

Fisica per applicazioni di realtà virtuale

Anno Accademico 2022-23

Prof. Matteo Brogi

Dipartimento di Fisica, stanza B3, nuovo edificio

Lezione 18

Acustica parte 3

Strumenti a fiato (aperti da entrambi i lati)

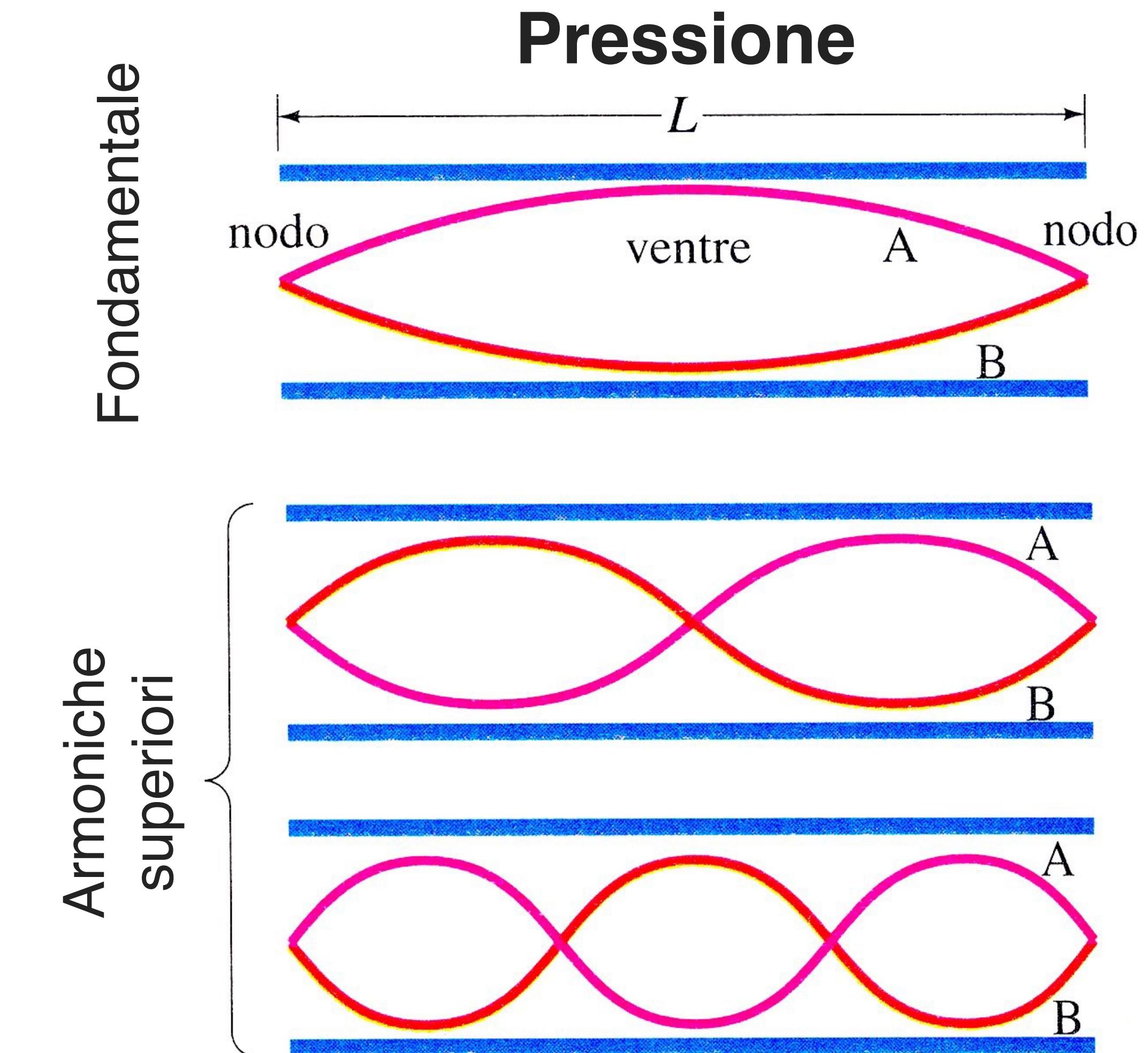
Usano onde **longitudinali** formate dall'aria dentro un tubo
(per es. canna d'organo, tromba e trombone, flauto)

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

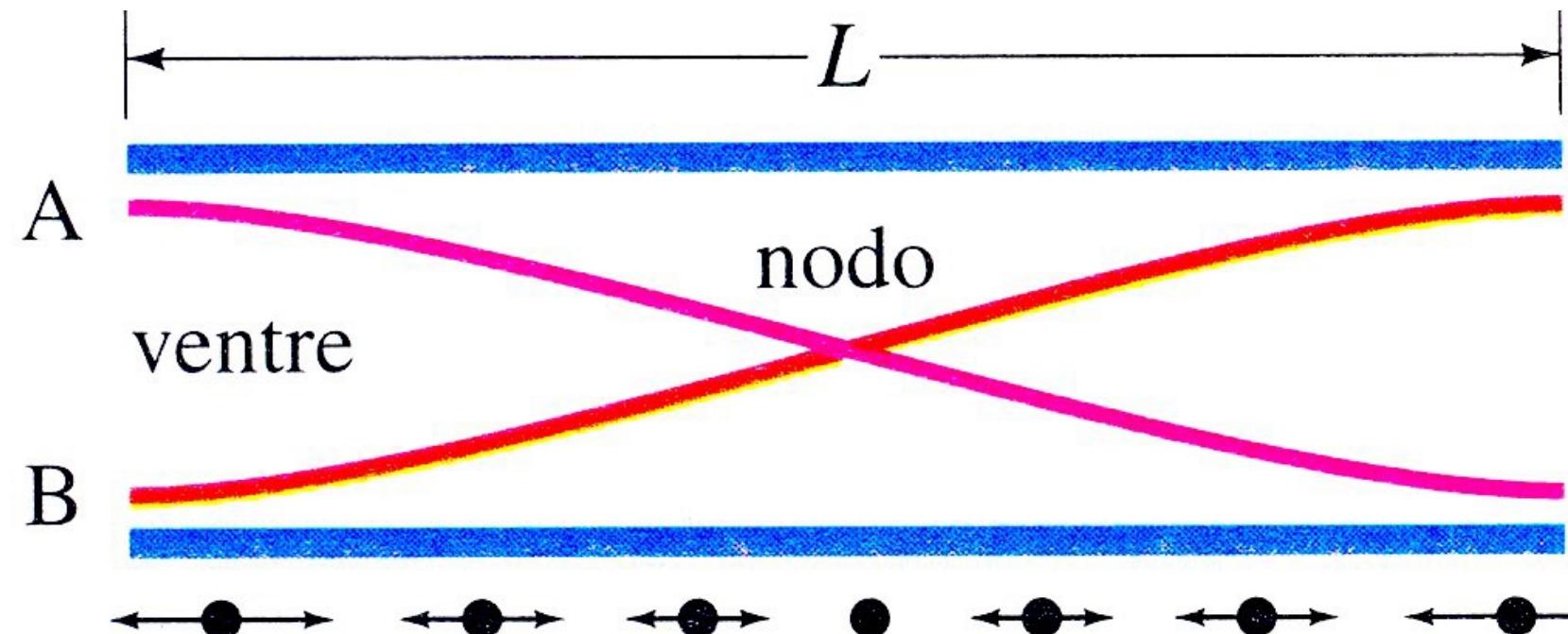
Per cambiare la **fondamentale** occorre
cambiare la lunghezza del tubo



