

Fisica per applicazioni di realtà virtuale

Anno Accademico 2022-23

Prof. Matteo Brogi

Dipartimento di Fisica, stanza B3, nuovo edificio

Lezione 17

Acustica parte 2

Esercizi introduttivi (continua da lezione 16)

Esercizio 10.03: A volume massimo, un altoparlante riproduce frequenze tra 30 Hz e 18 kHz con una risposta costante entro 3 dB. Di quale fattore cambierà l'intensità per la massima variazione di volume?

Esercizio 10.04: Una fotocamera è equipaggiata con un sistema autofocus che emette impulsi ad ultrasuoni accoppiato a un rivelatore di onda riflessa. Calcolare la sensibilità temporale per oggetti posti a 1 m e 20 m dalla fotocamera.

Esercizio 10.05: Il livello di intensità sonora di un aereo a 30 m di distanza è 140 dB. Qual è il livello a 300 m, ignorando le riflessioni del terreno?

Esercizio 10.04 e design di un apparecchio in VR

$1 \text{ m} \Rightarrow 6 \text{ ms}$ a temperatura ambiente (ultrasuoni)

Target frame rate in VR: 75 fps

$$1 \text{ frame} = 1 / 75 \text{ s} = 13.3 \text{ ms}$$

*Invio e ricezione dell'impulso: $\sim 1/2$ del frame,
lasciando poco tempo per processare l'informazione*

velocità $v = v(T)$

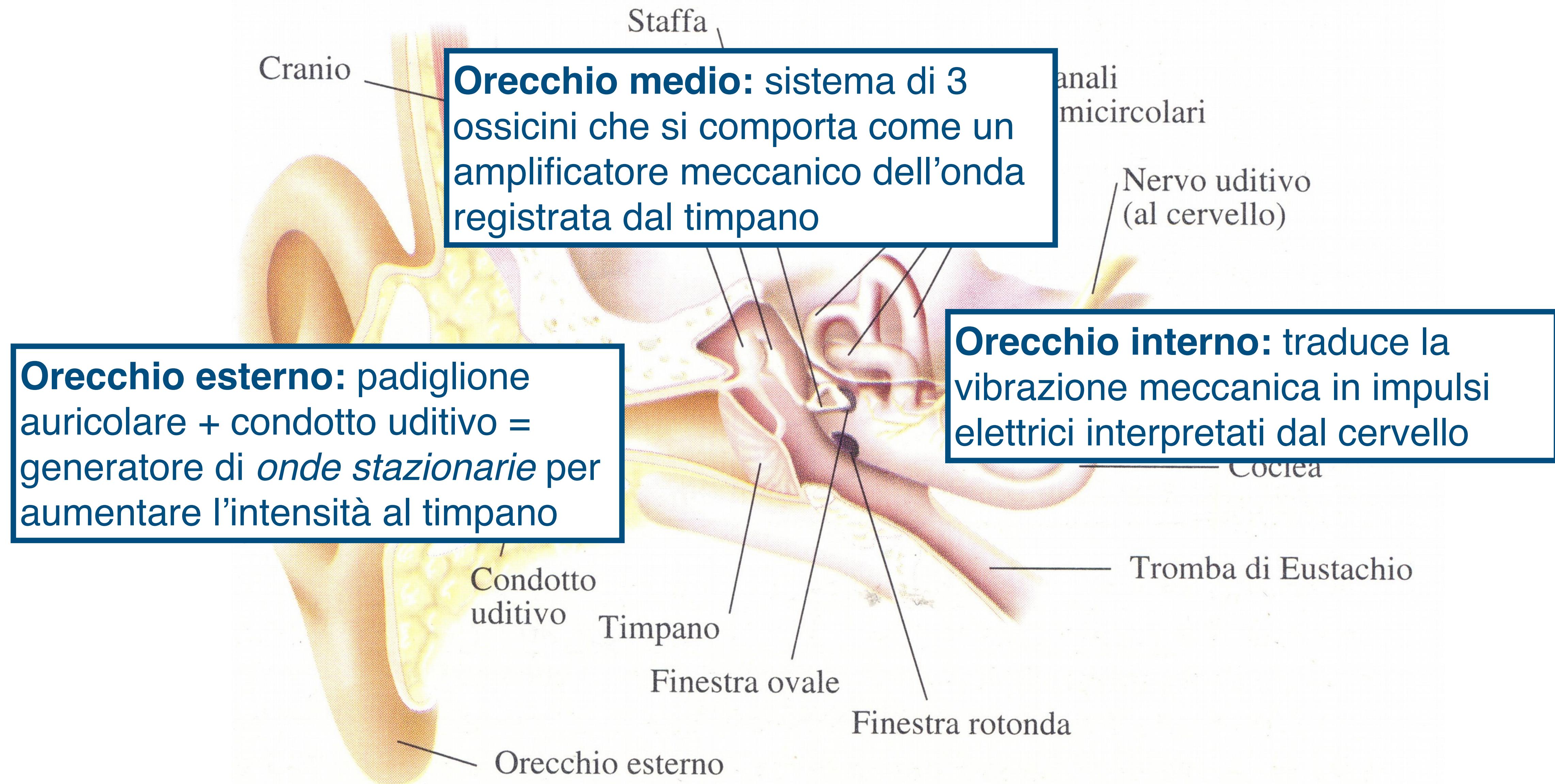
*A meno di non correggere per la T ambiente, la misura di distanza è sbagliata
(già un grosso problema per le fotocamere)*

Soluzione = sensori infrarossi

Infrarosso = onda elettromagnetica \Rightarrow velocità $c \sim 10^6 \times v.$ suono

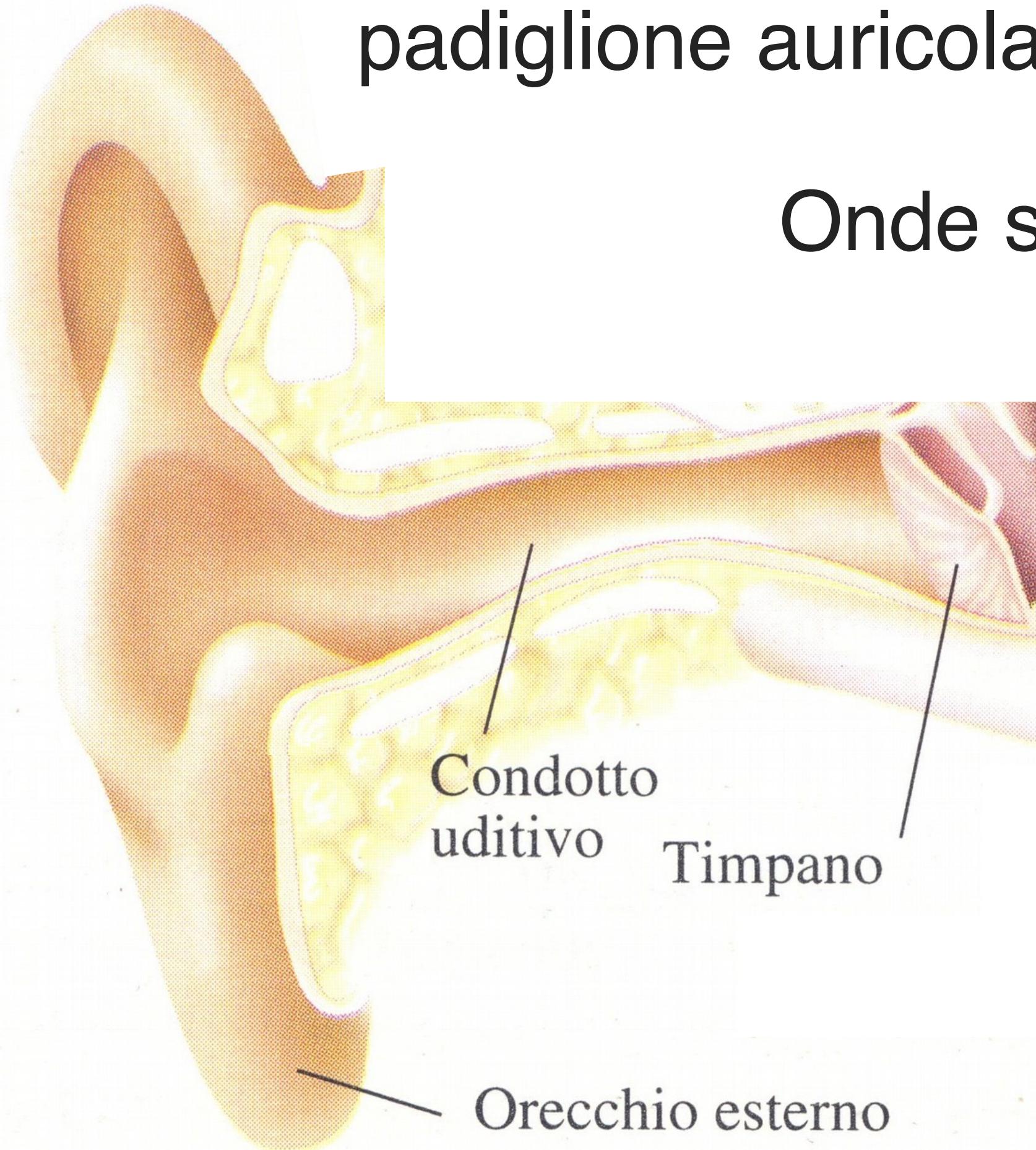
**Sensori infrarossi sono montati sull'headset degli apparecchi VR
ma richiedono risoluzione temporale 10^6 volte maggiore (ns)**

