

“I segreti della natura si rivelano più prontamente quando vengono tormentati dall'arte che quando sono lasciati a se stessi.”

Ruggero Bacone (1214 -1294)

8 Maggio 2023

Giampaolo Co'

Fisica e Musica

Perché è piacevole ascoltare musica

La nostra relazione con l'ambiente che ci circonda è mediata dai cinque sensi.

Udito → Suono → Musica

Fisica Fisiologia Psico-sociologia

Un corpo che si muove in un mezzo materiale genera compressione della materia del mezzo.



Propagazione della perturbazione.

Il trasferimento di energia e impulso senza trasferimento di materia è quello che caratterizza il fenomeno fisico delle onde,

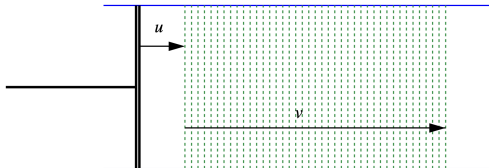
Onda sonora

Di interesse per la musica

Vibrazione - moto attorno ad una posizione di equilibrio.

Variazioni di densità e pressione i cui valori sono molto più piccoli dei valori che queste due quantità hanno quando non sono perturbate.

Onde sonore sono in un regime lineare, e vale il principio di sovrapposizione: l'onda sonora risultante dall'incontro tra due, o più onde, è data dalla loro somma algebrica.



Onda longitudinale.

A area del pistone : P - pressione ; ρ_0 densità di materia
 u - velocità del pistone ; v - velocità del suono

Impulso del pistone = $(A\Delta P)\Delta t$

Massa coinvolta dalla perturbazione = $\rho_0 V = \rho_0(Av\Delta t)$

Uguaglianza tra impulso trasferito e variazione dell'impulso del gas

$$(A\Delta P)\Delta t = \rho_0(Av\Delta t)u \longrightarrow \Delta P = \rho_0 vu$$

Variazione del volume per la compressione $\Delta V = -Au\Delta t$

$$\frac{-\Delta V}{V} = \frac{Au\Delta t}{Av\Delta t} = \frac{u}{v}$$

$$v = \frac{u}{\frac{-\Delta V}{V}} = \frac{\Delta P}{\frac{-\Delta V}{V}} \frac{1}{\rho_0 v}$$

$$v = \sqrt{\left(-\frac{\Delta P}{\Delta V/V}\right) \frac{1}{\rho_0}}$$

Materiali	Velocità del suono	Bulk modulus
	[m / s]	G Pa
Aria	343	1.42×10^{-4}
Acqua	1484	2.2
Ghiaccio	3200	8.4
Vetro	5300	35 - 55
Acciaio	5200	160
Piombo	1200	4.6
Titanio	4950	120



$$s(x, t) = A \sin k(x - vt)$$

A - l'ampiezza di oscillazione.

k - numero d'onda.

v - velocità di propagazione dell'onda.

$\lambda = 2\pi/k$ - lunghezza d'onda.

T - periodo

$\nu \equiv 1/T = v/\lambda$ - frequenza.

$k\nu = \omega = 2\pi\nu$

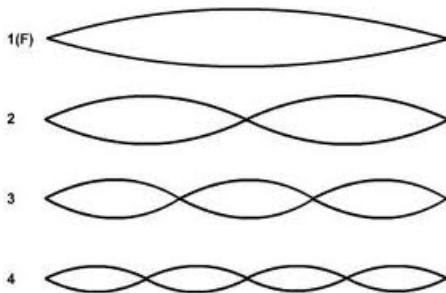
Intensità dell'onda

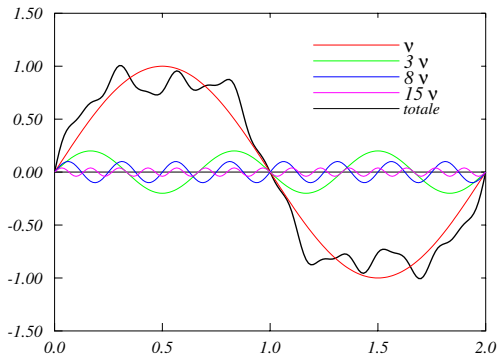
$$I = \left(\frac{\Delta E}{\Delta t} \right) \left(\frac{1}{A} \right)$$

Per un'onda armonica

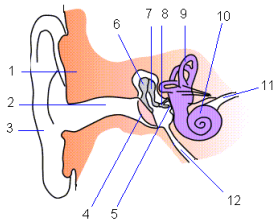
$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 v}$$

P pressione all'equilibrio.