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

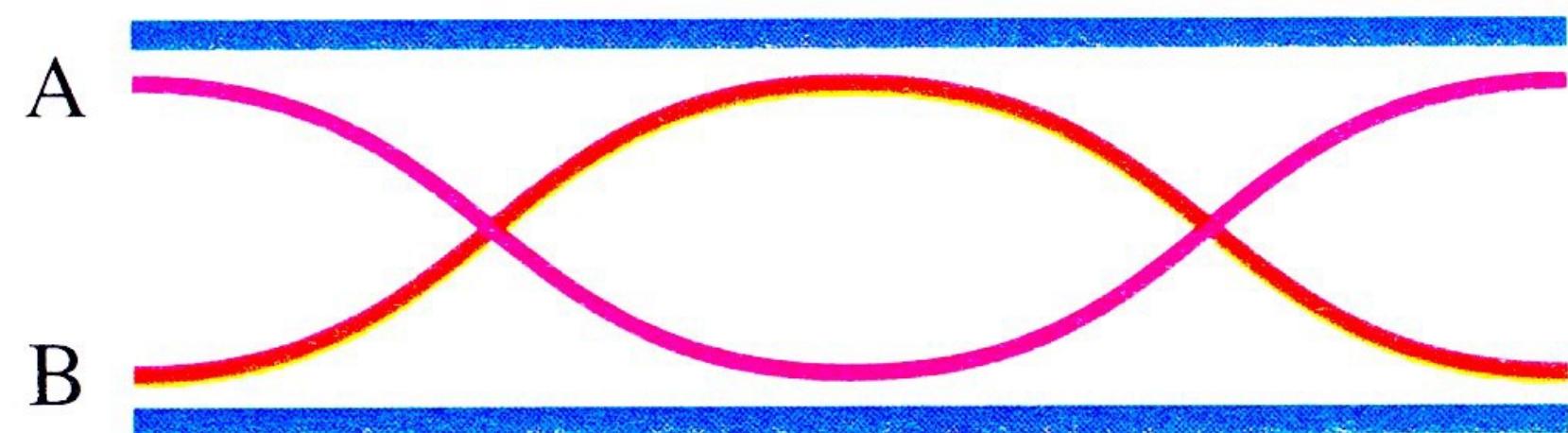


Prima armonica = fondamentale

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

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

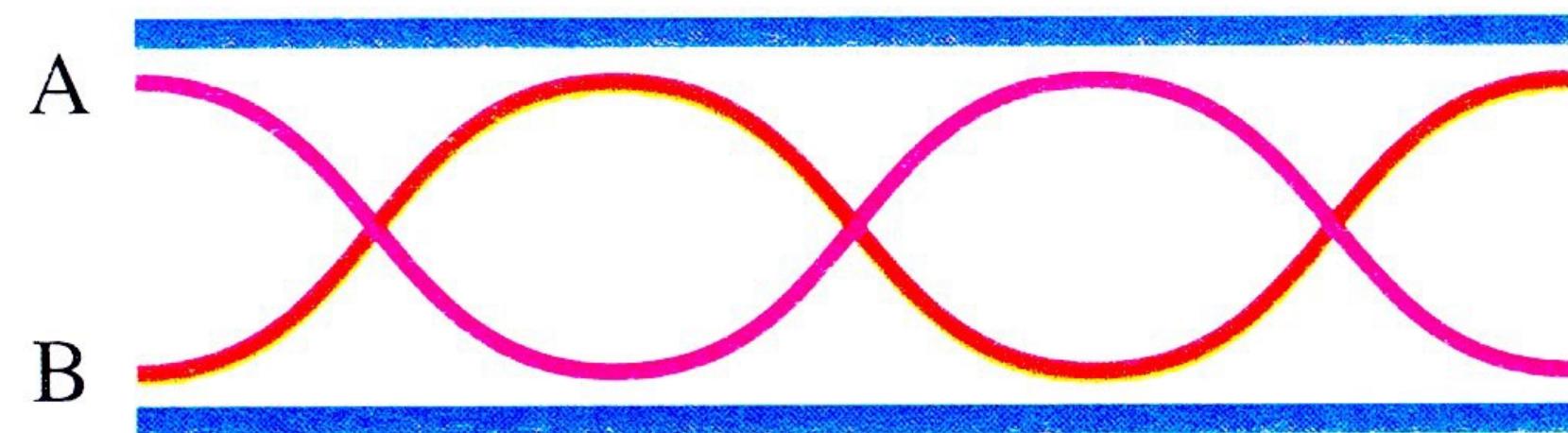
[reale moto delle molecole]