Struttura anatomica dell'orecchio umano



Orecchio esterno: caratteristiche

Onde sonore raccolte dal padiglione auricolare

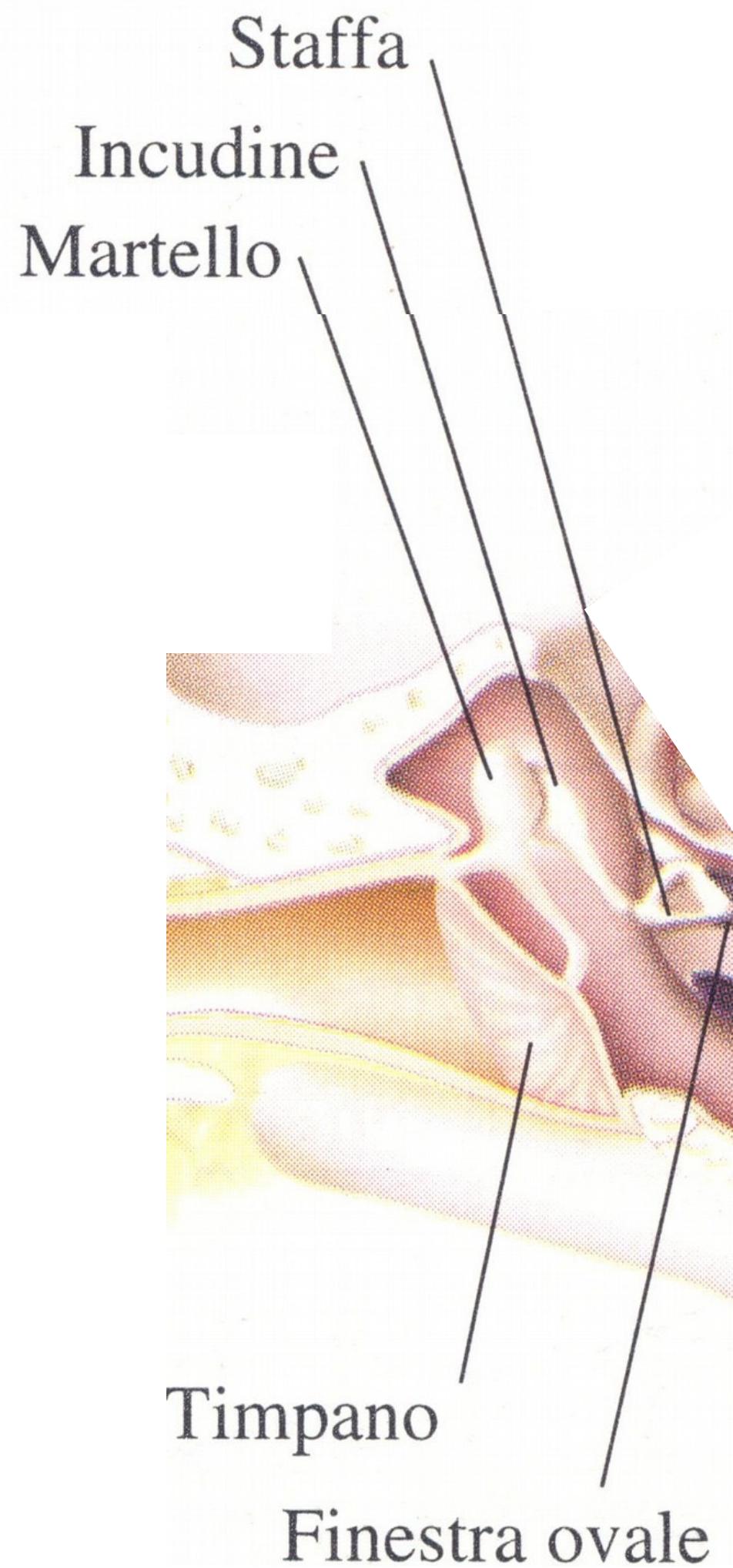


Onde sonore viaggiano attraverso il condotto uditivo

Onde sonore arrivano al timpano

Timpano
Trasforma l'onda meccanica di pressione (longitudinale) in una vibrazione meccanica della membrana (trasversale) con cui il timpano oscilla

Orecchio medio: caratteristiche



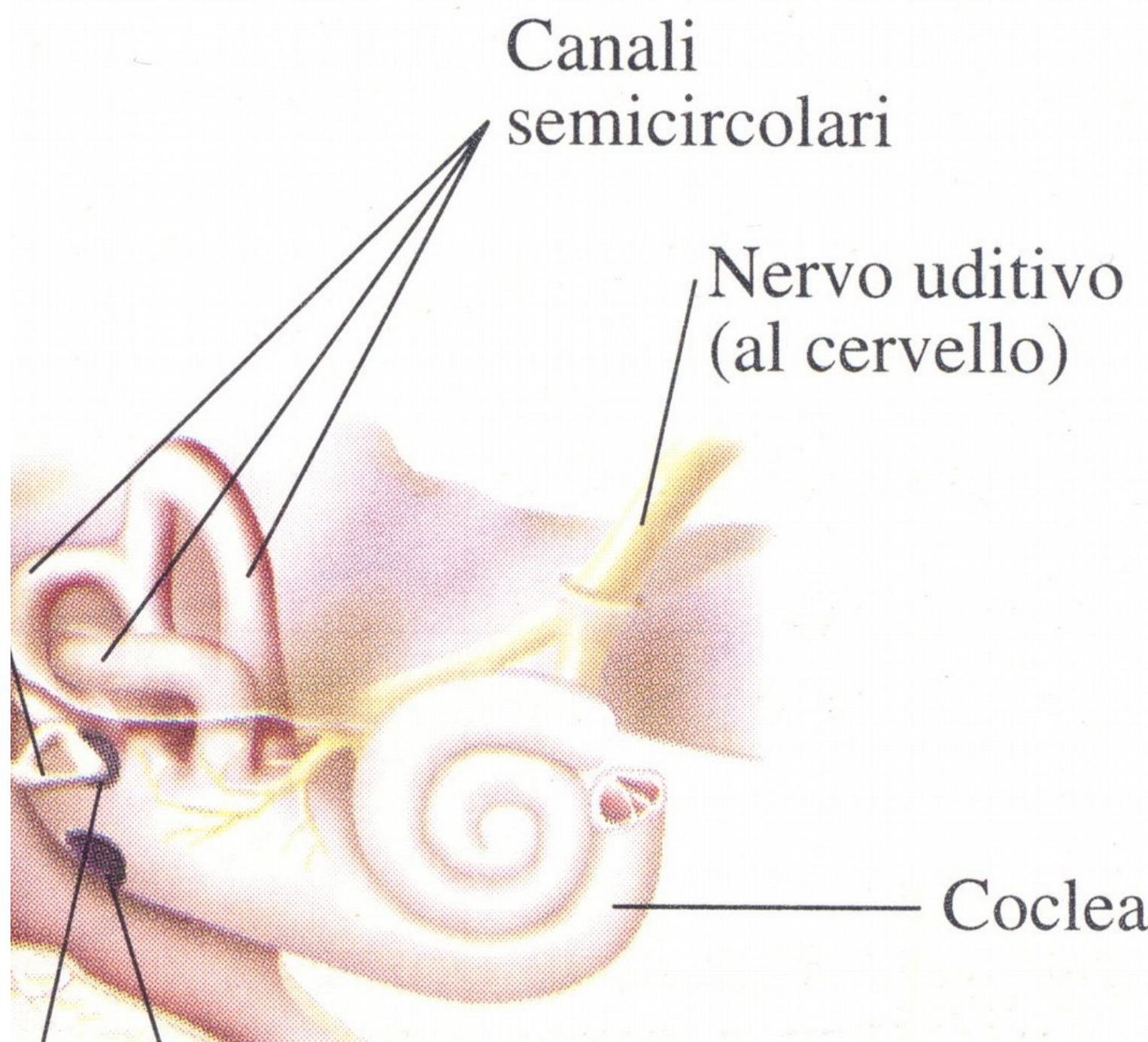
Un amplificatore (molto efficiente)
3 **ossicini**: martello, incudine e staffa

Usa gli effetti di leva per trasferire e
amplificare l'energia che giunge al
timpano alla finestra ovale

Amplificazione ulteriormente aiutata dal
rapporto di superficie fra timpano (più
esteso) e finestra ovale (più piccola)

Il fattore di amplificazione è circa 40

Orecchio interno: caratteristiche



Finestra ovale

Converte una vibrazione di membrana in
una nuova onda di pressione
(nel fluido contenuto nella coclea)

