunicare e progettare musica più chiara, efficace e musicale.

LA SCALA PITAGORICA: DALLE QUINTE PURE ALLA SCALA DIATONICA

1. IL PRINCIPIO FONDAMENTALE

La quinta giusta è basata sul rapporto semplice tra frequenze:

$$\frac{3}{2} \quad (\approx 1,5)$$

Ampiezza della quinta pitagorica:

701,955 cent (≈ 702 cent)

Confronto con la quinta temperata (700 cent):
 $\approx +1,955$ cent ($\approx +2$ cent)

Questo intervallo è particolarmente consonante e stabile all'ascolto.

2. COSTRUZIONE DELLE QUINTE

Partendo da una nota iniziale (Do), si applica ripetutamente il rapporto 3/2 per ottenere nuove note.

Ogni nuova nota = nota precedente $\times$ 3/2

Successione delle quinte:

Do $\rightarrow$ Sol $\rightarrow$ Re $\rightarrow$ La $\rightarrow$ Mi $\rightarrow$ Si $\rightarrow$ Fa# $\rightarrow$
Do# $\rightarrow$ Sol# $\rightarrow$ Re# $\rightarrow$ La# $\rightarrow$ Fa (Do teorico)
(dopo 12 quinte)

3. RICONDURRE LE NOTE ALLA STESSA OTTAVA

Le quinte generano una spirale di note sempre più acute.

Per costruire una scala, riconduciamo ogni nota all'ottava iniziale, cioè alla stessa classe di altezza (rapporto 2:1).

SPIRALE DELLE QUINTE

Do
Sol
Re
La
Mi
Si
Fa#
Do#
...

SCALA NELLA STESSA OTTAVA

Do
Re
Mi
Fa
Sol
La
Si
Do
(ottava)

TONO PITAGORICO = 9/8

Nel sistema pitagorico puro, il tono (T) si ottiene esclusivamente con due quinte pure consecutive e il riporto all'ottava:

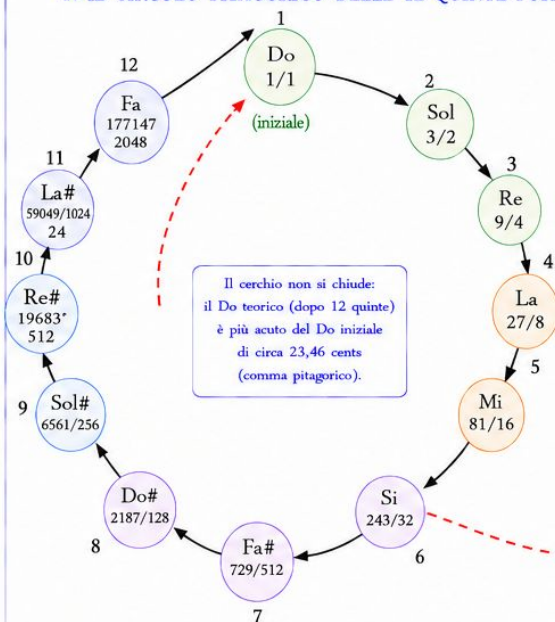
$$\text{Do} \xrightarrow{\times 3/2} \text{Sol} \xrightarrow{\times 3/2} \text{Re} \quad \left(\frac{3}{2}\right)^2 = \frac{9}{4}$$

Riportando Re nell'ottava iniziale (+ 2): $\frac{9/4}{4} \div 2 = \frac{9}{8} \approx 204$ cents

Il sistema pitagorico fu uno dei primi tentativi nella storia di descrivere la musica con la matematica. Per i pitagorici, l'armonia musicale era il riflesso dell'ordine matematico dell'universo.

Il sistema pitagorico si basa sul rapporto 3/2 (quinta giusta).
Costruendo successive quinte e riportando ogni nota nell'ottava iniziale si ottiene la scala pitagorica e i suoi intervalli.

4. IL CERCHIO PITAGORICO DELLE 12 QUINTE PURE



Il cerchio non si chiude:
il Do teorico (dopo 12 quinte)
è più acuto del Do iniziale
di circa 23,46 cents
(comma pitagorico).

5. PERCHÉ IL CERCHIO NON SI CHIUDE?

Dopo 12 quinte pure non si torna esattamente allo stesso Do.

Un modo più intuitivo per gli studenti
Potresti scrivere:

12 quinte $\approx$ 7 ottave

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} = 129,746...$$

$$2^7 = 128$$

$$\frac{2^7}{\left(\frac{3}{2}\right)^{12}} = \frac{524288}{531441}$$

$$\approx 1,01364$$

$\rightarrow$ comma pitagorico

Il Do teorico (dopo 12 quinte) è più alto del Do iniziale di circa 23,46 cents.

Do teorico
(dopo 12 quinte)
 $\frac{531441}{4096}$
 $\approx 1,01364$
 $\approx 23,46$ cents

8. COME SI OTTENGONO I TONI E I SEMITONI PITAGORICI

SEMITONO PITAGORICO = 256/243

Nel sistema pitagorico puro, il semitono (S) si ottiene dalla divisione tra la quarta giusta (4/3) e il quadrato del tono pitagorico (9/8):

$$\frac{4}{3} \div \frac{81}{64} = \frac{4}{3} \times \frac{64}{81} = \frac{256}{243}$$

≈ 90 cents

TERZA MAGGIORE PITAGORICA
(da rapporti di quinte)

$$\frac{81}{64}$$

≈ 408 cents

TERZA MINORE PITAGORICA
(da rapporti di quinte)

$$\frac{32}{27}$$

≈ 294 cents

6. LA SCALA PITAGORICA (nella stessa ottava)

Riportando le note nell'ottava iniziale si ottiene la scala diatonica pitagorica.

Grado	Nota	Rapporto (rispetto a Do)	Cents (circa)
1	Do	1/1	0
2	Re	9/8	≈ 204
3	Mi	81/64	≈ 408
4	Fa	4/3	≈ 498
5	Sol	3/2	≈ 702
6	La	27/16	≈ 906
7	Si	243/128	≈ 1110
8	Do'	2/1 (ottava)	≈ 1200

7. INTERVALLI DELLA SCALA PITAGORICA

La scala pitagorica è composta da 5 toni (T) e 2 semitoni (S) di ampiezza diversa.

Intervallo	Rapporto	Cents (circa)
Tono pitagorico (T)	9/8	≈ 204 cents
Semitono pitagorico (S)	256/243	≈ 90 cents

Sequenza degli intervalli:

T - T - S - T - T - T - S

9. RIASSUNTO DEL SISTEMA PITAGORICO

- ✓ Si parte da una nota iniziale.
- ✓ Si costruiscono successive quinte giuste con rapporto 3/2.
- ✓ Le note ottenute vengono riportate nell'ottava iniziale.
- ✓ Si ottiene la scala diatonica pitagorica.
- ✓ Gli intervalli derivano da rapporti numerici semplici.
- ✓ Il cerchio delle 12 quinte non si chiude: lo scarto è il comma pitagorico ($\approx 23,46$ cents).



Legenda: T = tono pitagorico (9/8 ≈ 204 cents) S = semitono pitagorico (256/243 ≈ 90 cents)



LA QUINTA DEL LUPO

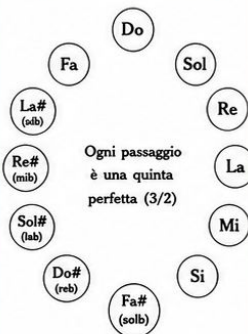
Perché il cerchio delle quinte non si chiude perfettamente



1 COSTRUIAMO LE NOTE CON LE QUINTE PURE

Partiamo dal Do e saliamo sempre di una quinta perfetta.