Meccanica - Neurologia - Psicologia



Orecchio esterno: 1 pericondrio, 2 condotto uditivo, 3 padiglione auricolare.

Orecchio medio: 4 timpano, 5 finestra ovale, 6 martello, 7 incudine, 8 staffa.

Orecchio interno: 9 canali semicircolari, 10 coclea, 11 nervo acustico, 12 tromba di Eustachio.

Frequenze

$$\nu_{\min} = 20 \text{ Hz} ; \nu_{\max} = 20 \text{ kHz}$$

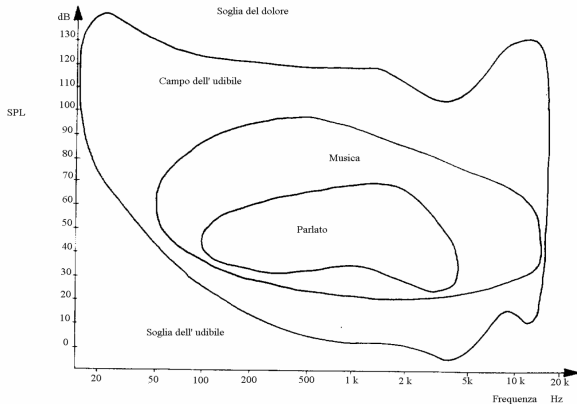
Intensità

$$I_{\min} = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} ; I_{\max} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{\min}}$$

$$\beta_{\min} = 0 \text{ dB} ; \beta_{\max} = 120 \text{ dB}$$

Percezione del suono



SPL - Livello di Pressione Sonora (dB)

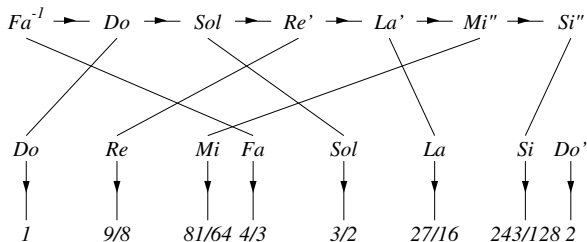
Potere risolutivo

L'orecchio crea suoni

Evoluzione biologica

- accordare $\longrightarrow$ mettere d'accordo
- intervallo d'ottava $\longrightarrow$ frequenza doppia
- intervallo di quinta $\longrightarrow 3/2$

Scala pitagorica



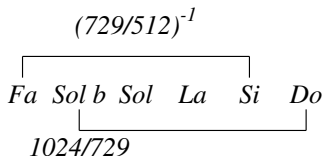
$$\begin{aligned}
 2 Do &= Do' ; \frac{3}{2} Do = Sol \\
 \frac{3}{2} Sol &= \left(\frac{3}{2}\right)^2 Do = Re' ; \frac{1}{2} Re' = Re = \frac{9}{8} Do \\
 \frac{3}{2} Re' &= La' ; \frac{1}{2} La' = \frac{3^3}{2^4} Do = La \\
 \frac{3}{2} La' &= \left(\frac{3}{2}\right)^4 Do = Mi'' ; \left(\frac{1}{2}\right)^2 Mi'' = \frac{3^4}{2^6} Do \\
 \frac{3}{2} Mi'' &= \left(\frac{3}{2}\right)^5 Do = Si'' ; \left(\frac{1}{2}\right)^2 Si'' = \frac{3^5}{2^7} Do \\
 \frac{2}{3} Do &= Fa^{-1} , 2Fa^{-1} = \frac{4}{3} Do
 \end{aligned}$$

La scala musicale

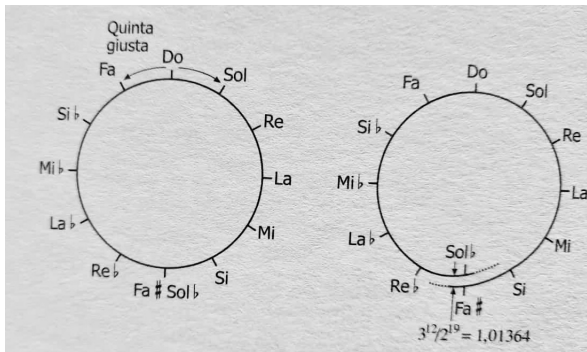
Do-Mi $81/64$ e poi Si-Fa ($512/729$)

Trasposizione di una nota:

$$\frac{81}{64} \frac{9}{8} = \frac{729}{512} = 1.42383 \text{ Re-Fa\#} \quad ; \quad 2 \frac{512}{729} = \frac{1024}{729} = 1.40466 \text{ Do' - Solb}$$