Canali semicircolari

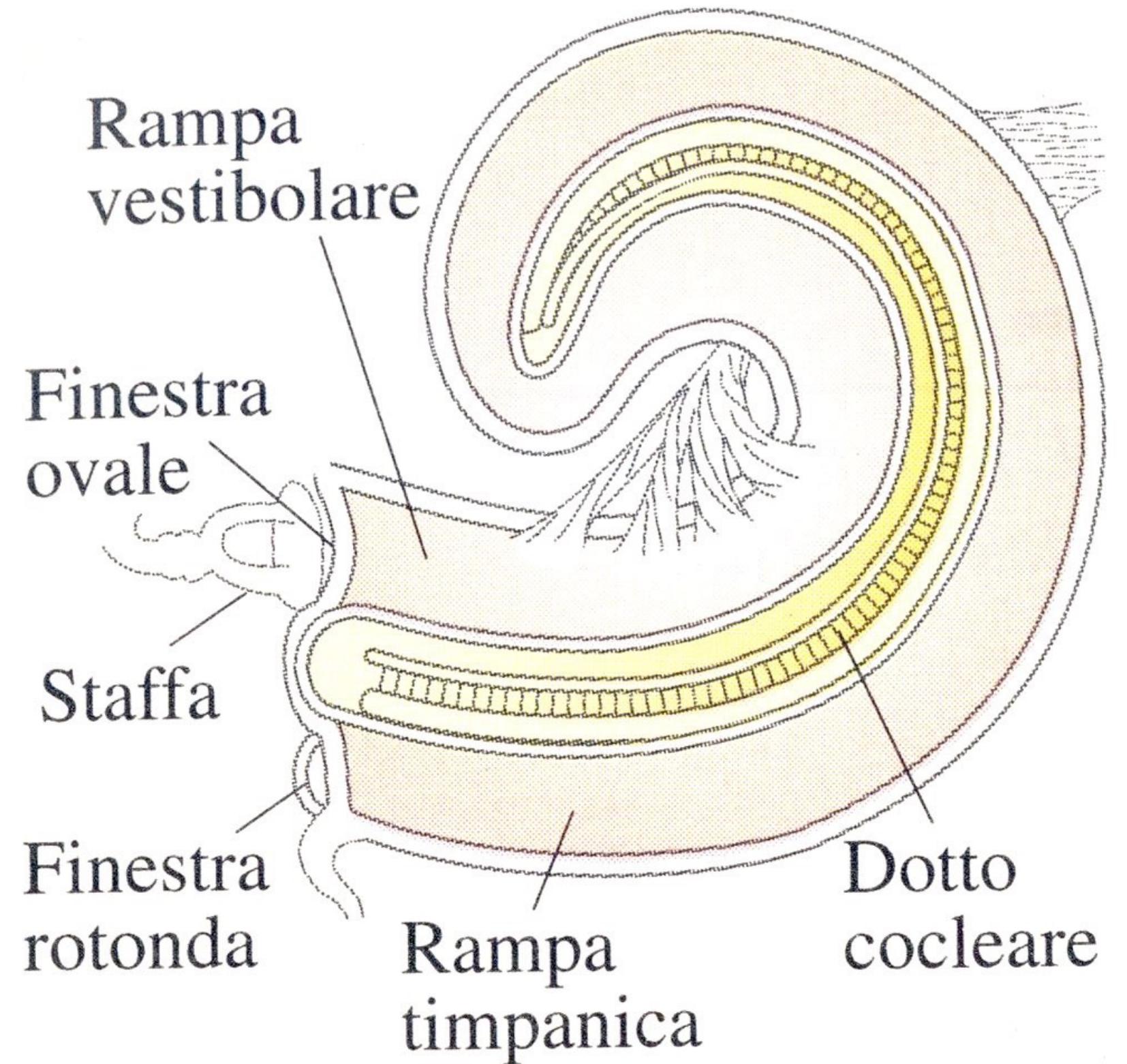
un “equalizzatore” che cambia lo spettro
del suono (ovvero i rapporti di intensità
tra le varie frequenze componenti)

Coclea

Trasforma un impulso meccanico in un
impulso elettrico, connesso al cervello
tramite il **nervo uditivo**

Orecchio interno: la coclea

Una doppia rampa separata dal dotto cocleare



Rampa vestibolare/timpanica

Riceve onda pressione da finestra ovale e trasporta verso la finestra rotonda attraverso un **fluido ad alta densità** (smorzamento)

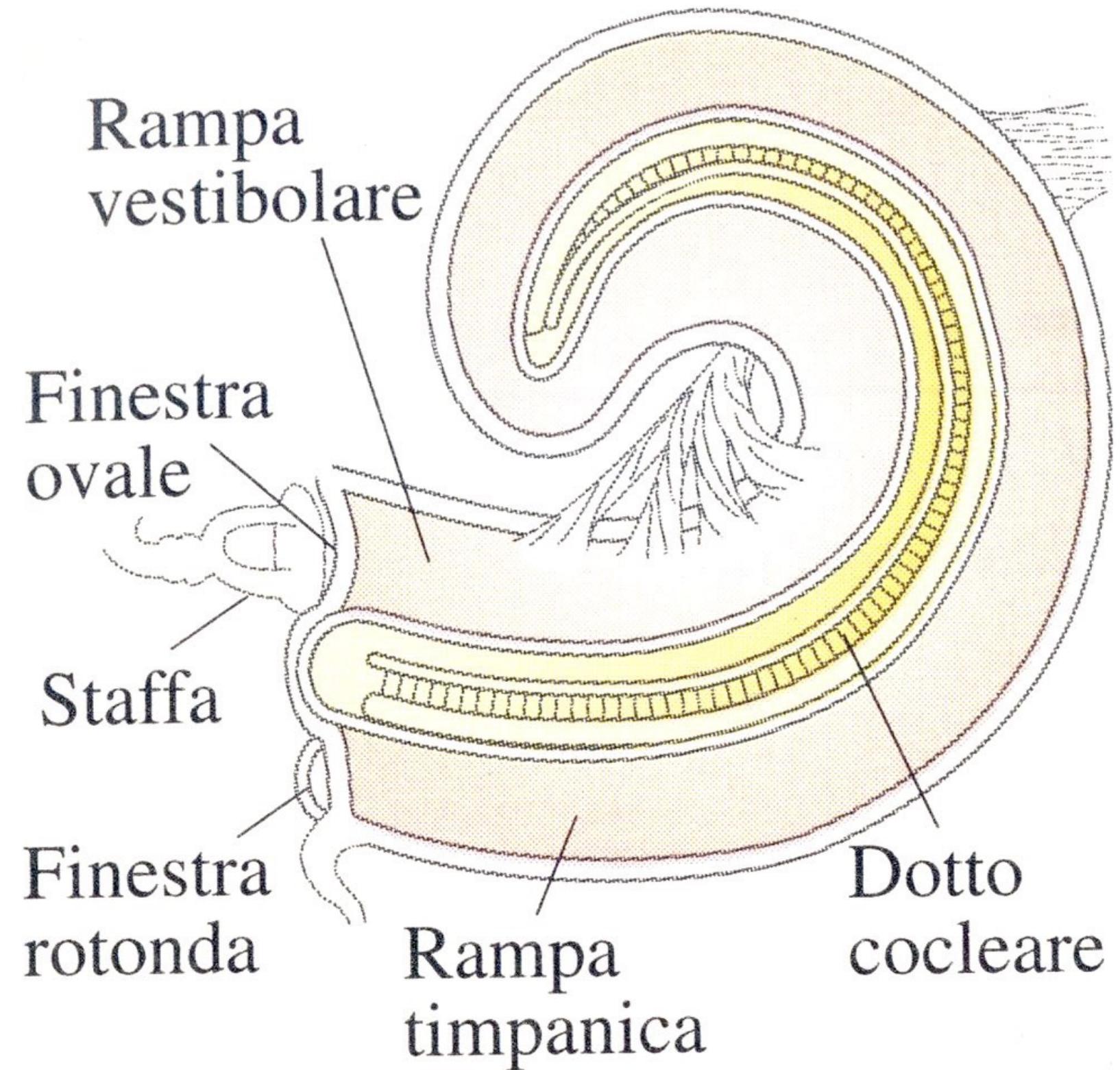
Dotto cocleare + organo di Corti

30,000 terminazioni nervose (ciglia) su una membrana

Finestra rotonda

Ammortizza ulteriormente il suono e impedisce riflessione, ma il regime elastico ridotto con età / danno
⇒ riflessione onde ⇒ conversione in impulsi non funziona

La coclea e la perdita uditiva



Membrana del dotto cocleare

Più fina e tesa (adatta ai bassi) vicino all'entrata,
più spessa e rilassata (adatta agli alti) vicino alla
finestra rotonda

Finestra rotonda

Con il tempo perde la capacità di
smorzare onde ⇒ genera onde riflesse

Funzionamento dell'organo di Corti

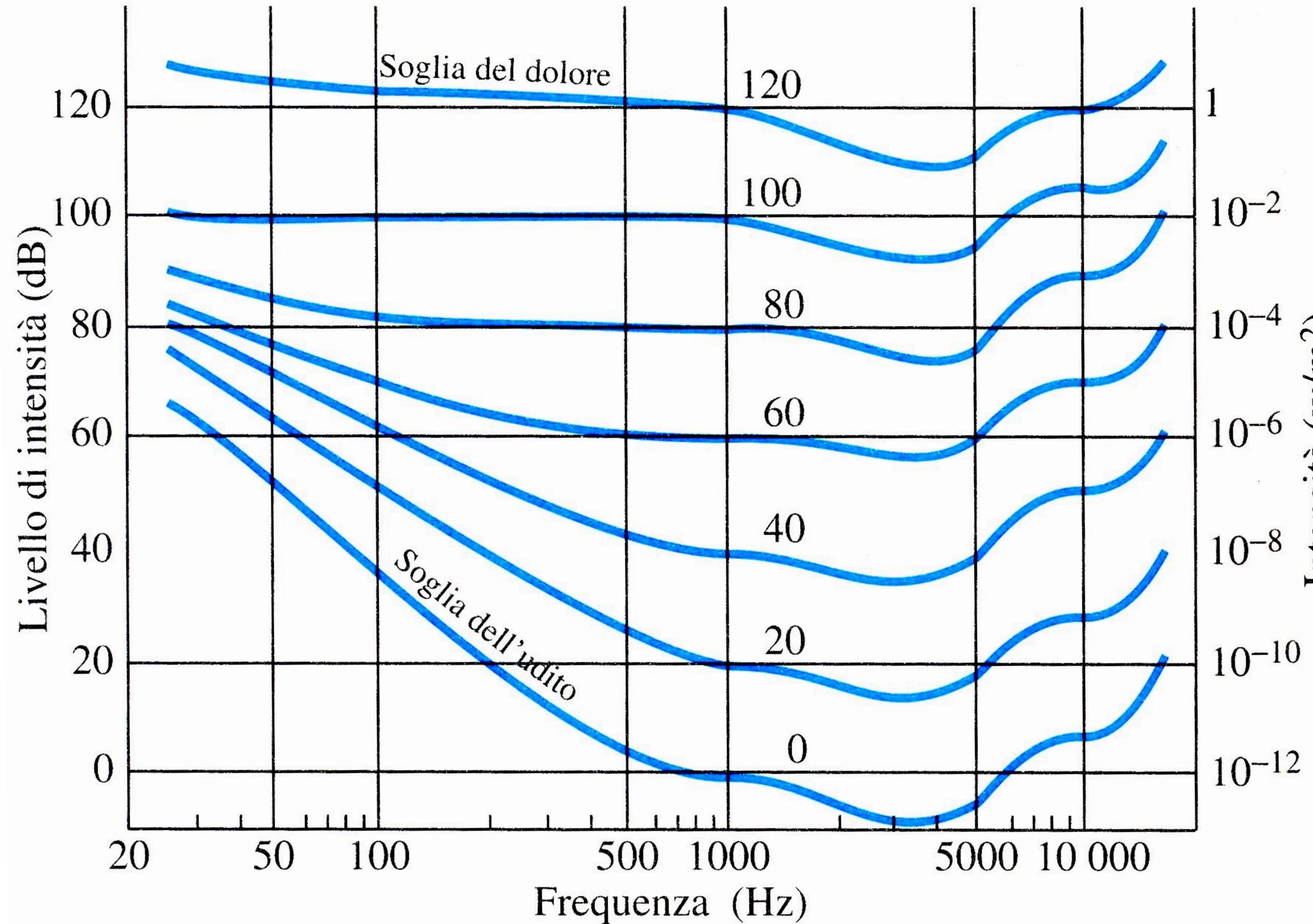
Compromesso in presenza di onde riflesse (interferenza)