Seconda armonica

$$L = \lambda_2$$

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

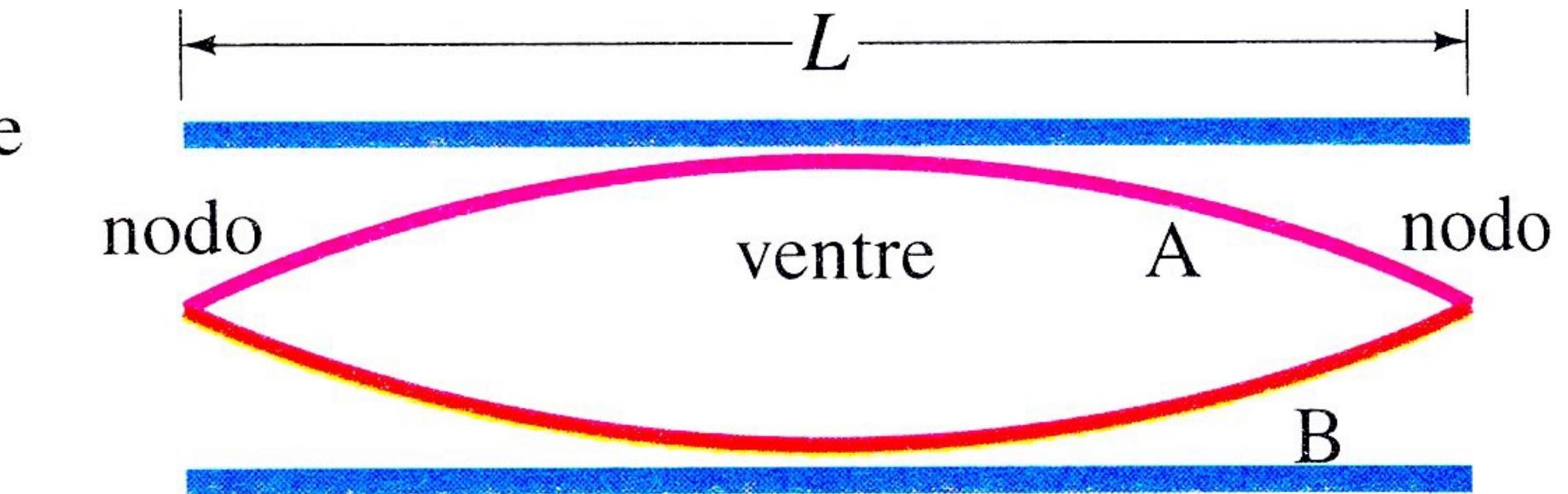


Terza armonica

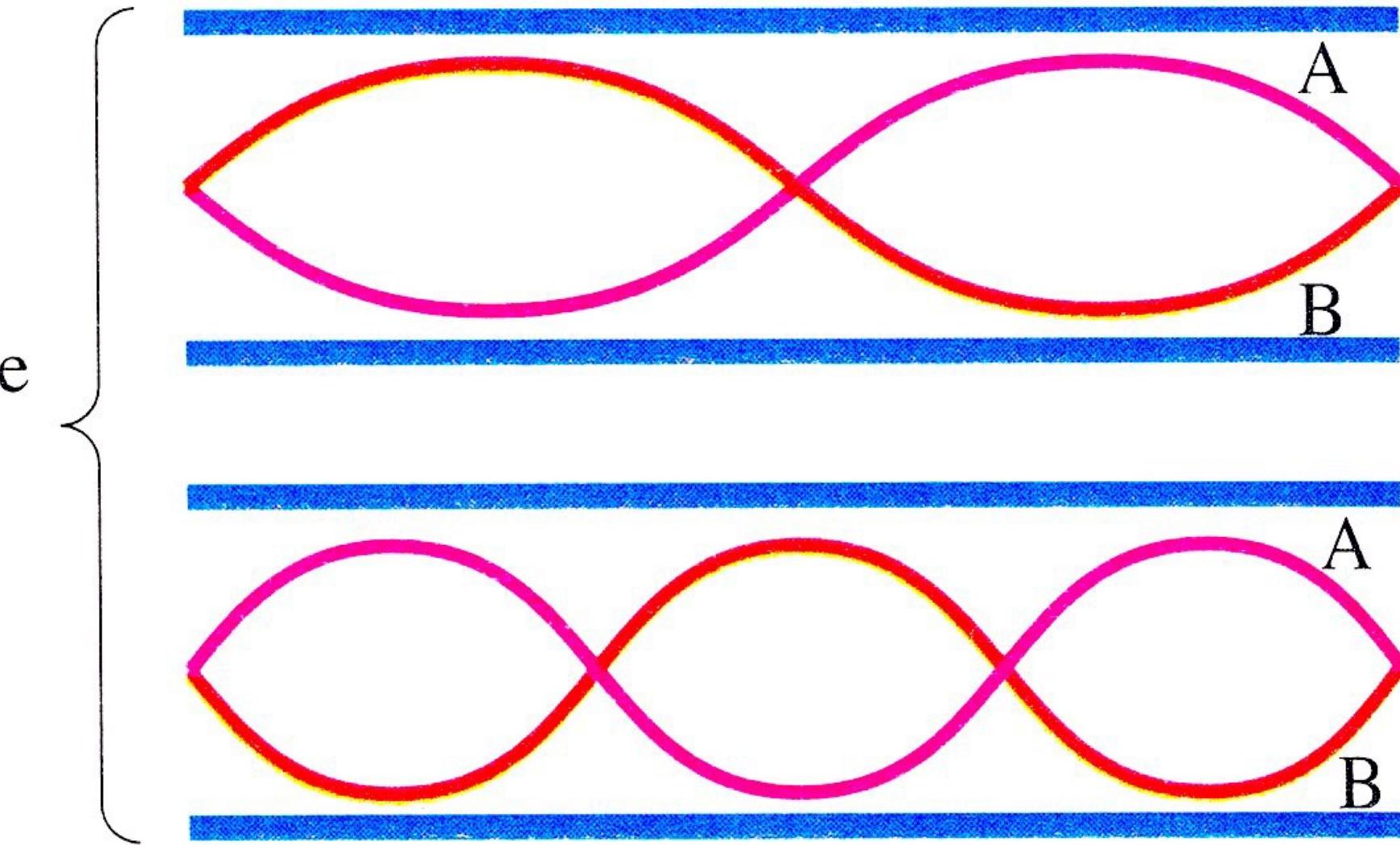
$$L = \frac{3}{2} \lambda_3$$

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

Pressione

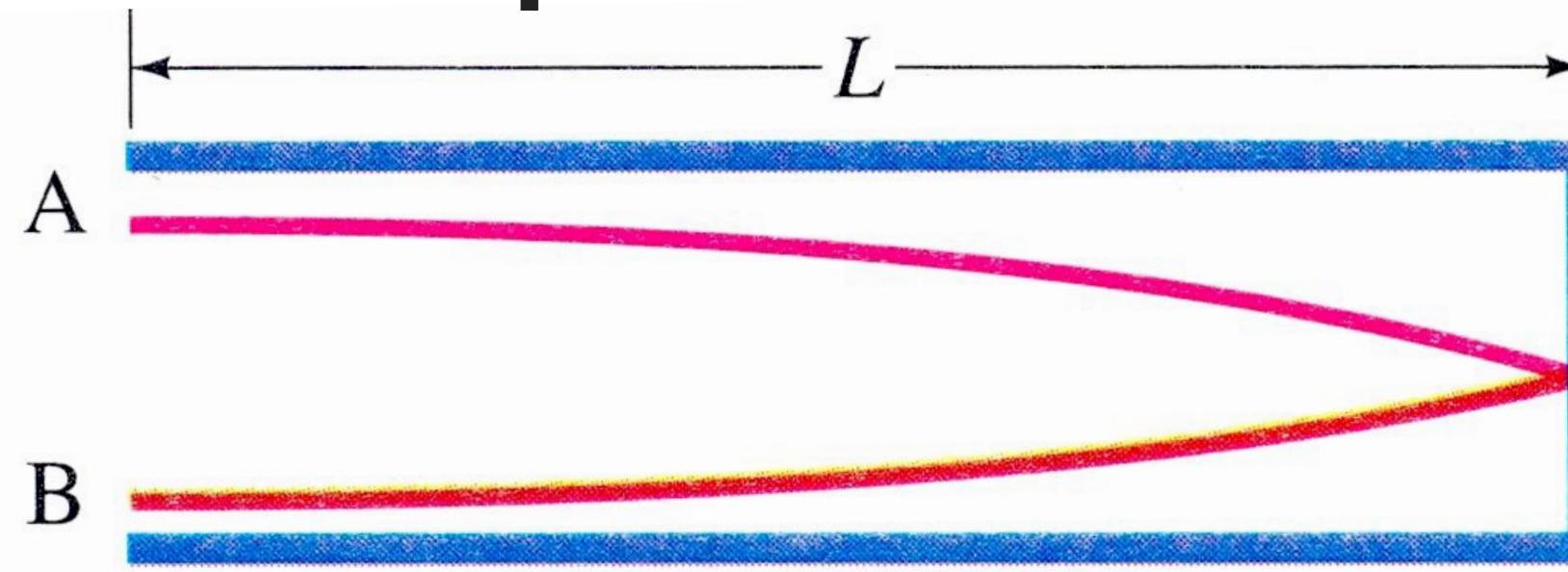


Armoniche superiori



Strumenti a fiato (chiusi da un lato)