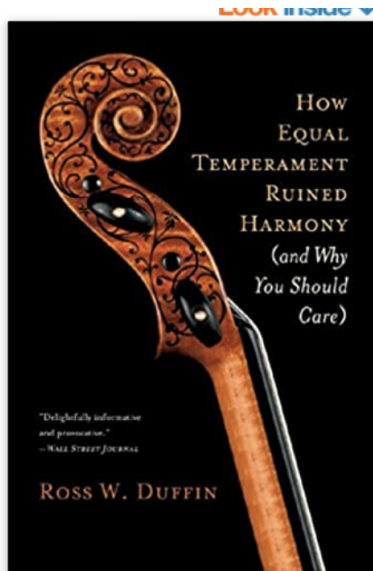
La scala musicale



Scala temperata

Il rapporto di ottava è diviso in 12 parti uguali (semitoni), quindi il rapporto tra due semitoni successivi è $2^{1/12}$.

Nota	Pitagorica	Temperata
Do	1.00000	1.00000
Re	1.12500	1.12246
Mi	1.26563	1.25992
Fa	1.33333	1.33484
Sol	1.50000	1.49831
La	1.68750	1.68179
Si	1.89844	1.88775
Do'	2.00000	2.00000



“Avendo un giorno considerato ed esaminato per mezzo dei Logaritmi l'antica suddivisione dell'ottava in 12 parti uguali, che Aristosseno già seguiva, e avendo osservato quanto tali intervalli equalizzati si avvicinano di più a un impiego utile, di quelli della scala ordinaria, mi sono convinto che per lo più vi si potrebbe attenere nella pratica; e benché i musicisti e le orecchie più sensibili vi troveranno qualche imperfezione percepibile, pressoché tutti gli ascoltatori non ne avvertiranno alcuna, e ne saranno estasiati.”

Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646 - 1716)

J. S. Bach: BWV 846-893

*“Das wholtemperierte Clavier,
oder Praeludia, und Fugen durch alle Tone und Semitonia ”*

“ .. la nostra scala maggiore diatonica può essere considerata un prodotto naturale quanto la raffigurazione di un arco gotico [...]. Nella selezione dei particolari gradi di altezza dei suoni emergono subito chiaramente le variazioni dovute al gusto nazionale. Il numero di scale usate dalle varie nazioni è tutt'altro che piccolo. ”

Hermann von Helmholtz

Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik (1863)

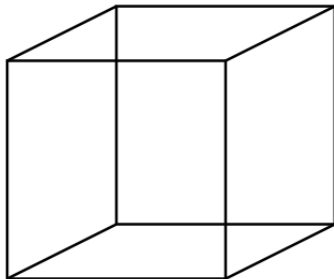
[Lo studio della sensazione del tono come fondamento fisiologico della teoria della musica]

Preferiamo intervalli in cui i rapporti tra frequenze sono molto vicini a rapporti semplici tra numeri interi.

La suddivisione in ottave è un fenomeno musicale universale, e anche l'intervallo di quinta (quasi universale).

In generale le scale musicali basate sull'ottava contengono dalle 4 alle 12 note.

Esperienza nell'ascolto che prefigura l'attesa delle note negli intervalli definiti.

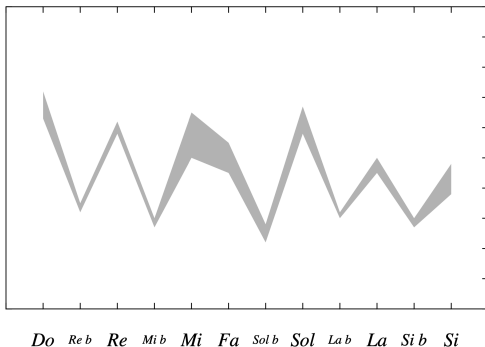


Cubo di Necker

Carol Krumhansl - Cornell University

L'apprendimento statistico governa la nostra percezione e aspettativa delle note che compongono una melodia.

Il concetto di tonalità svolge un ruolo **cognitivo** nella musica. L'organizzazione tonale crea un quadro per dare un senso di orientamento e una serie di punti di riferimento per seguire una linea melodica, e armonica.



Frequenza relativa dell'occorenza delle note nelle tonalità maggiori della musica occidentale tra il XVIII e gli inizi del XX secolo.

“L'uomo nel cui cuore la musica è senza eco, l'uomo che non si commuove a un bel accordo di suoni, è capace di tutto, di tradire, di ferire, di rubare, e moti del suo spirito sono foschi quanto la notte e le sue passioni nere quanto l'inferno. Non ti fidare di lui. Ascolta la musica. ”

William Shakespeare - Il mercante di Venezia [1594-1598], Atto V.