Effetto più importante per frequenze captate in vicinanza (toni alti)

Risposta in frequenza dell'orecchio umano

La sensibilità acustica dell'orecchio cambia sull'intervallo di frequenze udibili

Curve isofoniche

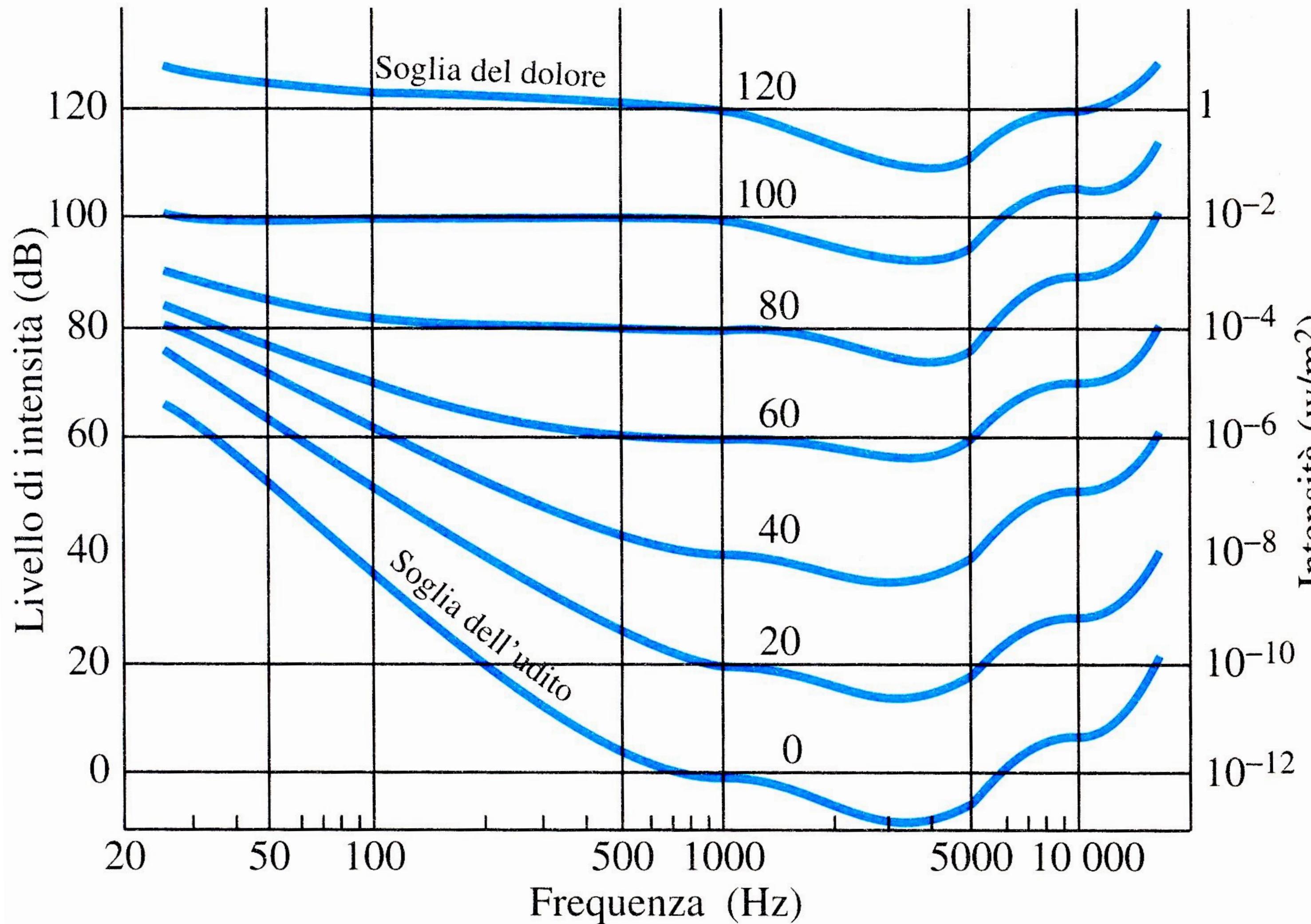


62 dB a 100 Hz =
40 dB a 1 kHz
(sensazione uditiva)

Risposta più costante
ad alta intensità: basse
intensità necessitano di una
correzione non-lineare
(controllo loudness)

Conseguenze della risposta in frequenza dell'orecchio

Curve isofoniche



Suoni con uguale
intensità ma frequenza
diversa vengono
percepiti diversamente

Soglie dell'udito / dolore
drasticamente diverse

Sensibilità ottimale: 2-5 kHz
(armoniche superiori tipica
dei fonemi del **parlato**)

Massima sensibilità a
3-4 kHz: pianto del neonato
(minore di $1\text{E}-12 \text{ N m}^{-2}$)

Sorgenti sonore e natura del suono

Nota	Frequenza (Hz)
Do	262
Do♯ o Re♭	277
Re	294
Re♯ o Mi♭	311
Mi	330
Fa	349
Fa♯ o Sol♭	370
Sol	392
Sol♯ o La♭	415
La	440
La♯ o Si♭	466
Si	494
Do'	524

Strumenti musicali = sorgenti sonore

- vibrazioni di parti metalliche o legnose
- onde stazionarie in corde
- onde stazionarie in tubi

Causa-effetto (cfr. lezioni 14-15)

Le dimensioni dello strumento, tensione della corda, etc. determinano λ , $v \Rightarrow f$

Sorgenti sonore

trasferiscono vibrazione all'aria / altre parti
con la stessa frequenza

Le note musicali sono definite dalla frequenza

Strumenti musicali e il concetto di “nota”

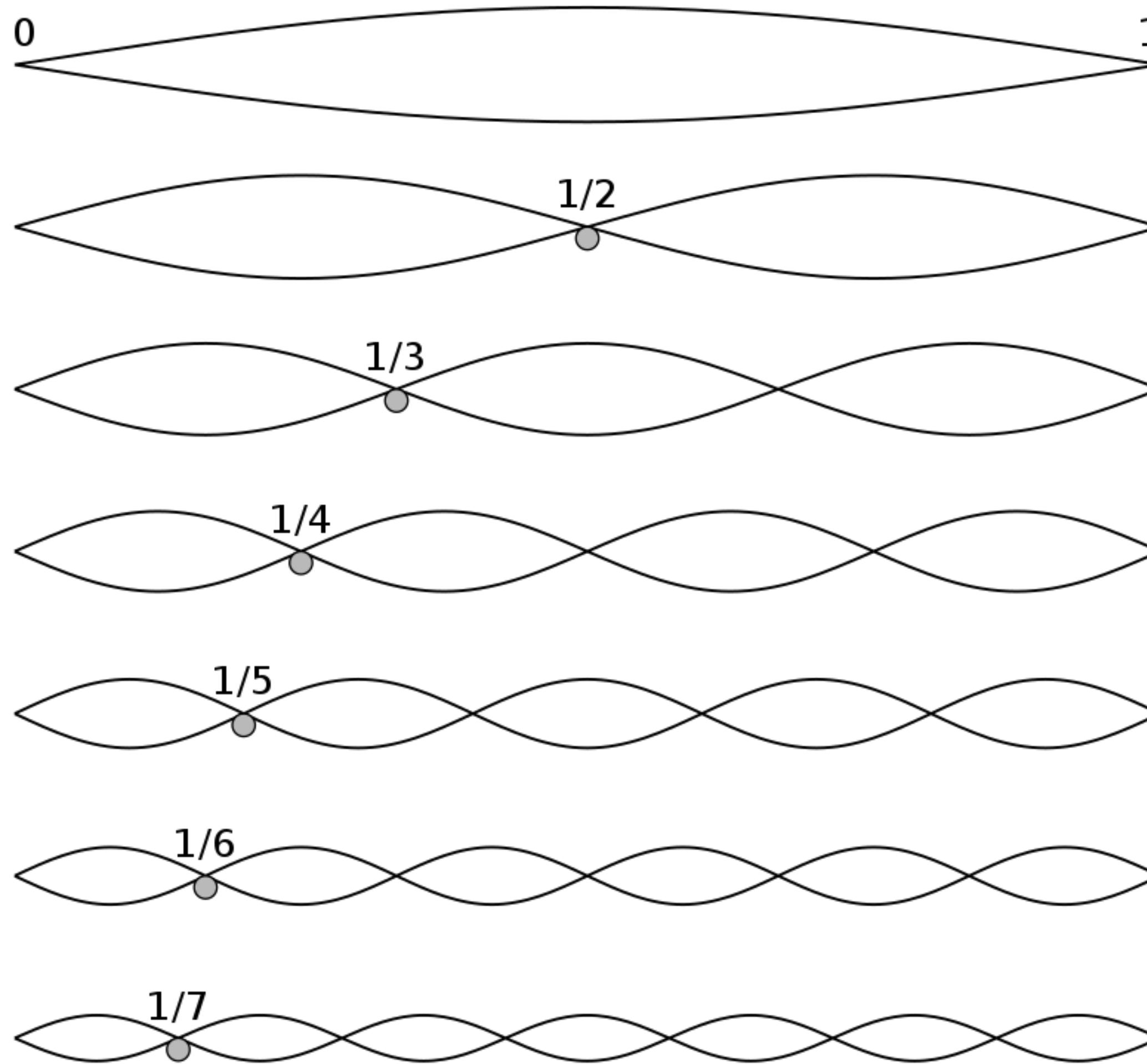
Nota	Frequenza (Hz)
Do	262
Do♯ o Re♭	277
Re	294
Re♯ o Mi♭	311
Mi	330
Fa	349
Fa♯ o Sol♭	370
Sol	392
Sol♯ o La♭	415
La	440
La♯ o Si♭	466
Si	494
Do'	524