Quinta perfetta = $3/2$



Ogni passaggio è una quinta perfetta ($3/2$)

2 DOPO 12 QUINTE NON TORNIAMO AL DO INIZIALE

Moltiplichiamo 12 volte il rapporto $3/2$.

$$12 \text{ quinte} = (3/2)^{12} = 531441/4096 \approx 129,7463$$

Sette ottave ci riportano al Do iniziale.

$$7 \text{ ottave} = 2^7 = 128$$

Confrontiamo i due risultati:

$$(3/2)^{12} \neq 2^7$$
$$531441/4096 \neq 128$$
$$129,7463 \neq 128$$

Il cerchio delle quinte non si chiude!
Rimane una piccola differenza.

3 LA DIFFERENZA È IL COMMA PITAGORICO

Quanto valgono in rapporto le due quantità?

$$\text{Comma pitagorico} = \frac{(3/2)^{12}}{2^7} = \frac{531441}{524288} \approx 1,01364$$

È una differenza di circa 23,46 centesimi di tono ($\approx 1/4$ di semitono).

È piccola, ma sufficiente per creare problemi nell'intonazione.

4 IN UNO STRUMENTO REALE IL CERCHIO DEVE CHIUDERSI

Se vogliamo avere solo 12 note distinte (come in una tastiera), dobbiamo chiudere il cerchio.



Dopo 11 quinte siamo quasi al punto di partenza... manca pochissimo!

Le prime 11 quinte possiamo mantenerle pure.
Ma l'ultima non può esserlo.

5 L'ERRORE SI CONCENTRA IN UNA QUINTA

Per chiudere il cerchio, una delle dodici quinte deve essere modificata (ristretta) per assorbire il comma pitagorico.



Questa quinta è stonata: è la

QUINTA DEL LUPO.

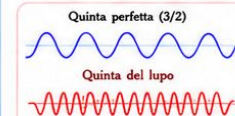
Le altre 11 quinte restano perfette.

6 QUESTA È LA QUINTA DEL LUPO

Il rapporto dell'ultima quinta necessaria per chiudere il cerchio è:

$$\text{Quinta del lupo} = 2^7 / (3/2)^{11} = 262144 / 177147 \approx 1,47981$$

Una quinta perfetta vale $3/2 = 1,5$. La quinta del lupo è più piccola di circa 23,46 centesimi di tono.



Quando si suona, produce battimenti rapidissimi: suono aspro, instabile, "ululante".

IN SINTESI

- ✓ Costruiamo le note con quinte perfette ($3/2$).
- ✓ Dopo 12 quinte non torniamo esattamente al Do iniziale: nasce il comma pitagorico ($\approx 1,01364$).
- ✓ In uno strumento reale il cerchio deve chiudersi: non possiamo lasciare la differenza.
- ✓ L'errore si concentra in una sola quinta. Quella quinta suona "diabolica".

L'IDEA CHIAVE



12 quinte pure non tornano esattamente al punto di partenza



Per chiudere il cerchio, l'errore finisce in un'unica quinta



Questa quinta stonata è la **QUINTA DEL LUPO**



NOTA STORICA

La "quinta del lupo" era evitata nei temperamenti antichi (come il mesotonico) e diversa posizione poteva essere scelta a seconda del compromesso voluto.

I DUE COMMI MUSICALI: PITAGORICO vs SINTONICO

DUE "ERRORI" DIVERSI, DUE PROBLEMI DIVERSI, DUE VIE PER CERCARE LA CONSONANZA

1. COMMA PITAGORICO

Il problema delle QUINTE

DEFINIZIONE PRECISA

Il comma pitagorico è la differenza tra 12 quinte pitagoriche e 7 ottave.

DERIVAZIONE

$$\begin{aligned}\text{Ogni quinta pitagorica} &= \frac{3}{2} \\ 12 \text{ quinte} &= \left(\frac{3}{2}\right)^{12} = \frac{3^{12}}{2^{12}} \quad 7 \text{ ottave} = 2^7\end{aligned}$$

Rapporto tra 12 quinte e 7 ottave:

$$\frac{(3/2)^{12}}{2^7} = \frac{3^{12}}{2^{19}} = \frac{531441}{524288}$$

IN SINTESI

È il piccolo eccesso che rimane nel tentativo di chiudere il ciclo delle quinte usando solo 2 e 3 (ottave e quinte). Non coinvolge mai il numero 5.

RAPPORTO ESATTO

$$\frac{531441}{524288}$$

$$\approx 1,01364326477$$

AMPIEZZA

$$\approx 23,46 \text{ cent}$$

DIFFERENZA FONDAMENTALE

COMMA PITAGORICO

misura l'errore nel ciclo delle QUINTE (2 e 3)

COMMA SINTONICO

misura quanto la terza maggiore pitagorica (81/64) eccede la terza maggiore pura (5/4)

2. COMMA SINTONICO

Il problema delle TERZE

DEFINIZIONE PRECISA

Il comma sintonico è la differenza tra la terza maggiore pitagorica (ditono pitagorico: due toni maggiori pitagorici) e la terza maggiore pura (rapporto 5:4).

TERZA MAGGIORE PITAGORICA
(ditono pitagorico)

La terza maggiore pitagorica si ottiene come prodotto di due toni maggiori pitagorici (9/8):

$$\frac{9}{8} \times \frac{9}{8} = \frac{9 \cdot 9}{8 \cdot 8} = \frac{81}{64} \approx 407,82 \text{ cent}$$

RAPPORTO ESATTO

$$\frac{81}{64} : \frac{5}{4} = \frac{81}{80} \approx 1,0125$$

TERZA MAGGIORE PURA
(rapporto 5:4)

$$\frac{5}{4}$$

$$\approx 386,31 \text{ cent}$$

AMPIEZZA

$$\approx 21,51 \text{ cent}$$

IN SINTESI

È il piccolo eccesso del ditono pitagorico rispetto alla terza maggiore pura. Nasce dall'introduzione del numero 5 nei rapporti consonanti.

DERIVAZIONE DI 531441 E 524288

$$531441 = 3^{12}$$

$$\text{Ogni quinta pitagorica} = \frac{3}{2}$$

Dodici quinte:

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} = \frac{3^{12}}{2^{12}}$$

Poiché $3^{12} = 531441$, il numeratore è 531441.

$$531441 = 3^{12}$$

$$524288 = 2^{19}$$

Per capire perché compare 2^{19} , partiamo dalla formula del comma pitagorico:

$$\frac{(3/2)^{12}}{2^7}$$

Sviluppando:

$$\frac{3^{12}}{2^{12}} \cdot \frac{1}{2^7} = \frac{3^{12}}{2^{19}}$$

Il numero 19 nasce dalla somma:
 $12 + 7 = 19$

- le 12 quinte introducono già 2^{12} al denominatore;
- poi si divide ulteriormente per 2^7 (le sette ottave).

In altre parole:

$$3^{12} = 531441$$

$$2^{19} = 524288$$

Questa è una delle forme più eleganti del comma pitagorico:

$$\frac{3^{12}}{2^{19}}$$

e mostra che tutto il problema nasce dal confronto tra le potenze di 3 (quinte) e le potenze di 2 (ottave). Nessun numero 5 compare nella costruzione.

LA SERIE ARMONICA: LA FONTE DEI RAPPORTI NATURALI

Ogni suono complesso produce una serie di armonici

la cui frequenza è data da rapporti semplici con il fondamentale.

I più semplici sono costruiti con i numeri 2, 3 e 5.

N° armonico	1	2	3	4	5	6
Rapporto con il fondamentale	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1	6/1
Intervallo risultante	—	Ottava (2:1)	Quinta (3:2)	Doppia ottava (4:1)	Terza maggiore (5:4)	Terza minore (6:5)

La terza maggiore pura (5:4) introduce il numero 5: è la nuova consonanza che il sistema pitagorico non poteva ottenere.