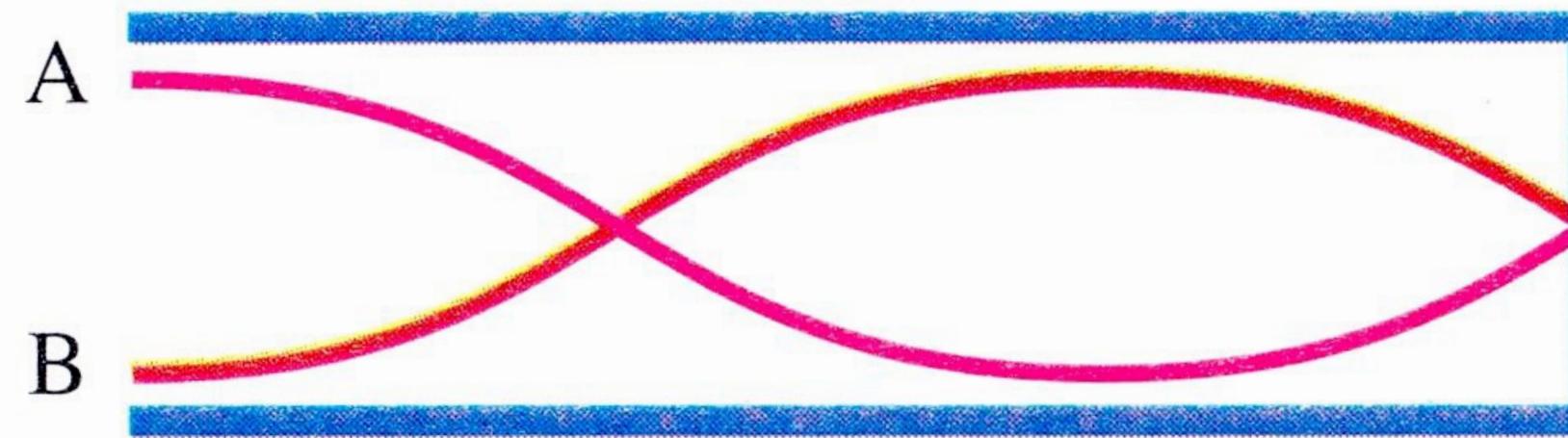
Spostamento



Prima armonica = fondamentale

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

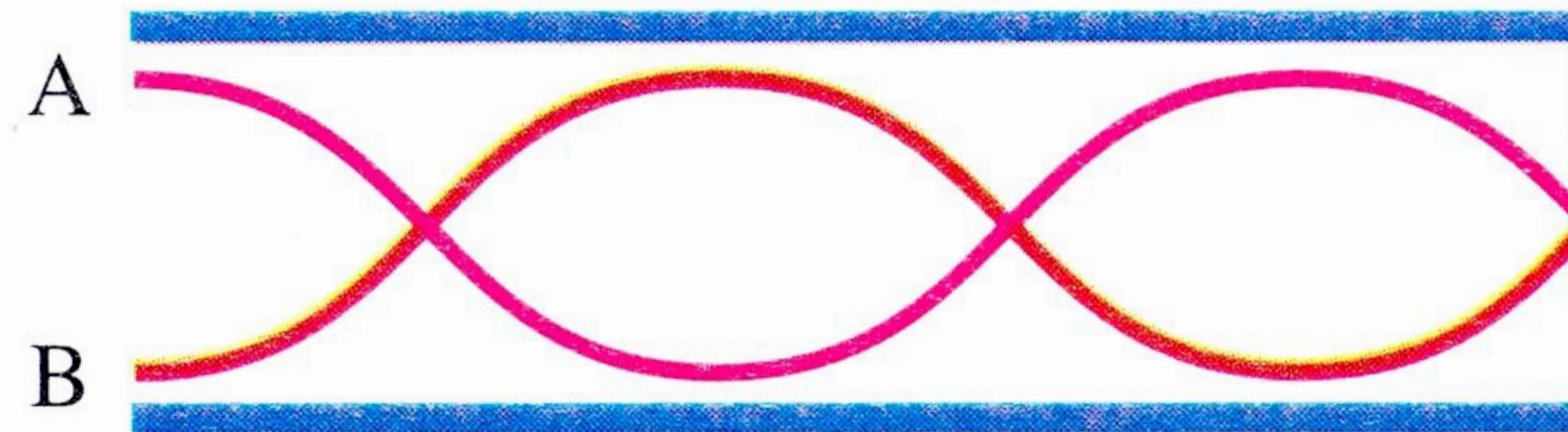
$$f_1 = \frac{v}{4L}$$



Terza armonica

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

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



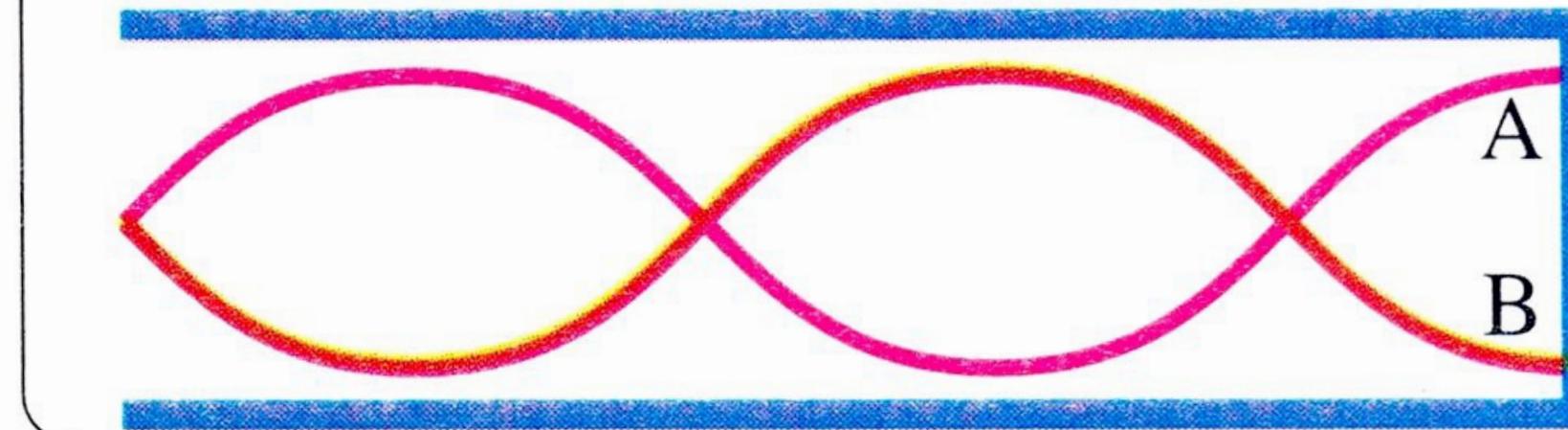
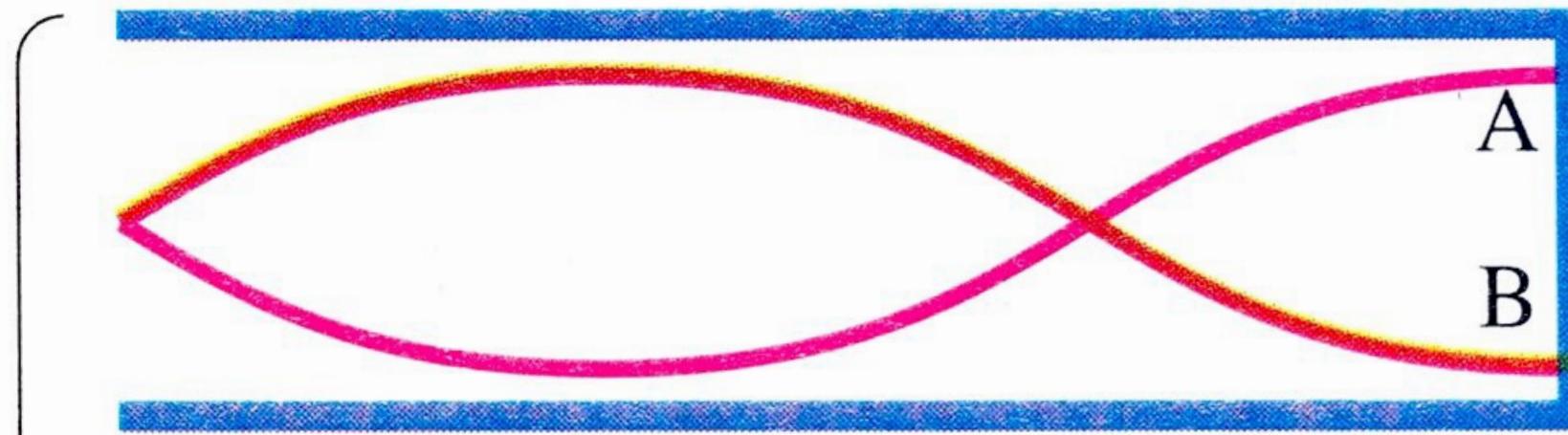
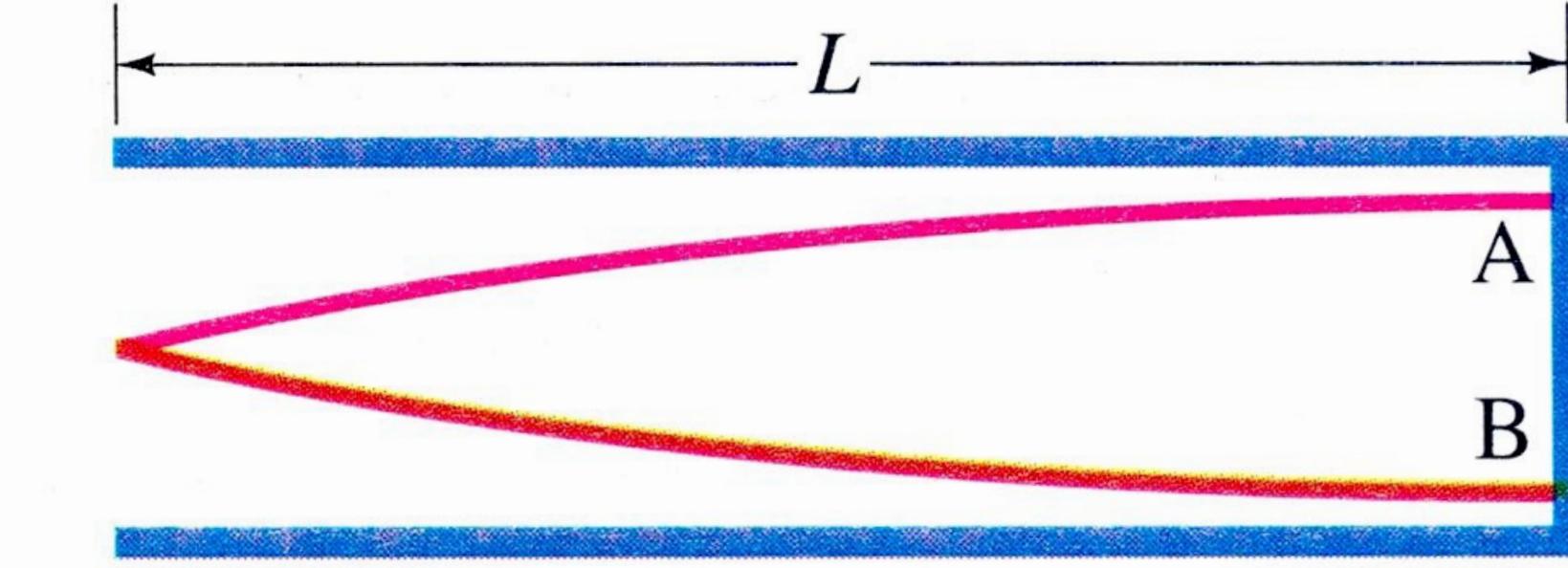
Quinta armonica