La nostra percezione uditiva considera “armoniosi” certi rapporti di frequenza tra onde diverse

I rapporti più assonanti sono
1:2 (ottava, Do-Do')
2:3 (quinta, Do-Sol)
3:4 (quarta, Do-Fa)
⇒ scale musicali (occidentali)

*Suddividere l'ottava in “semitoni” ha richiesto un'evoluzione storica: la musica occidentale usa il **temperamento equabile**:*
la frequenza aumenta a ogni semitono di $\sqrt[12]{2}$

Le note della scala e armoniche di un'onda stazionaria



$$f_1 = 262 \text{ Hz} \Rightarrow Do_1$$

$$f_2 = f_1 \times 2 = 514 \text{ Hz} \Rightarrow Do_2$$

$$f_3 = f_1 \times 3 = 786 \text{ Hz} \Rightarrow Sol_2$$

$$f_4 = f_1 \times 4 = 1048 \text{ Hz} \Rightarrow Do_3$$

$$f_5 = f_1 \times 5 = 1310 \text{ Hz} \Rightarrow Mi_3$$

$$f_6 = f_1 \times 6 = 1572 \text{ Hz} \Rightarrow Sol_3$$

$$f_7 = f_1 \times 7 = 1834 \text{ Hz} \Rightarrow Sib_3$$

La progressione continua per le altre note della scala

Nota: alcuni rapporti di frequenza (intervalli) sono *dissonanti*

Strumenti musicali a corda

Usano onde meccaniche **trasversali** su una corda



Plettro / dita: imprimono l'oscillazione

*Corda: modi delle onde stazionarie
Lunghezza e tensione determinano la frequenza*

*Vibrazione della corda trasferita alle
molecole dell'aria e da qui alla cassa
acustica anch'essa messa in vibrazione*

*La vibrazione della cassa acustica viene
trasferita nuovamente all'aria, amplificata*

In tutti questi passaggi la frequenza non cambia mai!

La lunghezza d'onda cambia in corda - aria - cassa di risonanza

Cambiamento del “tono” di uno strumento a corda



Chiavette: aggiustano la tensione della corda
⇒ cambiano la velocità dell'onda

Tasti: accorciano la lunghezza della corda
⇒ cambiano la lunghezza d'onda

Entrambe le operazioni selezionano la
frequenza dell'armonica fondamentale
supportata dalla corda
⇒ cambiano il **tono** dello strumento

Tono (la frequenza della fondamentale) ≠
timbro (l'insieme delle armoniche)

Esercizi sugli strumenti a corda

Esercizio 10.06: La nota più alta di un pianoforte ha una frequenza 150 volte maggiore della nota più bassa. Se la corda utilizzata per la nota più alta è lunga 3 m, di quanto deve cambiare la velocità dell'onda? Quanto sarebbe lunga la corda per la nota più bassa se tensione e densità lineare fossero invece costanti?

Esercizio 10.07: Una corda di violino lunga 32 cm viene accordata in modo da suonare il La della scala centrale a 440 Hz. Si determini:

- a) la lunghezza dell'onda armonica fondamentale;
- b) la frequenza e lunghezza d'onda nell'aria.

Esercizio 10.08: Nella scala progressiva degli armonici, il settimo intervallo (Do - Si b) e il nono (Do - Re) sono considerati dissonanti. Come si può progettare un pianoforte a livello del martelletto che percuote una corda per ovviare a questo problema?

Strumenti a fiato (aperti da entrambi i lati)

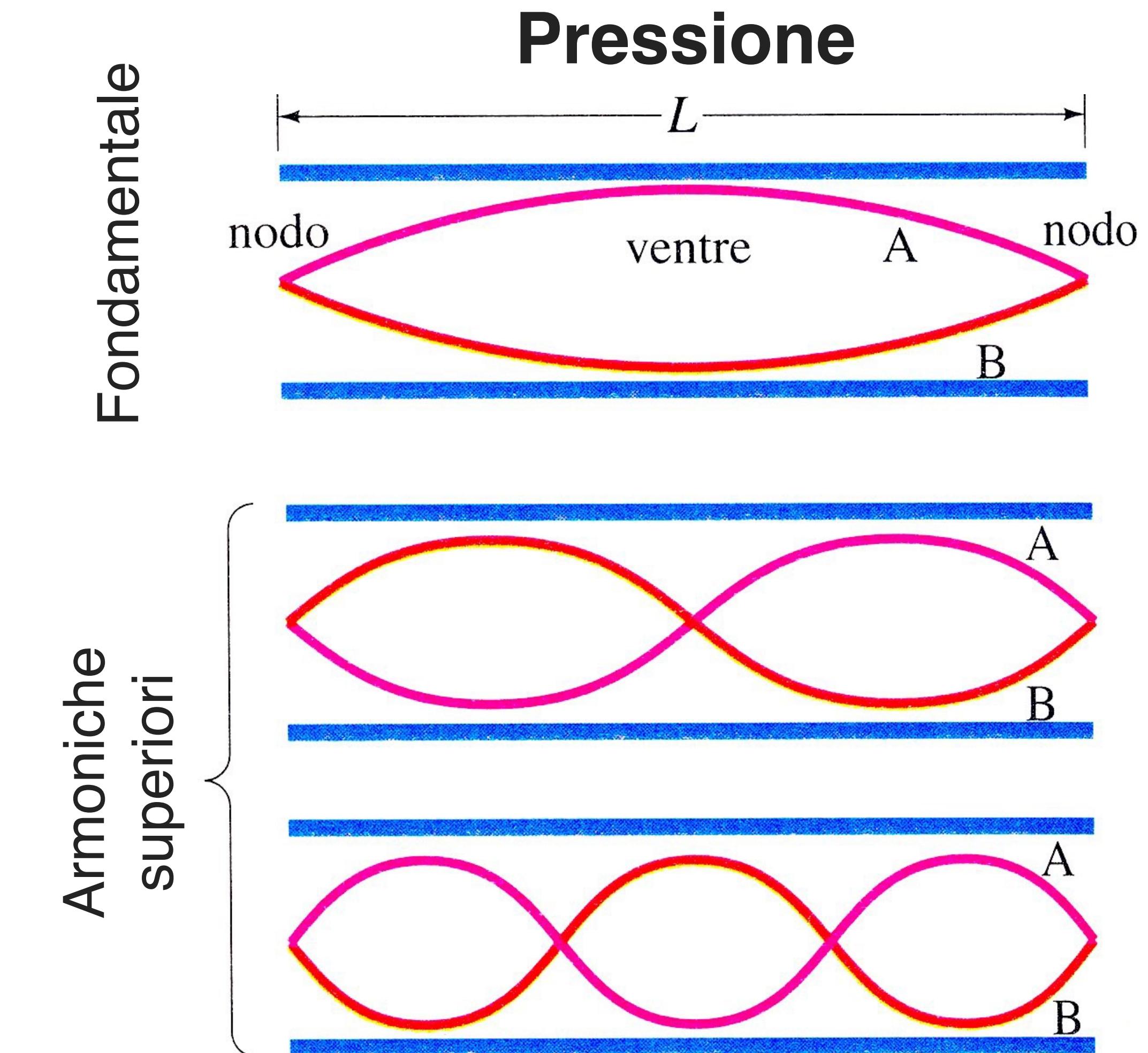
Usano onde **longitudinali** formate dall'aria dentro un tubo
(per es. canna d'organo, tromba e trombone, flauto)

Cfr. lezioni 14-15: si può ragionare
in termini di spostamento o pressione

Pressione è scelta logica: non si può
esercitare pressione sugli estremi
⇒ devono essere **nodi ($\Delta P=0$)**

Sia la **fondamentale** che tutte le
armoniche (tutti i multipli di frequenza)
possono essere supportati