CONCLUSIONE

Pitagora costruisce tutti gli intervalli usando solo le potenze di 2 e 3 (ottave e quinte).

Zarlino introduce il numero 5 nella costruzione delle consonanze, ottenendo la terza maggiore pura (5:4), rapporto presente anche nella serie armonica.

IN SINTESI FINALE

Commi diversi, problemi diversi, soluzioni diverse:

il comma pitagorico nasce dal problema delle quinte e coinvolge solo 2 e 3; il comma sintonico nasce dal problema delle terze e richiede anche il 5.



GIOSEFFO ZARLINE

(1517–1590)

Epoca: Rinascimento
(XVI secolo)

Musicista, teorico e compositore italiano.

Nelle sue "Istituzioni armoniche" (1558) propone una nuova teoria dell'armonia basata sui rapporti naturali (2, 3 e 5) e sull'intonazione secondo la natura.

OPERA FONDAMENTALE:
Le istituzioni harmoniche (1558)

3. IL PROBLEMA DEL SISTEMA PITAGORICO

- Le quinte sono pure ($3/2$), ma le terze risultano troppo aspre.
- La musica polifonica del tempo richiede terze e seste morbide e consonanti.
- Il sistema pitagorico, basato solo sui numeri 2 e 3, non basta.



4. LA SOLUZIONE DI ZARLINE

- Introdurre il numero 5 (presente nella serie armonica) e basare la scala sui rapporti naturali semplici (2, 3 e 5) per ottenere:
 - terza maggiore pura ($5/4$)
 - terza minore pura ($6/5$)
 - sesta pura ($5/3$)
- Il prezzo da pagare è il comma sintonico ($81/80$): nessuna quinta può rimanere perfettamente pura in un sistema chiuso.

DUE NUMERI, DUE FILOSOFIE

PITAGORA

Numeri: 2 e 3



Intervalli: ottave
e quinte pure



Obiettivo:
consonanze perfette

ZARLINE

Numeri: 2, 3 e 5



Intervalli: ottave,
quinte e terze pure



Obiettivo:
consonanze perfette
e imperfette secondo
la natura



FRASE FONDAMENTALE DA RICORDARE

Zarline non inventa una nuova scala.

Formalizza teoricamente l'intonazione naturale già implicita nella pratica polifonica del Rinascimento.



5. INTONAZIONE NATURALE SECONDO ZARLINE

(rapporti semplici basati su 2, 3 e 5)

Gradi	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do (ott.)
Rapporto rispetto a Do	1	$9/8$	$5/4$	$4/3$	$3/2$	$5/3$	$15/8$	2
Cent (approssimati)	0	204	386	498	702	884	1088	1200

Terza maggiore
Mi ($5/4$)
 $\approx 386,31$ cent

Terza minore
Mib ($6/5$)
 $\approx 315,66$ cent

Sesta maggiore
La ($5/3$)
 $\approx 884,36$ cent

Sesta minore
Lab ($6/5$)
 $\approx 813,69$ cent



VANTAGGI

- Terze e seste consonanti e dolci
- Basata sull'ordine naturale degli armonici
- Ideale per musica vocale e polifonia rinascimentale



LIMITAZIONI

- Le 12 quinte non possono essere tutte pure: qualche quinta deve essere leggermente ridotta
- Nasce il comma sintonico ($81/80$)
- Modulazioni lontane più difficili

CONFRONTO CHIAVE: LA TERZA MAGGIORE

ZARLINE (pura)	TEMPERATA (equabile)
$5/4$	$2^{4/12}$
$\approx 386,31$ cent	≈ 400 cent

DIFFERENZA
 $\approx 13,69$ cent

Perché la polifonia rinascimentale cercava la terza naturale: più dolce e stabile all'ascolto.



6. SCALA TEMPERATA (EQUABILE)

Uso moderno

L'ottava (1200 cent) è divisa in 12 semitoni uguali.

Semitoni da Do	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Note	Do	Do# (Reb)	Re	Mib (Feb)	Mi	Fa	Fa# (Solb)	Sol	Sol# (Lab)	La	Sib (Lab)	Si	Do

Rapporto tra ogni semitono $= 2^{1/12} \approx 1,059463094...$
TUTTI GLI INTERVALLI SONO MATEMATICAMENTE UGUALI

VANTAGGI

- Possibilità di modulare in tutte le tonalità
- Strumenti a tastiera suonabili in qualsiasi tonalità
- Sistema semplice e regolare

LIMITAZIONI

- Nessun intervallo (tranne l'ottava) è perfettamente puro
- Le terze sono leggermente stonate (≈ 14 cent rispetto alla scala zarliniana)

COMMA PITAGORICO

$531441/524288 \approx 23,46$ cent

Nasce dal ciclo delle 12 quinte pitagoriche vs 7 ottave.

È il problema del SISTEMA FONDATO SULLE QUINTE (2 e 3).

RIASSUMENDO



COMMA SINTONICO

$81/80 \approx 21,51$ cent

Nasce dal confronto tra ditono pitagorico e terza maggiore pura.

È il prezzo del PASSAGGIO ALL'INTONAZIONE NATURALE (2, 3 e 5).



Zarline segna la svolta: dalla teoria pitagorica (2 e 3) alla teoria dei rapporti naturali (2, 3 e 5), per una musica più consonante e aderente alla pratica del suo tempo.



JEAN-PHILIPPE RAMEAU (1683-1764)

RAMEAU – GÉNÉRATION HARMONIQUE (1737)

Deux idées fondamentales et les critiques successives

1. LA BASSE FONDAMENTALE

Rameau afferma che l'identità di un accordo dipende dal suo suono più grave, chiamato **basse fondamentale**.

DEFINIZIONE

La basse fondamentale è il suono che, da solo, percepiamo come il "fondamento" dell'accordo, anche se non è la nota più grave ascoltata.

ESEMPIO IN DO MAGGIORE

Accordo di dominante V7 → I

V7 (Sol-Si-Re-Fa) → I (Do-Mi-Sol)

Stesso accordo, diverse disposizioni (rivolti)

Stato fondamentale (basso: Sol)	1° rivoluzione (basso: Si)	2° rivoluzione (basso: Re)
note: Sol-Si-Re-Fa	note: Si-Re-Fa-Sol	note: Re-Fa-Sol-Si

Tutti e tre hanno
la stessa basse fondamentale: Sol

CONSEGUENZA

Qualunque sia la disposizione delle voci, l'accordo di V7 mantiene la sua identità e la sua tendenza a risolvere sulla tonica (Do), perché la relazione fondamentale è: Sol (dominante) → Do (tonica).

Per Rameau, la basse fondamentale è il principio che spiega la coerenza e il movimento dell'armonia.

2. LA GENERAZIONE DELLA SETTIMA DI DOMINANTE

Rameau sostiene che la settima di dominante non è arbitraria, ma deriva naturalmente dalla struttura del suono (*corps sonore*).

1) LA SERIE ARMONICA

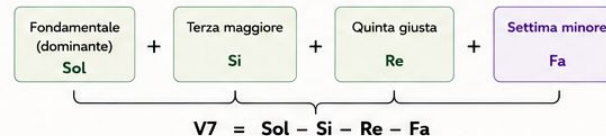
Ogni suono fondamentale produce armonici naturali.

n° armonico:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
rapporto:	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1	6/1	7/1	8/1	9/1	...
intervallo:	un.	ott.	quinta	ott.	terza	quinta	settima	ott.	nona	...

Il 7° armonico (7/1) suona come una **settima minore** sopra il fondamentale. Esso è quindi inscritto nella natura del suono.