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

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

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 10.09: 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 10.10: 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 10.11: Se flauto dell'esercizio precedente suona a una temperatura di 10° C, quale sarà la nota emessa con tutti i buchi chiusi?

Esercizio 10.12: 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.

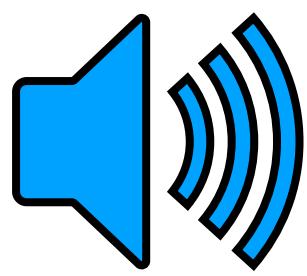
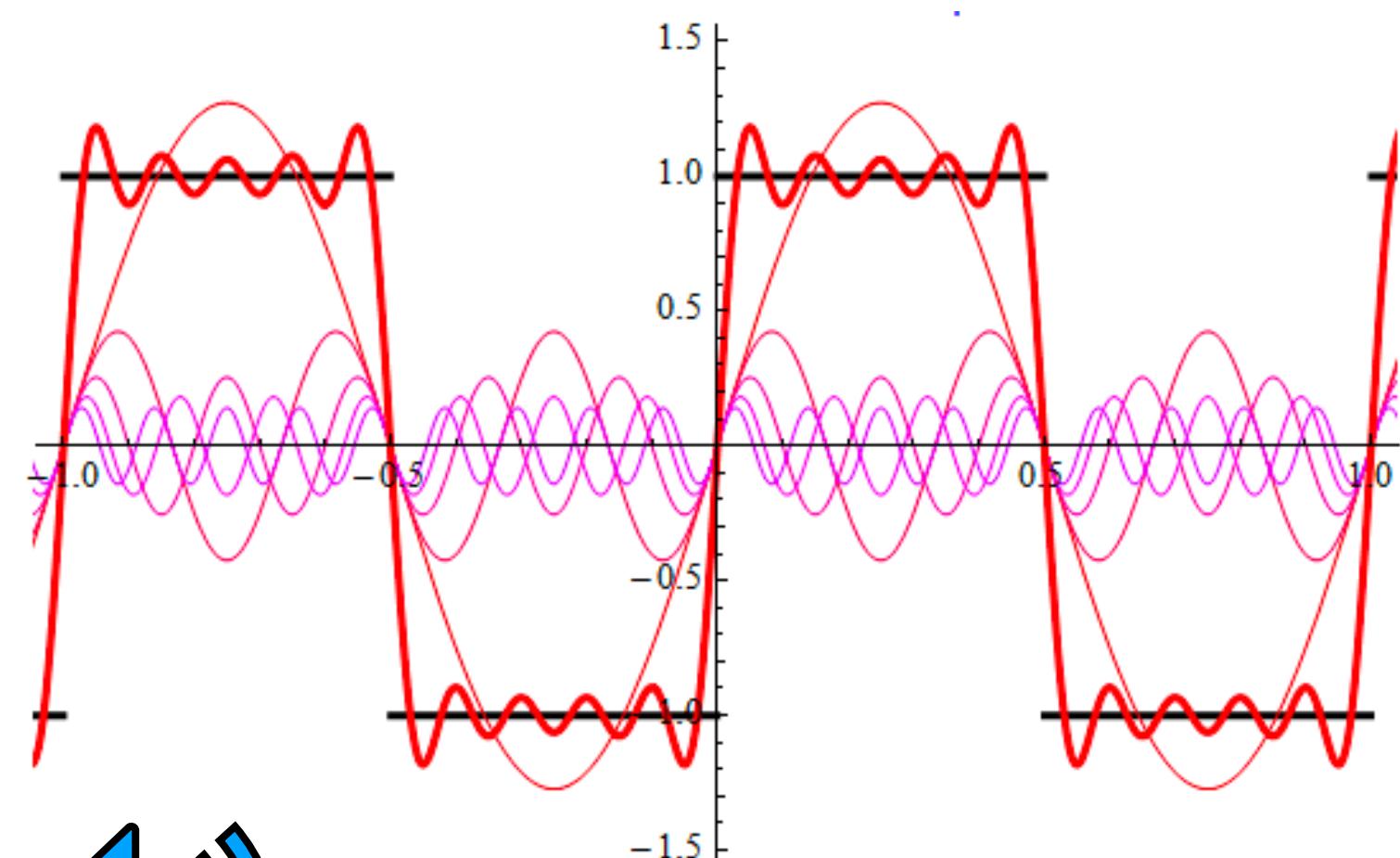
Il principio di sovrapposizione in musica

Teorema di Fourier (matematico)