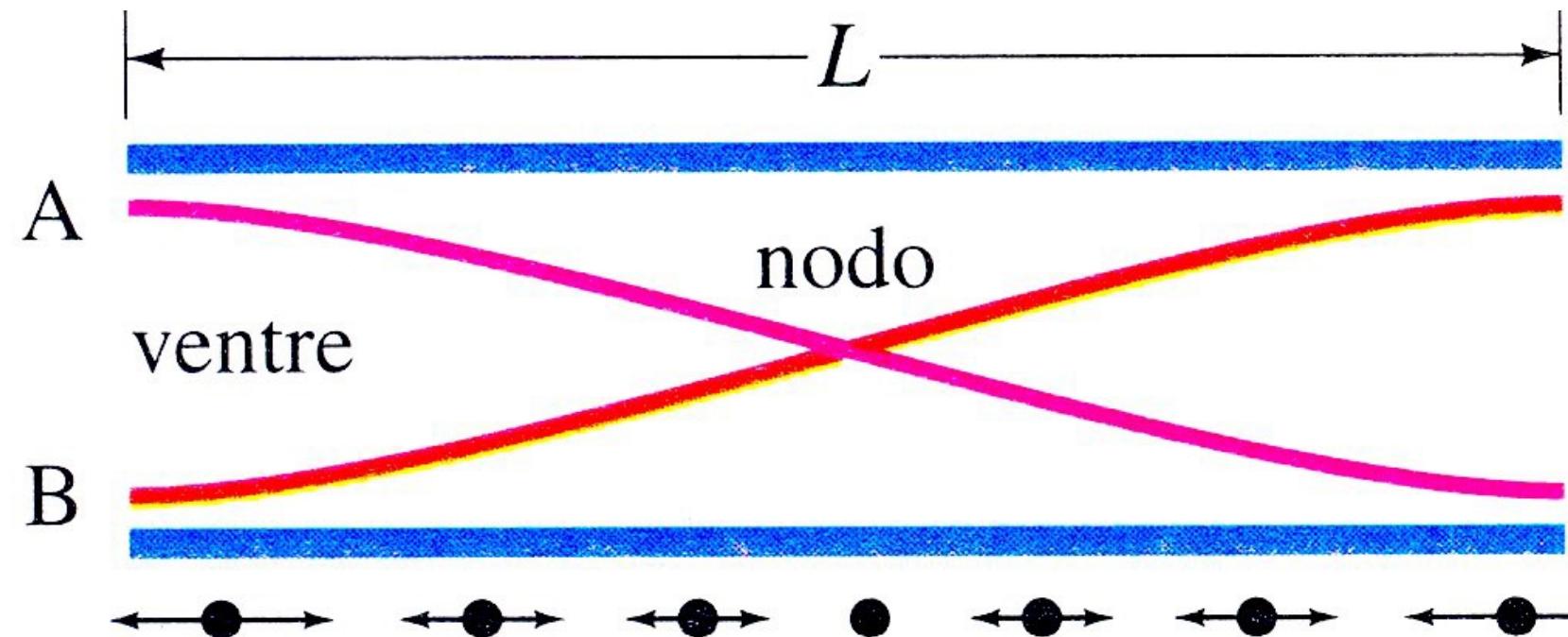
Per cambiare la **fondamentale** occorre
cambiare la lunghezza del tubo



Strumenti a fiato (aperti da entrambi i lati)

Lo **spostamento** è sfasato di $\pi/2$: massimo agli estremi
(non possiamo esercitare un vincolo esterno)

Spostamento

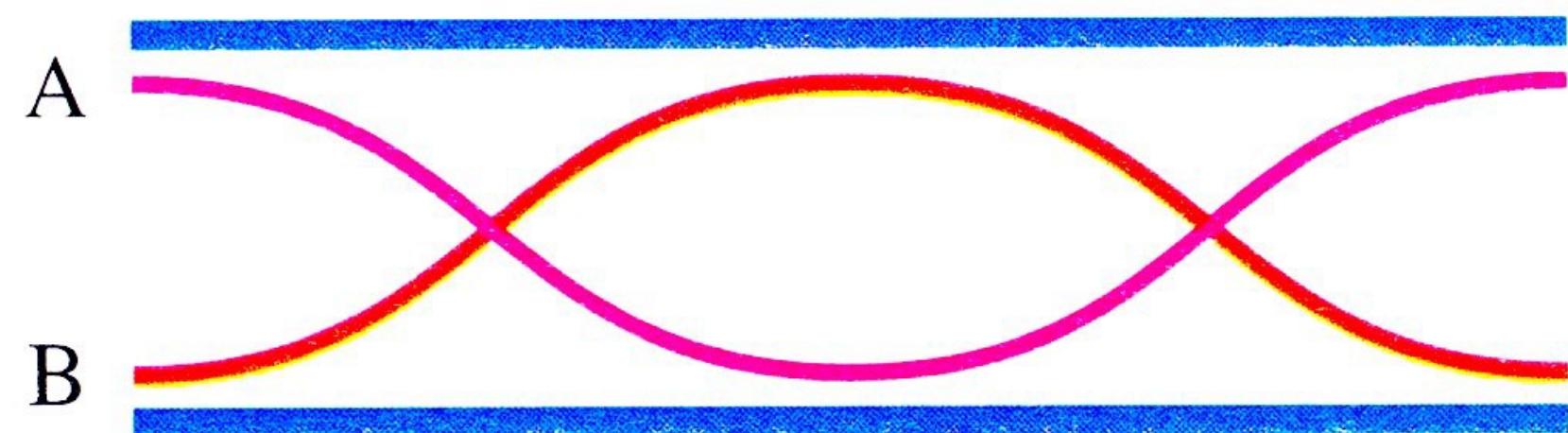


Prima armonica = fondamentale

$$L = \frac{1}{2} \lambda_1$$

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

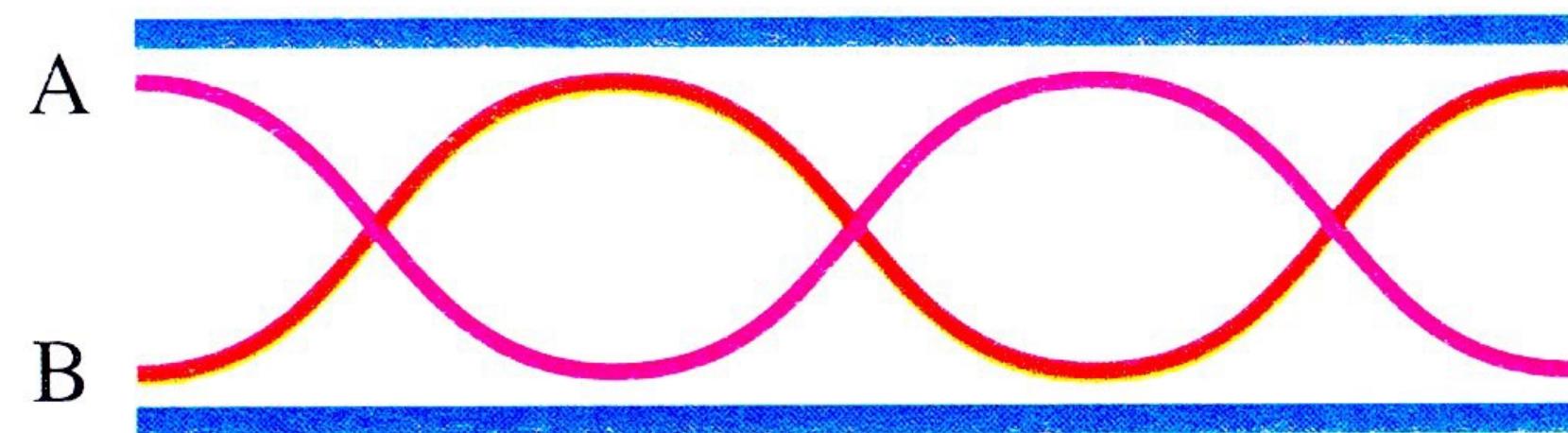
[reale moto delle molecole]