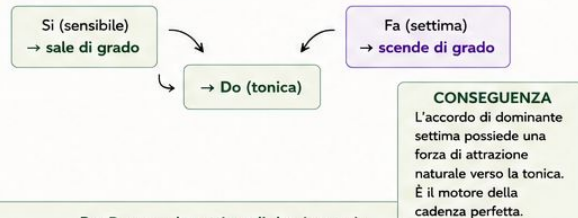
2) GENERAZIONE DELLA SETTIMA DI DOMINANTE

Combinando i suoni naturali più consonanti e introducendo la sensibile (3° dell'accordo), si ottiene l'accordo di dominante settima.



3) FORZA DI TENSIONE E RISOLUZIONE

La presenza simultanea della sensibile (Si) e della settima (Fa) crea due movimenti necessari:



Per Rameau, la settima di dominante è la principale dissonanza naturale e il fondamento dinamico della tonalità.

LE CRITICHE SUCCESSIVE A RAMEAU

1. Critica fisico-acustica

- La deduzione della settima dall'armonica non è rigorosa. Il 7° armonico è molto debole e poco udibile.
- La combinazione che porta alla V7 dipende da scelte teoriche (in particolare dal ruolo della sensibile), non è imposta dalla natura.

2. Critica teorica

- Il sistema di Rameau resta ancora legato a spiegazioni acustiche e non sviluppa una **teoria astratta delle funzioni armoniche**.
- La "basse fondamentale" non spiega da sola tutti i fenomeni armonici (es. accordi alterati, modulazioni lontane, ecc.).

3. Critica storica ed estetica

- La visione di Rameau è legata al gusto francese del Settecento e alla prassi della **cadenza**.
- Non rende conto di tutte le pratiche compositive, soprattutto quelle più moderne (modulazioni cromatiche, progressioni medianti, ecc.).

4. Critica di Jean-Jacques Rousseau (1712-1778)

- Rousseau contesta l'idea che l'armonia derivi necessariamente dalla natura fisica del suono.
- Secondo lui, molte regole armoniche sono convenzioni storiche legate al gusto e alla prassi, non verità naturali universali.
- Critica inoltre l'eccesso di speculazione teorica di Rameau, ritenendolo lontano dalla sensibilità musicale autentica.

5. Superamento da parte della teoria funzionale (XIX secolo)

- Teorici come Riemann separeranno l'armonia dalle cause acustiche naturali e costruiranno un sistema basato su funzioni astratte: Tonica (T), Sottodominante (S), Dominante (D).
- La dominante non sarà più spiegata dall'acustica, ma dalla logica delle relazioni tonali all'interno del sistema.

6. Critica delle progressioni medianti (Romanticismo: Schubert, Liszt, Wagner)

- Le progressioni medianti (successioni armoniche per terze maggiori o minori) – molto usate da Schubert, Liszt e Wagner – non si spiegano con il modello tonale di Rameau, perché spesso **bypassano la dominante e la cadenza**.

IN SINTESI

Rameau inaugura l'idea che l'armonia tonale abbia radici nella natura del suono. Le sue intuizioni (basse fondamentale e forza della dominante settima) saranno decisive per tutta la teoria musicale successiva, pur superate nelle spiegazioni rigorosamente acustiche.

CRITICHE E SVILUPPI FUTURI
Dalla contestazione delle basi acustiche alla teoria funzionale dell'Ottocento

RIASSUNTO VISIVO

BASSE FONDAMENTALE
Identità dell'accordo determinata dal suo fondamento → coerenza e direzione armonica

+

GENERAZIONE DELLA V7
Dalla natura del suono nasce la principale dissonanza naturale → tensione e risoluzione

=

SISTEMA TONICALE
Fondato su leggi naturali e sul movimento verso la tonica

→

TAVOLA 2 – I LIMITI DEL NATURALISMO DI RAMEAU

PITAGORA

problema
delle quinte



ZARLINO

introduzione del
numero 5 e delle
terze pure (5/4, 6/5)



RAMEAU

fondazione fisica
della triade maggiore
nella serie armonica

1. IL PROBLEMA DELLA TRIADE MINORE

Serie armonica di DO (di nuovo):

Do	Do	Sol	Do	Mi	Sol	Sib	Do	Re	Mi	Fa*	Sol	...
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...

Compare chiaramente:
Do–Mi–Sol
(triade maggiore)

La triade minore non è direttamente data
dalla serie armonica.

- La soluzione di Rameau: la *résonance inférieure*
Rameau introduce una serie “discendente” o speculare
che genera la triade minore.
- È una costruzione teorica.
- Non ha un corrispondente fisico nella serie armonica superiore.
- Serve a giustificare in modo concettuale il modo minore.

NON compare:
Do–Mib–Sol
(triade minore)

RAMEAU NON AVEVA TORTO:

MA LA SUA SPIEGAZIONE

- La triade minore non scende
dalla serie armonica “di fatto”.
- Rameau ha ragione a cercare
una spiegazione naturale,
ma la costruzione della
résonance inférieure è un’ipotesi
teorica necessaria, non una
constatazione fisica.
- È una risposta ingegnosa,
non una scoperta acustica.

2. LE TENTATIVE DI SPIEGAZIONE SUCCESSIVE

• Helmholtz (XIX sec.)

La triade minore non deriva direttamente dalla serie armonica,
ma può essere compresa attraverso la percezione delle
consonanze e dei battimenti.
Tuttavia nemmeno Helmholtz riesce a fondare il modo minore
con la stessa immediatezza del maggiore.

• Hugo Riemann (XIX–XX sec.)

Il maggiore e il minore devono avere pari dignità.
Teoria dualistica:

- l'accordo maggiore nasce dalla serie armonica;
- l'accordo minore nasce da una serie speculare,
detta serie subarmonica.

ATTENZIONE: la serie subarmonica di Riemann
è soprattutto una costruzione teorica ed elegante,
ma non ha lo stesso statuto fisico della serie armonica.
La simmetria è concettuale, non acustica.

3. PROSPETTIVA CONTEMPORANEA: DUE LIVELLI DISTINTI

COSA SPIEGA BENE LA SERIE ARMONICA

- ✓ la stabilità della quinta (3/2)
- ✓ la relativa stabilità della terza maggiore (5/4)
- ✓ la formazione dei rapporti della triade maggiore
- ✓ alcune tendenze percettive di base



MA IL SISTEMA TONALE NON DERIVA DALLA FISICA

Nasce dall'interazione tra:

- dati acustici
- pratiche compositive
- evoluzione storica
- percezione culturale

La serie armonica fornisce il materiale grezzo,
non l'intera grammatica musicale.



LIVELLO FISICO-ACUSTICO (la natura del suono)

Spiega il “perché” di certe stabilità:
ottava, quinta, terza maggiore...

Studia il suono come fenomeno fisico.

Analogia con il linguaggio verbale

Fisiologia → fonemi → percezione
MA
non spiega la sintassi di una lingua.



LIVELLO LINGUISTICO-MUSICALE (il sistema musicale)

Spiega “che cosa significano” e “come funzionano”
le relazioni: tensione, risoluzione, funzione...
Studia la musica come linguaggio storico
e culturale.

La dissonanza:
stesso intervallo,
stesso effetto diversi valori
secondo il contesto:

- tonalità classica: tensione
- jazz: possibile stabilità
- musica del XX sec.:
sonorità neutra

CONCLUSIONE FINALE DEL PERCORSO

La consonanza è un fenomeno acustico; la funzione armonica è un fenomeno musicale.

RAMEAU NON AVEVA TORTO: MA LA SUA SPIEGAZIONE NON ERA SUFFICIENTE.