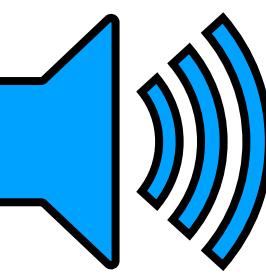
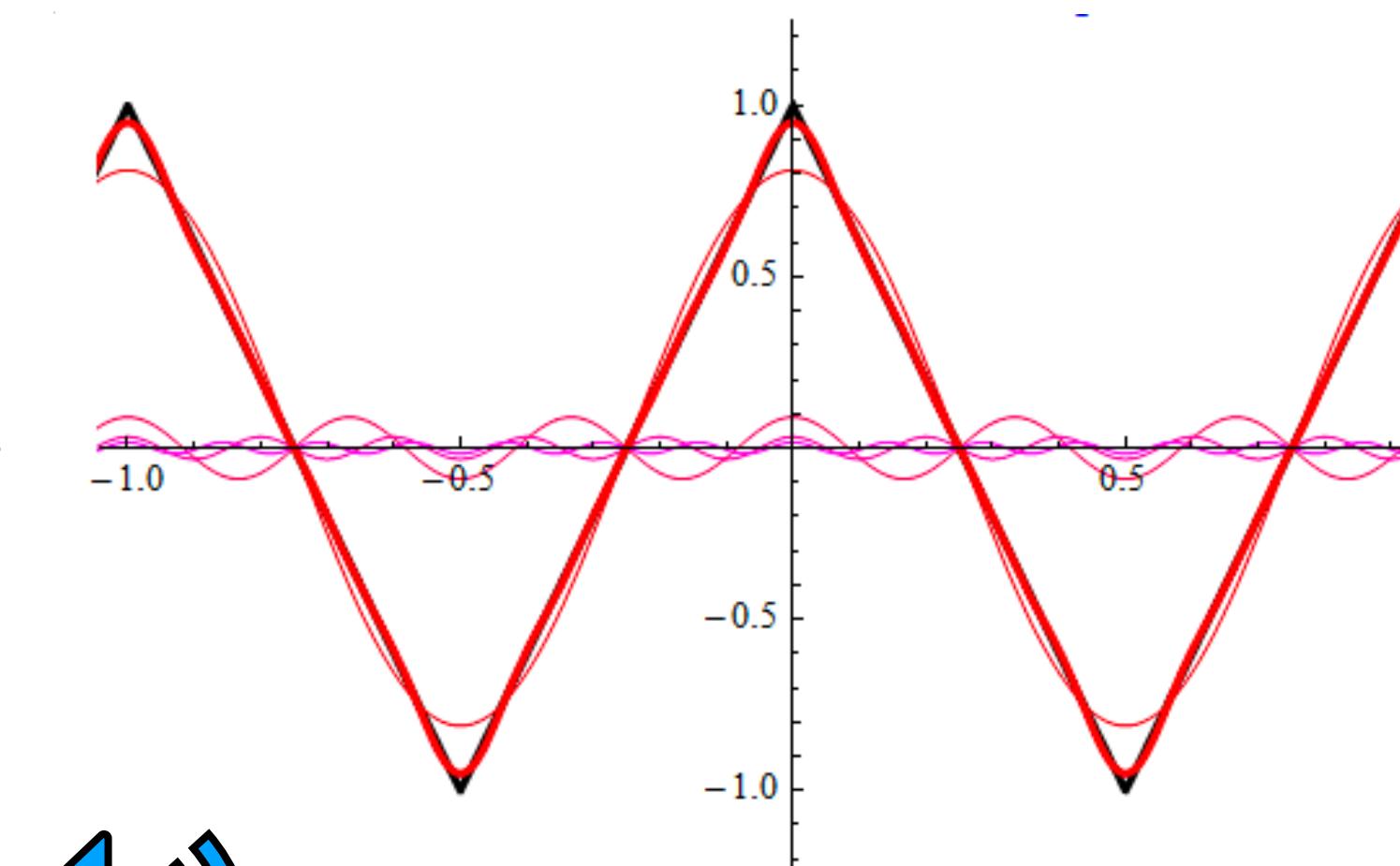
Qualsiasi funzione periodica può essere espressa (= approssimata) come somma di seni e coseni

Principio di sovrapposizione (lez. 15)

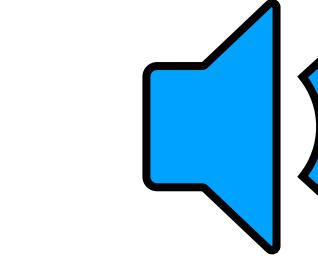
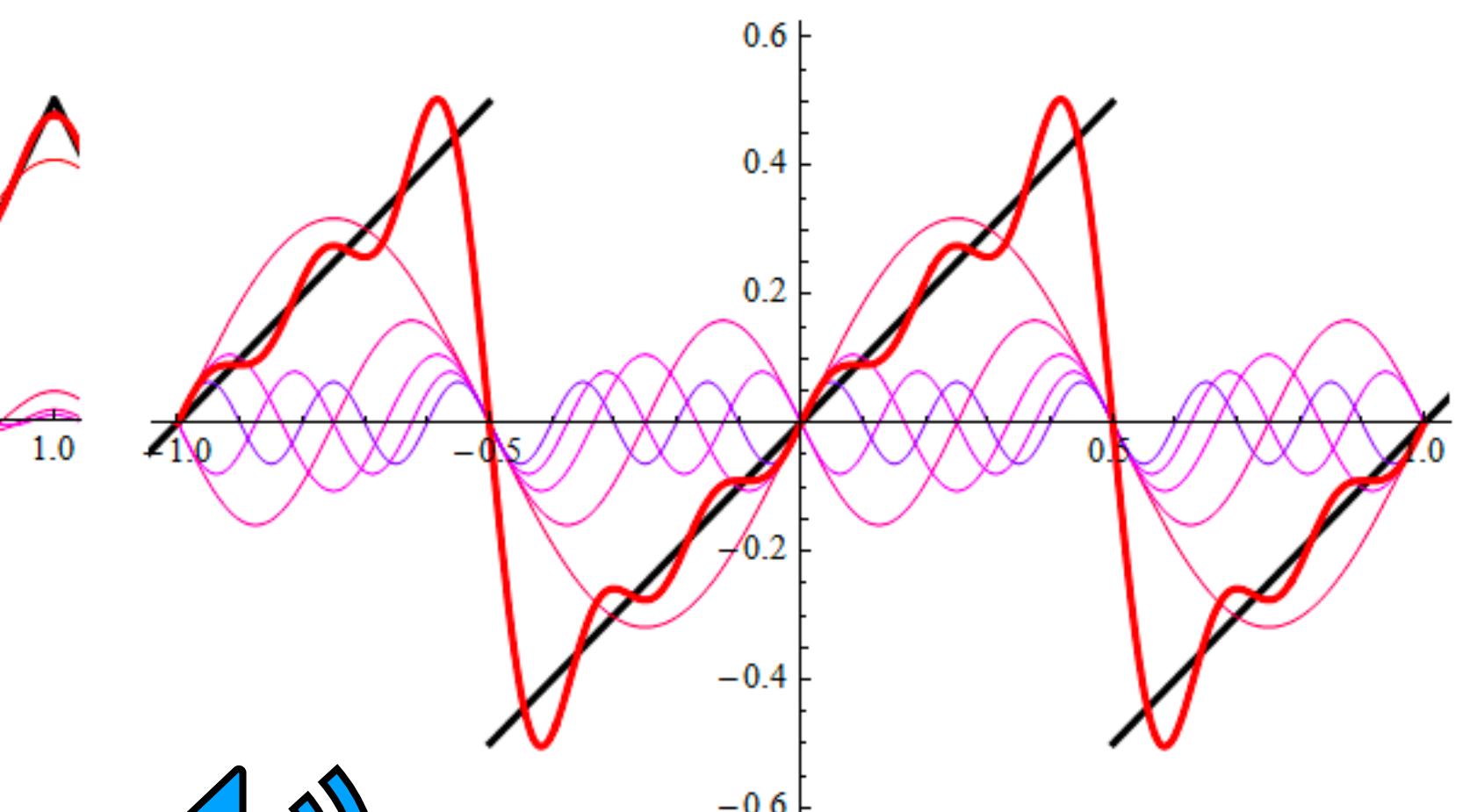
Qualsiasi onda (funzione periodica) può essere scritta come somma di onde in certi rapporti di ampiezza