Seconda armonica

$$L = \lambda_2$$

$$f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$$

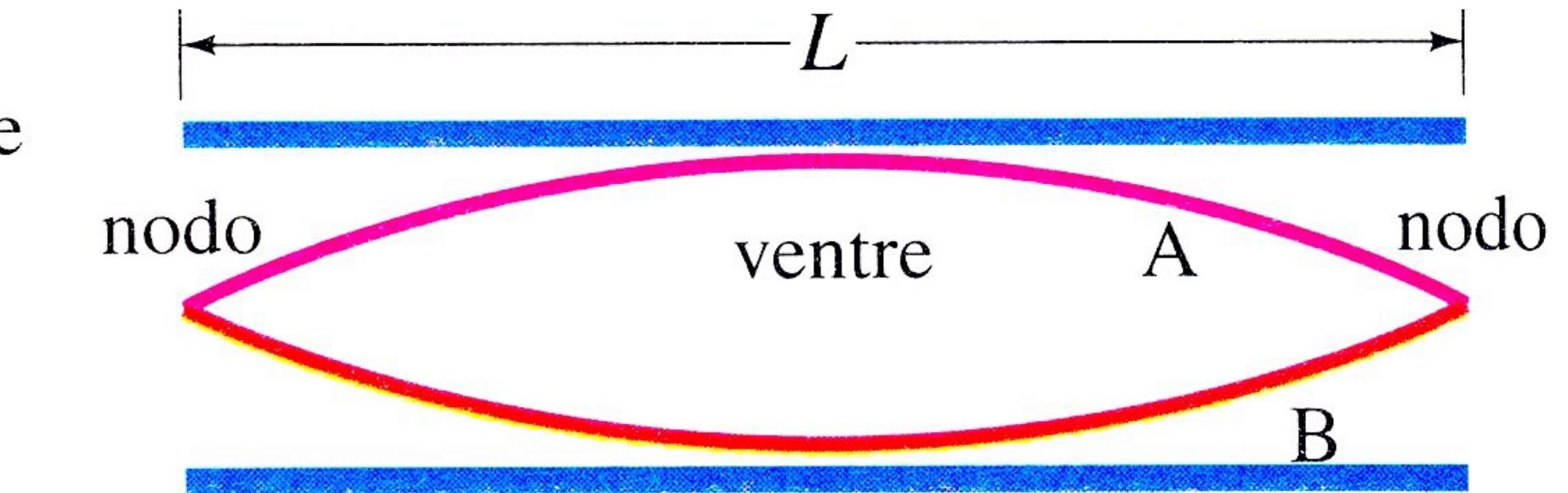


Terza armonica

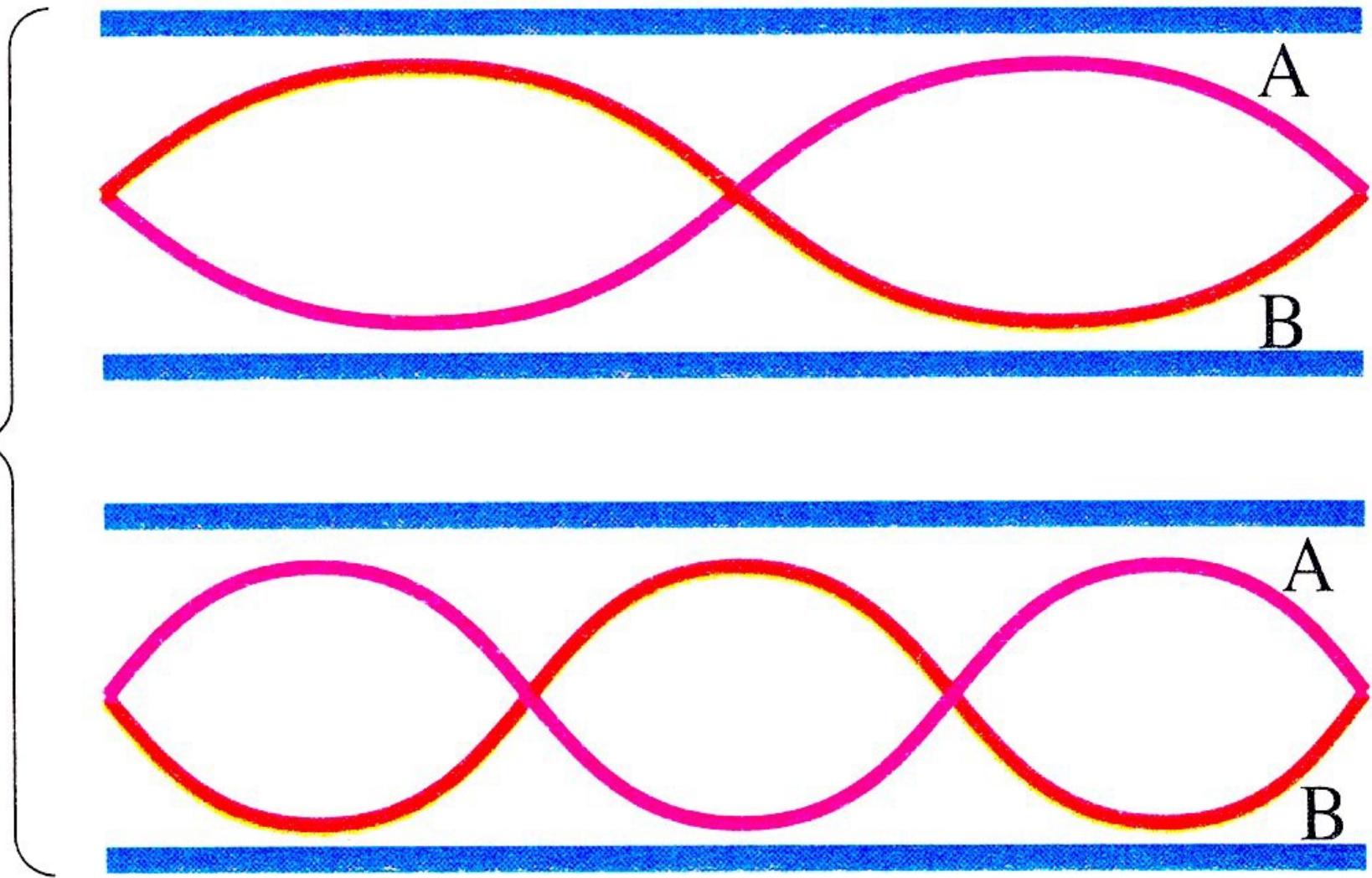
$$L = \frac{3}{2} \lambda_3$$

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3f_1$$

Pressione

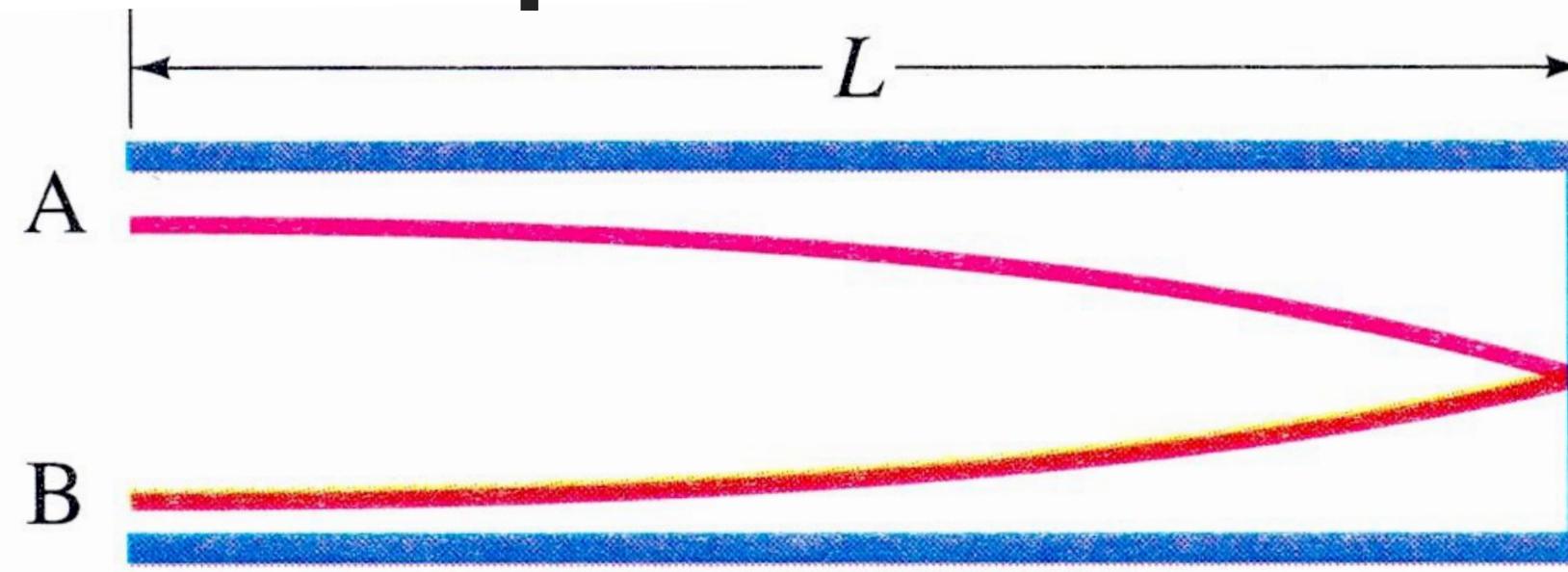


Armoniche superiori



Strumenti a fiato (chiusi da un lato)