La serie armonica spiega perché certi intervalli risultino privilegiati,
ma non spiega perché una dominante “debba” andare alla tonica.

Quella è grammatica musicale.

L'illusione di Diana Deutsch (1975)

Nell'esperimento di **Diana Deutsch** (psicologa britannica nata nel 1938), a ciascun orecchio vengono inviate simultaneamente sequenze che alternano note acute e gravi. Tuttavia molti ascoltatori non percepiscono le sequenze originali: il cervello raggruppa tra loro le note di altezza simile, costruendo due linee melodiche coerenti. Queste linee vengono inoltre localizzate nello spazio, cosicché si percepisce una successione di sole note acute provenire da destra e una successione di sole note gravi provenire da sinistra. L'illusione mostra che la percezione uditiva non è una semplice registrazione dello stimolo fisico, ma una costruzione attiva basata su processi di raggruppamento, continuità e organizzazione spaziale dei suoni.

The image displays musical notation for the Diana Deutsch illusion, divided into two sections, A and B.

Section A: Shows the original stimuli. The top staff, labeled 'A', is for the right ear ('Stimolo per l'orecchio destro') and contains a sequence of notes: G4, A4, B4, C5, B4, A4, G4. The bottom staff, also labeled 'A', is for the left ear ('Stimolo per l'orecchio sinistro') and contains a sequence of notes: E3, D3, C3, B2, A2, G2, F2.

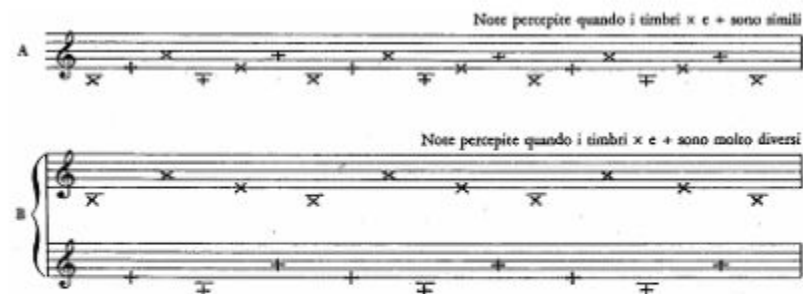
Section B: Shows the perceived melodic lines. The top staff, labeled 'B', is for the right ear ('Percepito dall'orecchio destro') and contains a sequence of notes: G4, A4, B4, C5, B4, A4, G4. The bottom staff, also labeled 'B', is for the left ear ('Percepito dall'orecchio sinistro') and contains a sequence of notes: E3, D3, C3, B2, A2, G2, F2.

L'illusione di David Wessel (1978)

David Wessel (1942–2014), compositore, ricercatore di psicoacustica e scienziato cognitivo della musica, noto per i suoi studi sulla percezione uditiva, il timbro e l'organizzazione percettiva delle strutture musicali.

Nel 1978 ha mostrato che il timbro può influenzare profondamente l'organizzazione percettiva della musica. Quando una successione di note viene eseguita con timbri uguali o molto simili, l'ascoltatore percepisce una sola melodia ascendente. Se invece le stesse note vengono suddivise in due timbri molto diversi, il cervello le raggruppa in due voci separate, ciascuna percepita come una melodia discendente.

Conclusione: il timbro non serve soltanto a distinguere gli strumenti, ma contribuisce anche a determinare come il cervello organizza e interpreta le strutture melodiche. In altre parole, la percezione musicale è una costruzione attiva e non una semplice registrazione dello stimolo sonoro.



Un'illusione musicale descritta da David Wessel. Le note contrassegnate da + e da x possono avere timbri uguali o diversi. Quando vengono eseguite con timbri uguali, percepiamo una ripetizione di tre note ascendenti (A). Quando i timbri sono sufficientemente diversi, invece, percepiamo due voci ciascuna costituita da una ripetizione di tre note discendenti (B).

L'ILLUSIONE DI RISSET

Tutte le frequenze raddoppiano (suono + acuto), ma lo spettro risultante può essere interpretato come leggermente più grave.

CHE COS'È 3,75 IPS?

IPS = inches per second
(pollici al secondo)

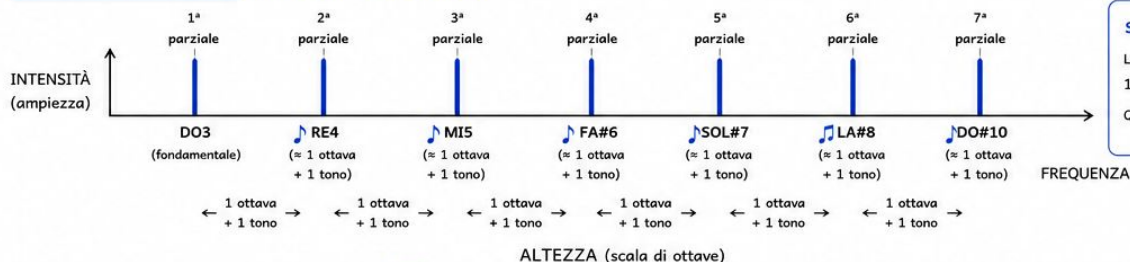
È la velocità di scorrimento
del nastro magnetico.

- 1 pollice = 2,54 cm
- 3,75 ips ≈ 9,5 cm/s

Nell'esperimento di Risset
la velocità passa da
3,75 ips a 7,5 ips
(il doppio).

Raddoppiare la velocità
raddoppia tutte le frequenze,
cioè trasporta il suono
di un'ottava verso l'alto.

1. SUONO ORIGINALE (velocità nastro 3,75 ips)

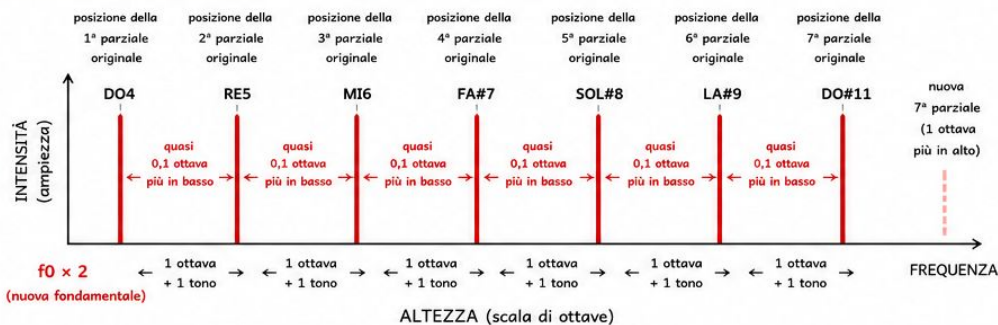


STRUTTURA SPETTRALE ORIGINALE

Le parziali sono distanziate di circa
1 ottava + un tono (≈ 1,1 ottave).
Questa è la "impronta spettrale" del suono.

RADDOPPIO DELLA VELOCITÀ DEL NASTRO
da 3,75 a 7,5 ips (tutte le frequenze $\times 2 = +1$ ottava)

2. DOPO IL RADDOPPIO (tutte le frequenze raddoppiano)



COSA È ACCADUTO?

- Ogni parziale è salita di un'ottava, ma si è posizionata circa un tono più in basso rispetto alla parziale che prima si trovava in quella zona.
- La prima parziale è scomparsa (era la più debole) e compare una nuova parziale molto alta (ottava sopra la vecchia 7ª). Questa variazione è poco rilevante percettivamente.
- Quasi tutte le componenti importanti sembrano quindi spostate leggermente verso il basso.

PASSAGGIO CHIAVE PERCETTIVO

6. Esempio ancora più semplice

Questi numeri indicano la posizione delle
parziali sulla scala delle ottave.