Onda quadra
approx. 5 armoniche



Onda triangolare
approx. 4 armoniche



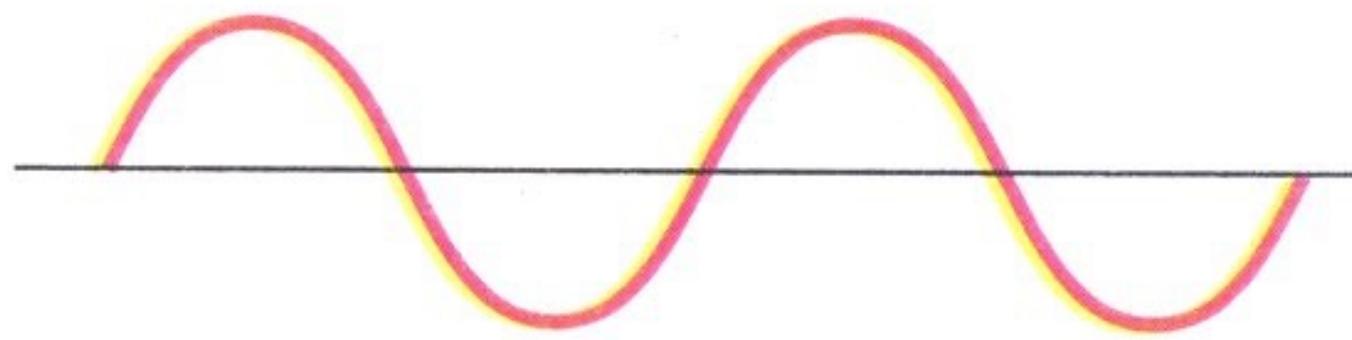
Onda a dente di sega
approx. 5 armoniche

Tono e timbro

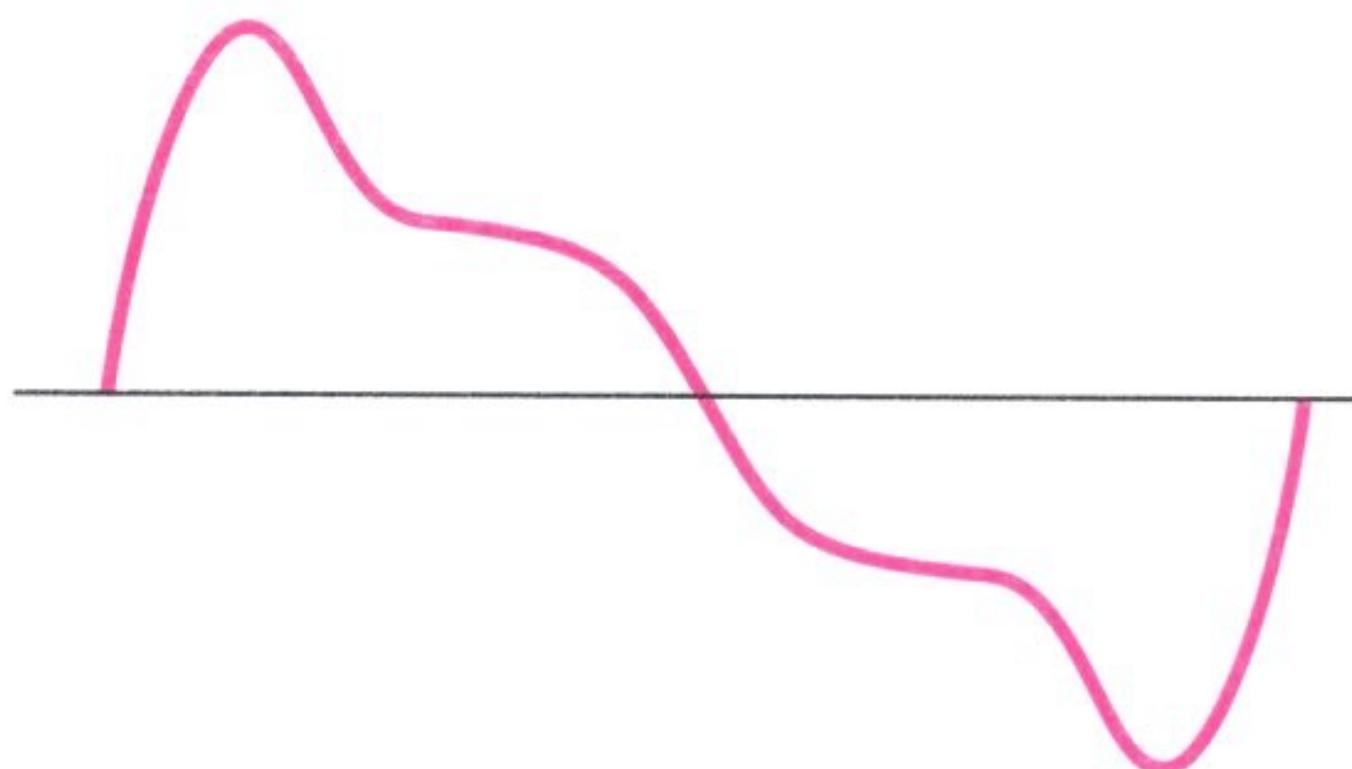
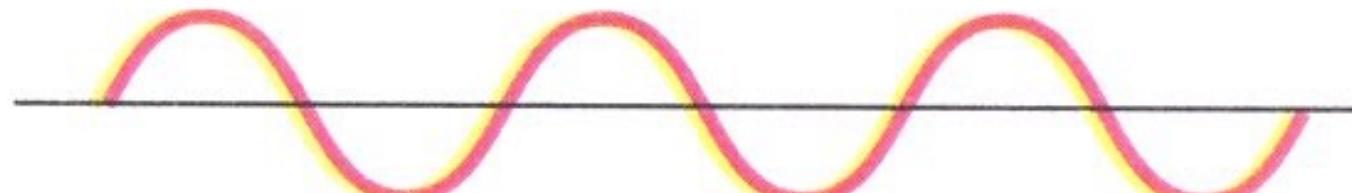
Suono = armonica fondamentale (dominante in ampiezza) + armoniche superiori



Fondamentale: definisce il **tono** (frequenza più udibile)
Suona uguale per tutti gli strumenti



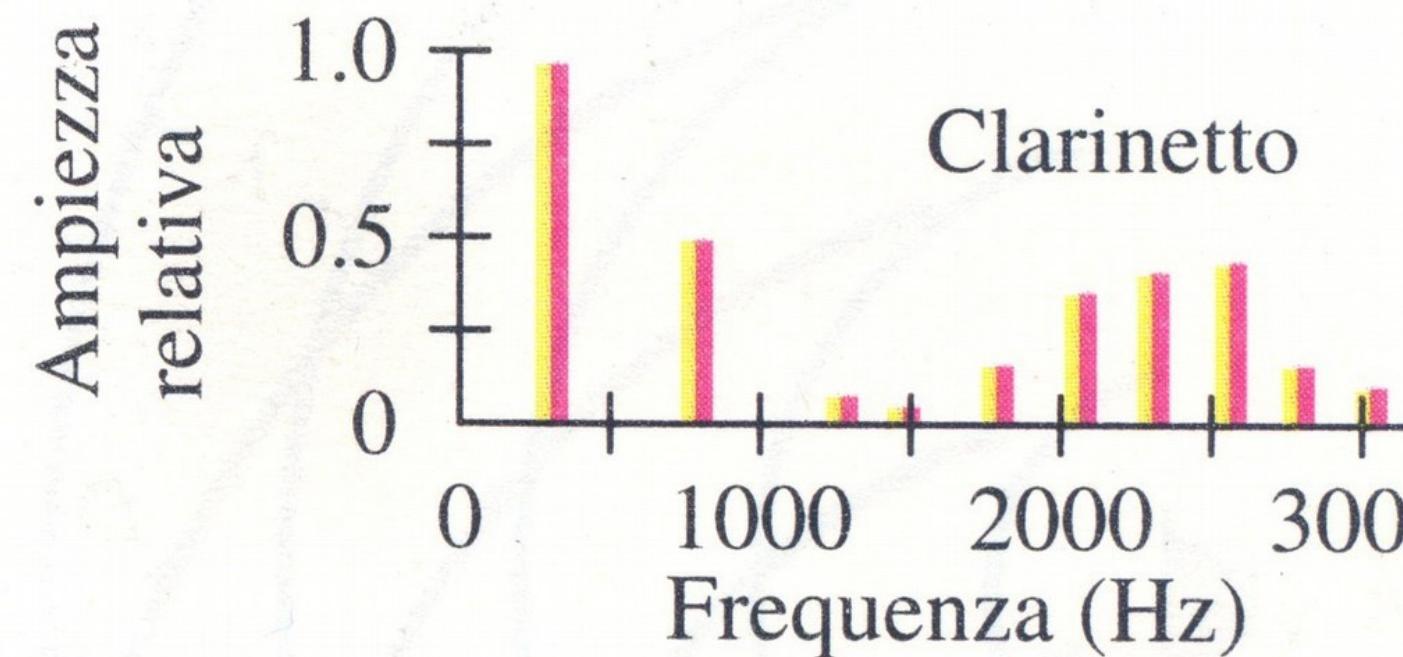
Armoniche
Arricchiscono il tono portando al suono risultante
Possono produrre una *forma d'onda* molto complessa
e lontana da un seno/coseno.