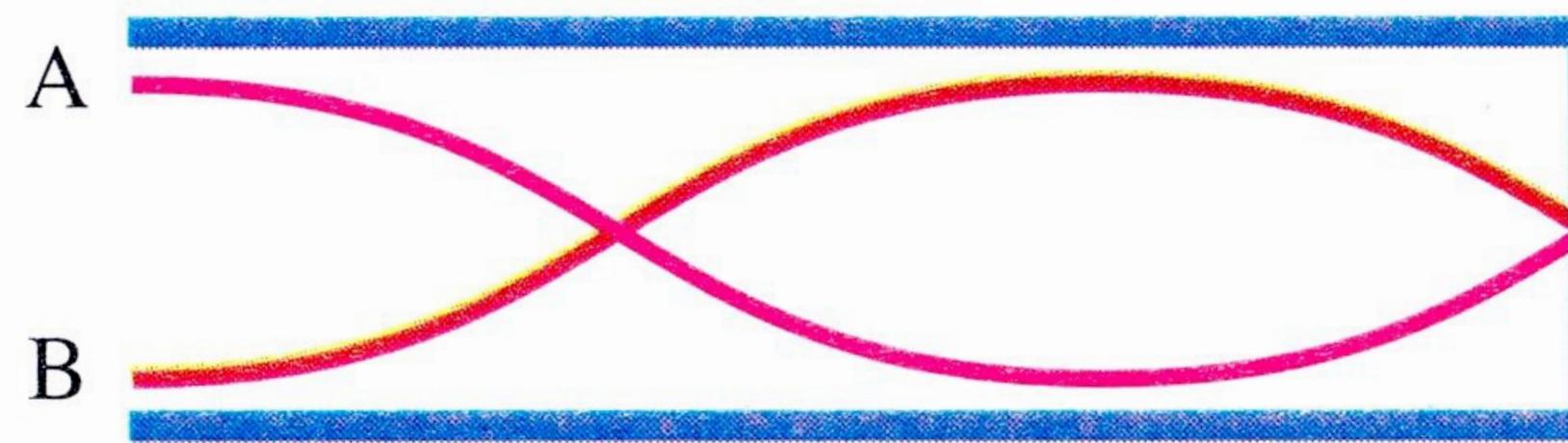
Spostamento



Prima armonica = fondamentale

$$L = \frac{1}{4} \lambda_1$$

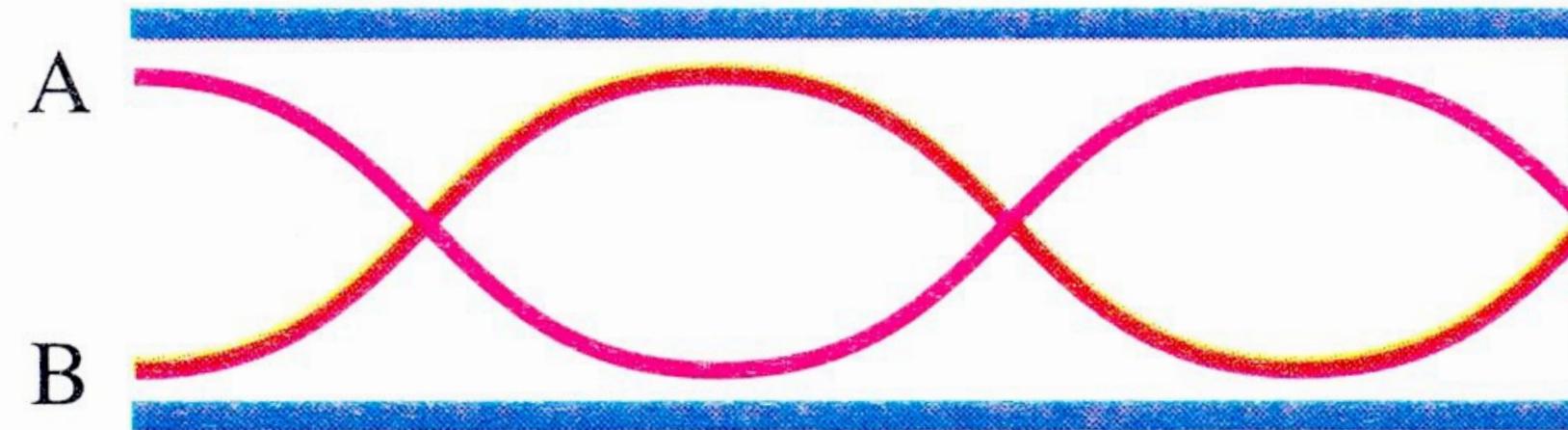
$$f_1 = \frac{v}{4L}$$



Terza armonica

$$L = \frac{3}{4} \lambda_3$$

$$f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$

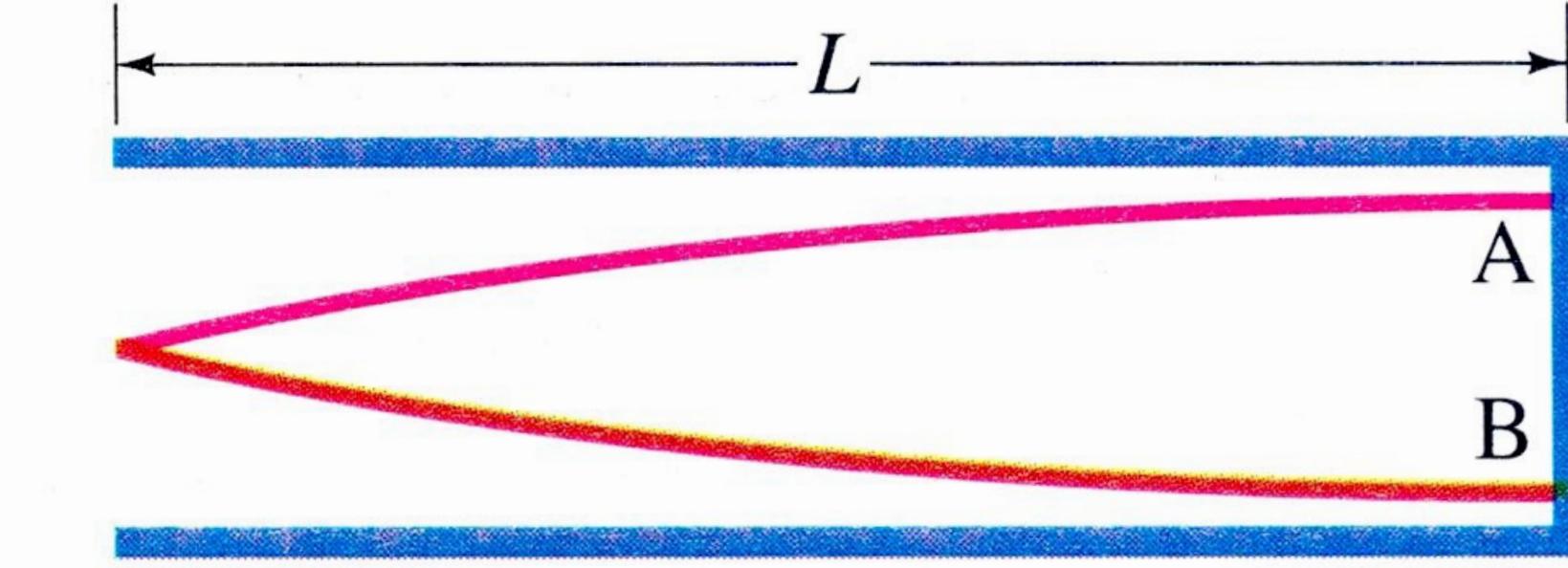


Quinta armonica

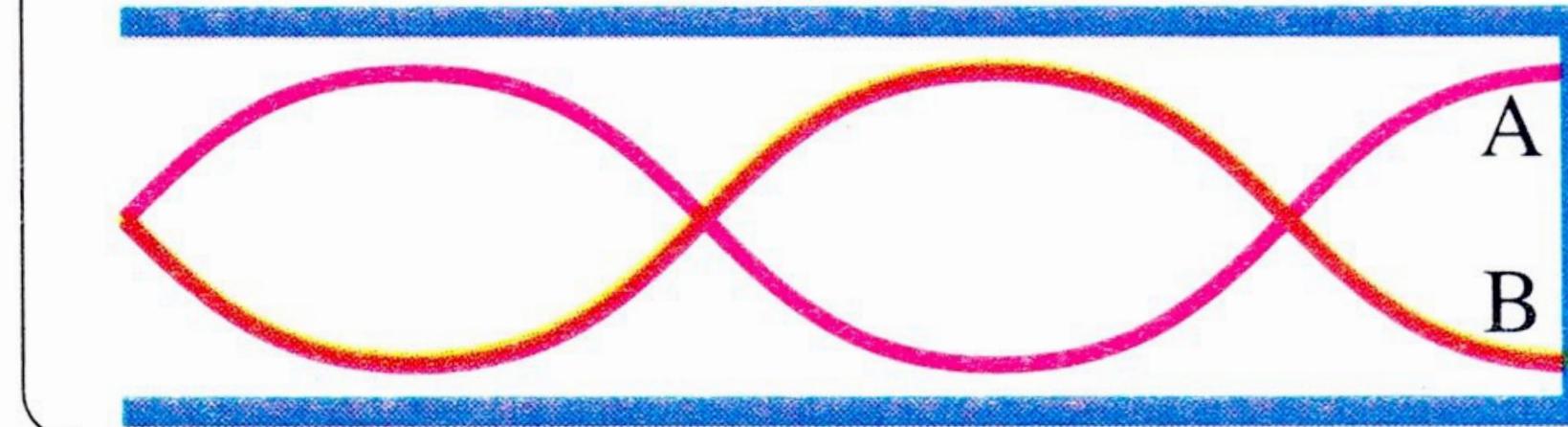
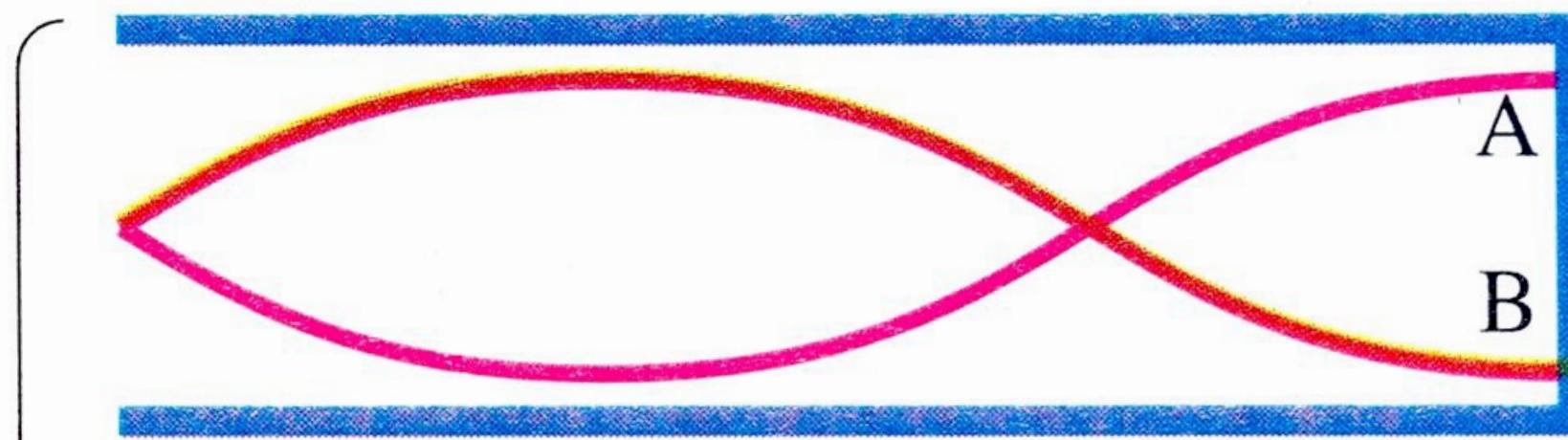
$$L = \frac{5}{4} \lambda_5$$

$$f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$$

Armoniche superiori



Pressione



Cambiano condizioni al contorno: estremo chiuso = spostamento nullo

La **fondamentale** ha $\lambda = 4L$, solo armoniche dispari ospitate (ventre + nodo)

Armoniche dispari sopprese (no interferenza)

Acustica: esercizi

Esercizio 10.08: Quali sono le frequenze fondamentali e le prime tre armoniche superiori di una canna d'organo lunga 26 cm a 20° C nel caso in cui la canna sia a) aperta e b) chiusa?

Esercizio 10.09: Un flauto è progettato per suonare il Do centrale (262 Hz) quando tutti i buchi sono coperti. Facendo l'approssimazione che il ventre dell'onda sia in corrispondenza del bocchino, quale deve essere la distanza tra il bocchino e l'estremità opposta del flauto a 20° C?

Esercizio 10.10: Se flauto dell'esercizio precedente suona a una temperatura di 10° C, quale sarà la nota emessa con tutti i buchi chiusi?

Esercizio 10.11: Un diapason produce una nota stazionaria a 400 Hz. Quando esso viene messo in vibrazione e avvicinato a una corda di chitarra, si contano 20 battimenti in 5 secondi. Si calcolino le due possibili frequenze della chitarra.