Supponiamo che le parziali siano:

0 ottave 1,1 ottave 2,2 ottave 3,3 ottave ...

Dopo il raddoppio (tutte $+1$ ottava):

1,0 ottave 2,1 ottave 3,2 ottave 4,3 ottave ...

Confronta:

vecchia 2ª = 1,1 nuova 1ª = 1,0

differenza:

$1,1 - 1,0 = 0,1$ ottava

e analogamente:

vecchia 3ª = 2,2 nuova 2ª = 2,1

differenza:

0,1 ottava

per tutte le componenti.

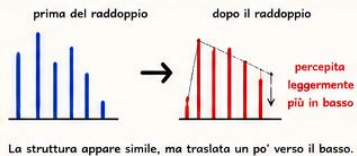
Le nuove posizioni assomigliano molto
alle vecchie, ma sono tutte leggermente
più basse (circa 0,1 ottava).
Questa è la chiave dell'illusione.

COSA FA L'ORECCHIO



- Non confronta le frequenze una per una come uno strumento di misura.
- Si concentra sulla struttura generale dello spettro e sulle componenti più intense.

CIÒ CHE L'ORECCHIO "LEGGE"



COSA INTERPRETA IL CERVELLO



Integra le informazioni
e interpreta il suono
come leggermente
PIÙ GRAVE
anche se fisicamente
tutte le frequenze
sono aumentate.

IDEA CHIAVE

La percezione dell'altezza **NON** dipende
solo dalle frequenze assolute presenti,
ma da come il cervello **ORGANIZZA**
E CONFRONTA le componenti
dello spettro sonoro.

Questa è una costruzione attiva
del sistema uditivo.



Nota importante: l'effetto è più forte per suoni con parziali disposte regolarmente (circa 1 ottava + 1 tono) e con intensità non uniformi.
Non è un "errore" dell'orecchio, ma il risultato di strategie percettive efficienti per riconoscere e organizzare i suoni nel mondo reale.

L'ILLUSIONE DI SHEPARD

Un suono che sembra salire (o scendere) senza fine, ma ritorna ciclicamente al punto di partenza.

COSA SIGNIFICA "DISTANZIATE DI UN'OTTAVA"?

Significa che ogni componente spettrale ha una frequenza doppia (raddoppia) rispetto alla precedente (oppure la metà).

Esempio:

Se la posizione 2 ha frequenza f , le successive sono:

- posizione 2 $\rightarrow f$
- posizione 3 $\rightarrow 2f$
- posizione 4 $\rightarrow 4f$
- posizione 5 $\rightarrow 8f$
- posizione 6 $\rightarrow 16f$
- posizione 7 $\rightarrow 32f$
- posizione 8 $\rightarrow 64f$

❗ Ogni passaggio da una posizione alla successiva corrisponde a UN'OTTAVA:

- la frequenza raddoppia ($\times 2$);
- nella direzione opposta
- la frequenza si dimezza ($\div 2$).

In altre parole:

le componenti sono distribuite su diverse ottave (stesso "nome" di nota, registri diversi).

Esempio con il Do:

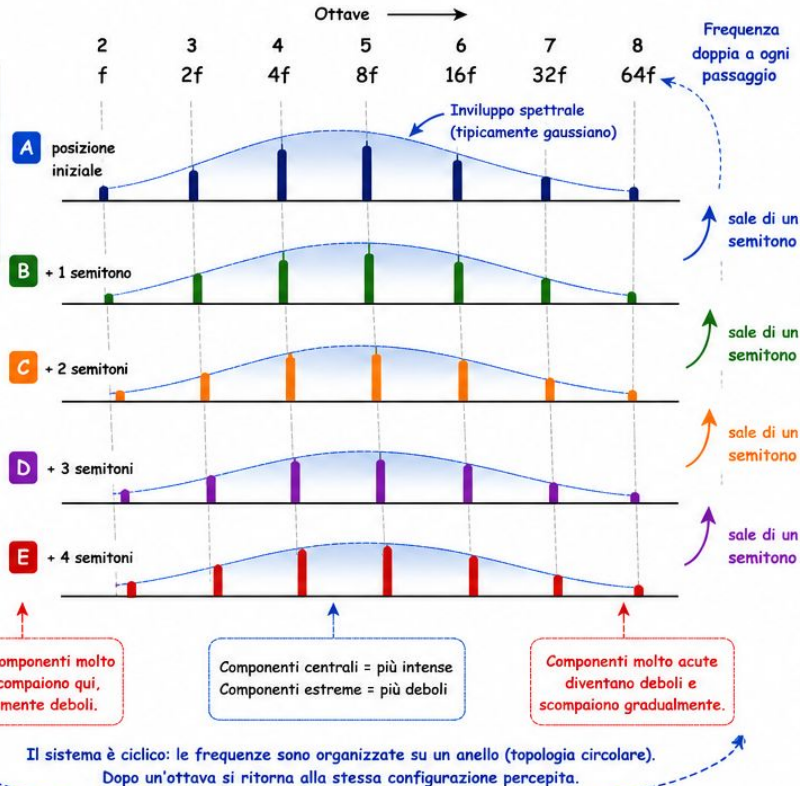
Do1 - Do2 - Do3 - Do4 - Do5 - Do6 - Do7 ...

(tutte le componenti appartengono alla stessa classe di altezza: Do).

IMPORTANTE

Ogni riga rappresenta un singolo istante temporale.

Tutte le componenti mostrate sulla stessa riga sono presenti **simultaneamente**.



SPIEGAZIONE INTUITIVA

1 Situazione A

Le componenti sono distanziate di un'ottava (2-8). L'involuppo spettrale (tipicamente gaussiano) determina l'intensità: quelle al centro sono forti, quelle agli estremi sono deboli.

2 Da A a B

Tutte le componenti salgono di un semitono. Fisicamente il suono è più acuto e lo percepiamo come "è salito di un semitono".

❗ **NOTA:** Fisicamente ogni componente sale di un semitono, ma percettivamente non sentiamo una singola nota che sale: sentiamo l'intera configurazione spettrale che si sposta.

3 Da B a C, D, E ...

Ogni volta tutte le componenti continuano a salire. Le componenti che vanno verso l'alto diventano sempre più deboli e svaniscono. Dal lato grave compaiono nuove componenti molto deboli.

4 Il trucco

L'orecchio non nota la sostituzione graduale: percepisce solo una continua salita.

5 Dopo 12 passaggi (un'ottava)

Dopo dodici semitoni tutte le componenti hanno compiuto un giro completo: la configurazione è identica alla situazione iniziale A. Il ciclo può ricominciare all'infinito. Il cervello però ha percepito una salita continua, senza fine.

IMMAGINE MENTALE

Immagina una scala mobile ad anello. Quando una persona arriva in cima, esce dalla scena; contemporaneamente una nuova persona entra dal basso. Tu vedi sempre movimento verso l'alto, ma il sistema è circolare.



IDEA CHIAVE

Il cervello attribuisce maggiore importanza alle componenti centrali, mentre ignora in gran parte la sostituzione graduale delle componenti estreme. Per questo il tono di Shepard crea l'illusione di una salita senza fine, pur essendo un sistema ciclico.



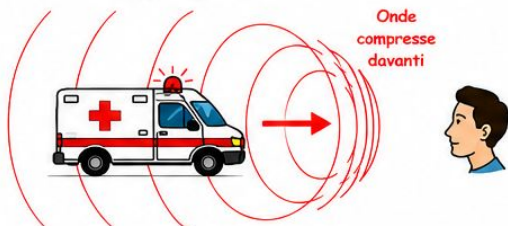
Risset ha prodotto un ritmo che diventa sempre più veloce e nello stesso tempo diventa sempre più lento. L'indicazione è di accelerare e nello stesso tempo di sostituire in modo opportuno i sedicesimi con gli ottavi, e gli ottavi con i quarti.

L'EFFETTO DOPPLER

Perché il suono cambia altezza quando sorgente e ascoltatore si muovono

1. SORGENTE CHE SI AVVICINA

Il suono appare più acuto



La sirena emette sempre la stessa nota (es. 440 Hz)

Frequenza percepita più alta (es. 460 Hz)

2. SORGENTE FERMA

Il suono ha la sua altezza "naturale"

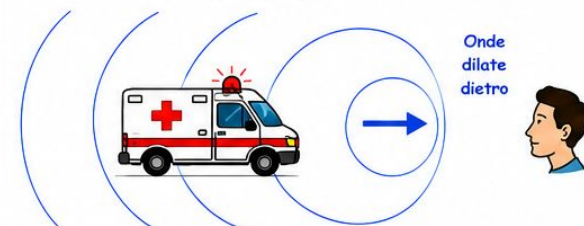


Onde equidistanti in tutte le direzioni

Frequenza percepita uguale a quella emessa (es. 440 Hz)

3. SORGENTE CHE SI ALLONTANA

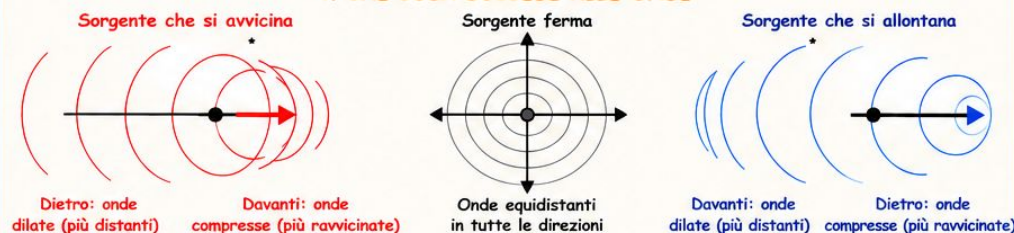
Il suono appare più grave



La sirena emette sempre la stessa nota (es. 440 Hz)

Frequenza percepita più bassa (es. 420 Hz)

4. CHE COSA SUCCEDDE ALLE ONDE



5. UN'ANALOGIA SEMPLICE



6. IN MUSICA

L'effetto Doppler produce una variazione continua dell'altezza percepita. È usato in musica, nella spazializzazione del suono e nella creazione di movimento.

Nella vita reale

Ambulanze, treni, automobili, aerei...

Un suono che passa accanto a noi cambia altezza.



In musica e nel suono elettronico

Possiamo simulare il passaggio di una sorgente davanti all'ascoltatore usando filtri Doppler: il suono sembra avvicinarsi, passare accanto a noi e poi allontanarsi.



Nella musica elettroacustica

Jean-Claude Risset ha usato l'effetto Doppler in molte sue opere (es. Mutations, 1969)

per creare movimenti sonori nello spazio.



Il Doppler è uno strumento potente per la spazializzazione e per dare vita al suono nello spazio.

7. DA RICORDARE



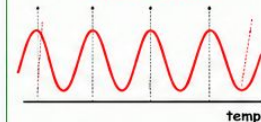
L'effetto Doppler non nasce da un cambiamento del suono emesso, ma da un cambiamento della distanza tra le onde sonore dovuto al moto relativo tra sorgente e ascoltatore.

Il suono che emettiamo è sempre lo stesso: è la distanza che cambia ciò che percepiamo.

8. PERCHÉ IL SUONO DIVENTA PIÙ ACUTO O PIÙ GRAVE

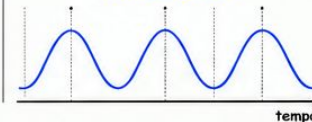
Si avvicina

Le onde arrivano più spesso all'orecchio perché sono più ravvicinate nel tempo.
→ suono più acuto.



Si allontana

Le onde arrivano meno spesso all'orecchio perché sono più distanziate nel tempo.
→ suono più grave.



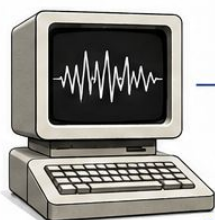
La frequenza emessa è la stessa: cambia l'intervallo di tempo con cui le onde arrivano.

LE QUATTRO GRANDI SVOLTE DELLA MUSICA INFORMATICA

Quattro idee che hanno trasformato il rapporto tra musica e computer

1. SINTESI DIGITALE

Il computer genera suoni



MUSIC V
linguaggio
per comporre
e sintetizzare
suoni

0 1 0 1 1 0 1 0 1
1 0 1 0 1 0 1 1 0

Max Mathews

1926–2011

OPERA ESEMPLARE:

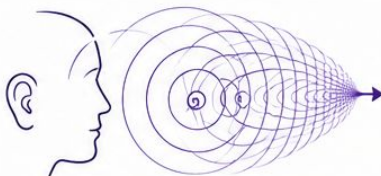
***The Silver Scale* (1960)**

Dimostra che il computer può comporre e produrre musica usando solo numeri.



2. SINTESI E ANALISI DEI TIMBRI

Il computer rivela nuovi fenomeni sonori



- toni infiniti (Shepard–Risset)
- glissandi infiniti
- accelerandi infiniti
- analisi spettrale dei suoni
- sintesi dei timbri complessi



Jean-Claude Risset

1938–2016

OPERA ESEMPLARE:

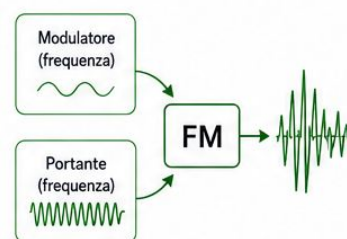
***Mutations* (1969)**

Dimostra che esistono suoni (impossibili nell'acustica tradizionale) che ingannano l'orecchio.



3. SINTESI FM

Il computer crea timbri complessi con semplicità



John Chowning

nato nel 1934

OPERA ESEMPLARE:

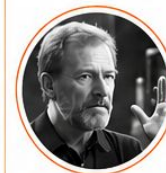
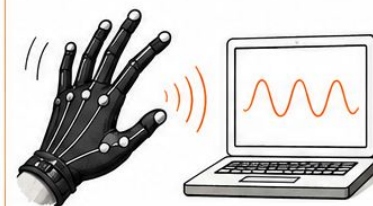
***Stria* (1977)**

Dimostra il potere espressivo della sintesi FM: pochi parametri, infiniti timbri.



4. INTERAZIONE E GESTO

Il computer diventa uno strumento da suonare



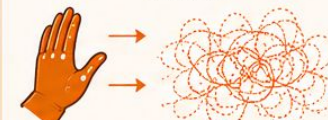
David Wessel

1942–2014

OPERA ESEMPLARE:

***Contacts Turbulents* (1986)**

Dimostra che il gesto in tempo reale può modellare il suono e la forma musicale.



IN SINTESI



Mathews

→ sintesi digitale



Risset

→ sintesi dei timbri
e illusioni percettive



Chowning

→ sintesi FM



Wessel

→ gesto, interazione
e performance

LA MODULAZIONE DEL SUONO

Due modi diversi di far interagire le onde sonore per creare nuovi timbri

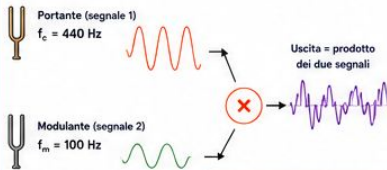
MODULAZIONE AD ANELLO (RING MODULATION)

Due suoni si moltiplicano

1 IDEA CHIAVE

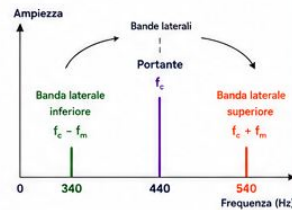
Si moltiplicano due SEGNALI sonori nel dominio del tempo.

Non si moltiplicano le frequenze, ma le onde (le loro ampiezze istantanee).



Cosa viene moltiplicato?
Vengono moltiplicati i SEGNALI (le loro ampiezze istantanee), non le frequenze.

2 SPETTRO DEL RISULTATO (caso semplice)



Nel caso semplice compaiono due bande laterali: $f_c - f_m$ e $f_c + f_m$ (la portante può ridursi o annullarsi).

Con segnali più complessi (non sinusoidali) compaiono molte altre componenti.

3 IMMAGINE MENTALE

Come due colori che si mescolano e creano nuovi colori.



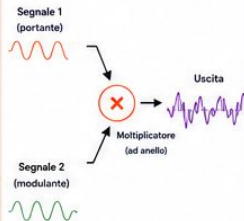
4 COSA SI SENTE

Suoni metallici, campane, gong, voci robotiche, effetti "alieni", sonorità inusuali.

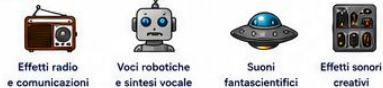


5 COME FUNZIONA (schema a blocchi)

Moltiplicando due segnali, il sistema genera nuove frequenze (bande laterali).



6 USI TIPICI



A CONFRONTO

CHE COSA FA?

Moltiplica due SEGNALI e genera nuove frequenze (bande laterali).

Modula continuamente l'altezza (frequenza istantanea) della portante e genera molte componenti spettrali.

RISULTATO PRINCIPALE

Bande laterali ($f_c - f_m$ e $f_c + f_m$) e, in generale, molte altre componenti.

Molte componenti spettrali (bande laterali multiple) attorno alla portante.

IMMAGINE CHIAVE

Due colori si mescolano e creano qualcosa di nuovo.



Una nota la cui altezza viene deformata continuamente da un'altra.



PAROLA CHIAVE

MULTIPLICAZIONE (di segnali)



MODULAZIONE (di frequenza)



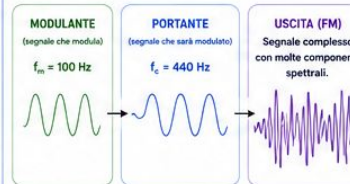
MODULAZIONE DI FREQUENZA (FM)

Un suono modula l'altezza di un altro

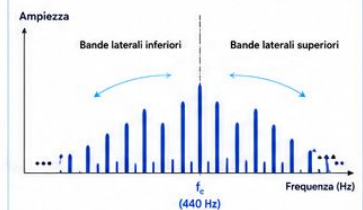
1 IDEA CHIAVE

La modulante fa variare in modo continuo la frequenza istantanea della portante.

Il risultato contiene molte componenti spettrali (bande laterali), non semplicemente un "vibrato veloce".



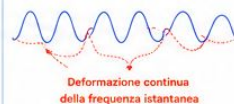
2 SPETTRO DEL RISULTATO (FM)



La spaziatura tra le linee è $\approx f_m$ (100 Hz)
Più l'indice di modulazione è alto, più componenti compaiono e più il suono diventa ricco e complesso.

3 IMMAGINE MENTALE

Non è solo un "vibrato veloce". La modulante deforma continuamente la frequenza della portante, creando una struttura spettrale ricca e complessa.



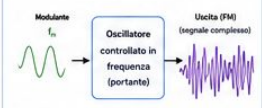
4 COSA SI SENTE

Suoni ricchi, brillanti, complessi: flauti, ottoni, campane, pianoforti sintetici, suoni elettronici moderni.



5 COME FUNZIONA (schema a blocchi)

La modulante controlla l'oscillatore di portante, facendo variare la sua frequenza istantanea. Questo genera molte componenti spettrali attorno alla portante.

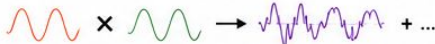


6 USI TIPICI



MODULAZIONE AD ANELLO (RING MODULATION)

Due suoni si incontrano (i loro segnali si moltiplicano) e producono nuove frequenze (bande laterali e altre componenti).



LA DIFFERENZA IN UNA FRASE

MODULAZIONE DI FREQUENZA (FM)

Un suono modula continuamente l'altezza di un altro producendo molte componenti spettrali (bande laterali) disposte attorno alla portante.



DA RICORDARE

- Ring Modulation = moltiplicazione di segnali → nuove frequenze (bande laterali e altre componenti).
- FM = modulazione della frequenza → molte componenti spettrali attorno alla portante.
- Stesso obiettivo: creare nuovi timbri!



Tartini e la Modulazione ad Anello (Ring Modulation)

Un'idea comune → la generazione di nuove frequenze → sia nel terzo suono di Tartini, sia nella modulazione ad anello compaiono frequenze che non appartengono ai due suoni iniziali. L'interazione tra due frequenze genera infatti nuove componenti sonore.

- **Tartini** → un fenomeno acustico e percettivo. Quando due altezze vengono suonate simultaneamente, l'orecchio può percepire un ulteriore suono grave, detto tono differenziale o terzo suono di Tartini. Se le frequenze sono f_1 e f_2 , il tono differenziale corrisponde a $f_2 - f_1$.
- **Modulazione ad anello** → un fenomeno elettronico. La modulazione ad anello moltiplica due segnali sonori (*carrier* e *modulator*) generando nuove componenti spettrali. Nel caso più semplice compaiono: $f_c + f_m$ e $f_c - f_m$ (frequenza somma e frequenza differenza).

Tartini → fenomeno acustico e percettivo; il nuovo suono emerge nell'ascolto; non viene generato direttamente da un dispositivo.

Modulazione ad anello → fenomeno elettronico; le nuove frequenze sono realmente presenti nel segnale; vengono prodotte dalla moltiplicazione dei due segnali.

Si può considerare il terzo suono di Tartini come un lontano antecedente concettuale della modulazione ad anello. In entrambi i casi l'interazione tra due suoni produce nuove frequenze. La differenza → in Tartini il fenomeno è acustico-percettivo, nella modulazione ad anello è ottenuto artificialmente attraverso un processo elettronico.

Gli antecedenti della sintesi FM

La sintesi FM nasce da un'idea semplice → una frequenza modifica continuamente l'altezza di un'altra. Questo accade già nel *vibrato* di un cantante o di un violinista. Nel vibrato la modulazione è lenta (pochi Hz), mentre nella FM è molto rapida (decine, centinaia o migliaia di Hz). Quando la frequenza di modulazione supera circa 20–30 Hz, l'orecchio non percepisce più una semplice oscillazione dell'altezza: il vibrato si trasforma progressivamente in timbro.

Molte *sirene* meccaniche producono piccole oscillazioni periodiche della frequenza. Non è ancora FM, ma il principio è simile: una frequenza viene continuamente perturbata da un'altra oscillazione. La sintesi FM $\approx$ una versione controllata, portata all'estremo, di questo fenomeno.

Le campane e i metalli percossi producono spettri complessi e ricchi di componenti non armoniche. Con la sintesi FM è che **Chowning** scoprì che essa poteva generare timbri simili a quelli di campane, gong e metalli percossi.

4. Il vero antecedente: la modulazione radio e le telecomunicazioni. Nel XX secolo erano già utilizzate la AM (Amplitude Modulation) e la FM (Frequency Modulation). Chowning ebbe l'intuizione di utilizzare la FM non per trasmettere informazioni, ma per creare nuovi timbri musicali. Da una tecnica nata per la radio nacque così una delle più importanti forme di sintesi sonora del XX secolo.