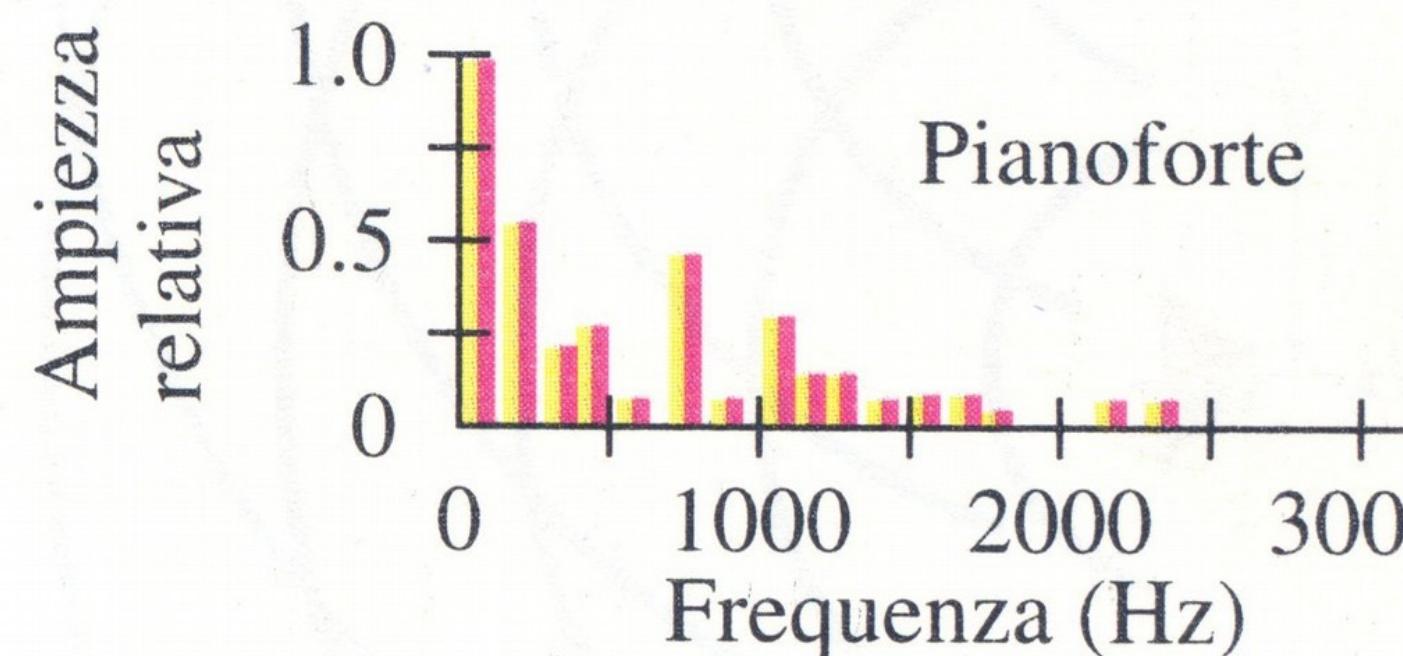
Timbro
L'insieme delle armoniche che definiscono il suono
(caratteristica di ogni singolo strumento)

Lo spettro di uno strumento musicale

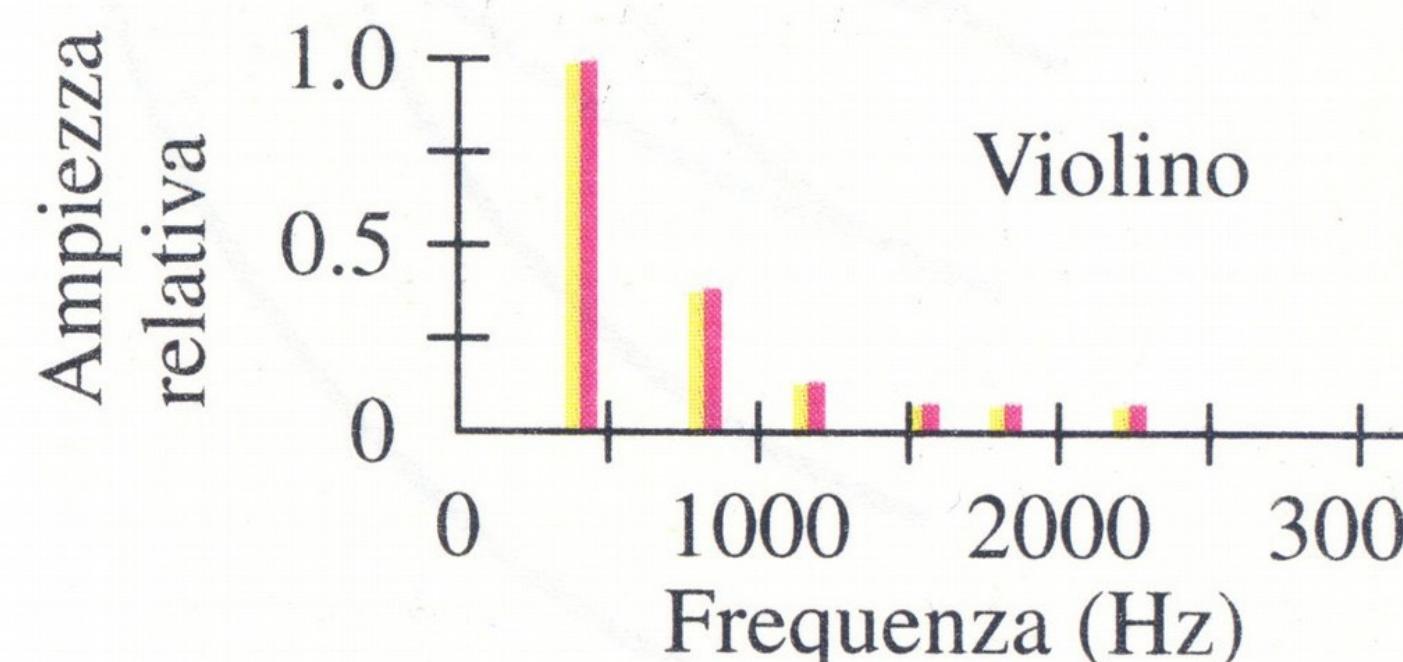
Spettro: descrive l'intensità delle armoniche in funzione della loro frequenza
(un'analisi matematica del “timbro” dello strumento)



Clarinetto: suono piccato sulle prime armoniche
(adatto per la melodia) ma anche un aspetto
“squillante”



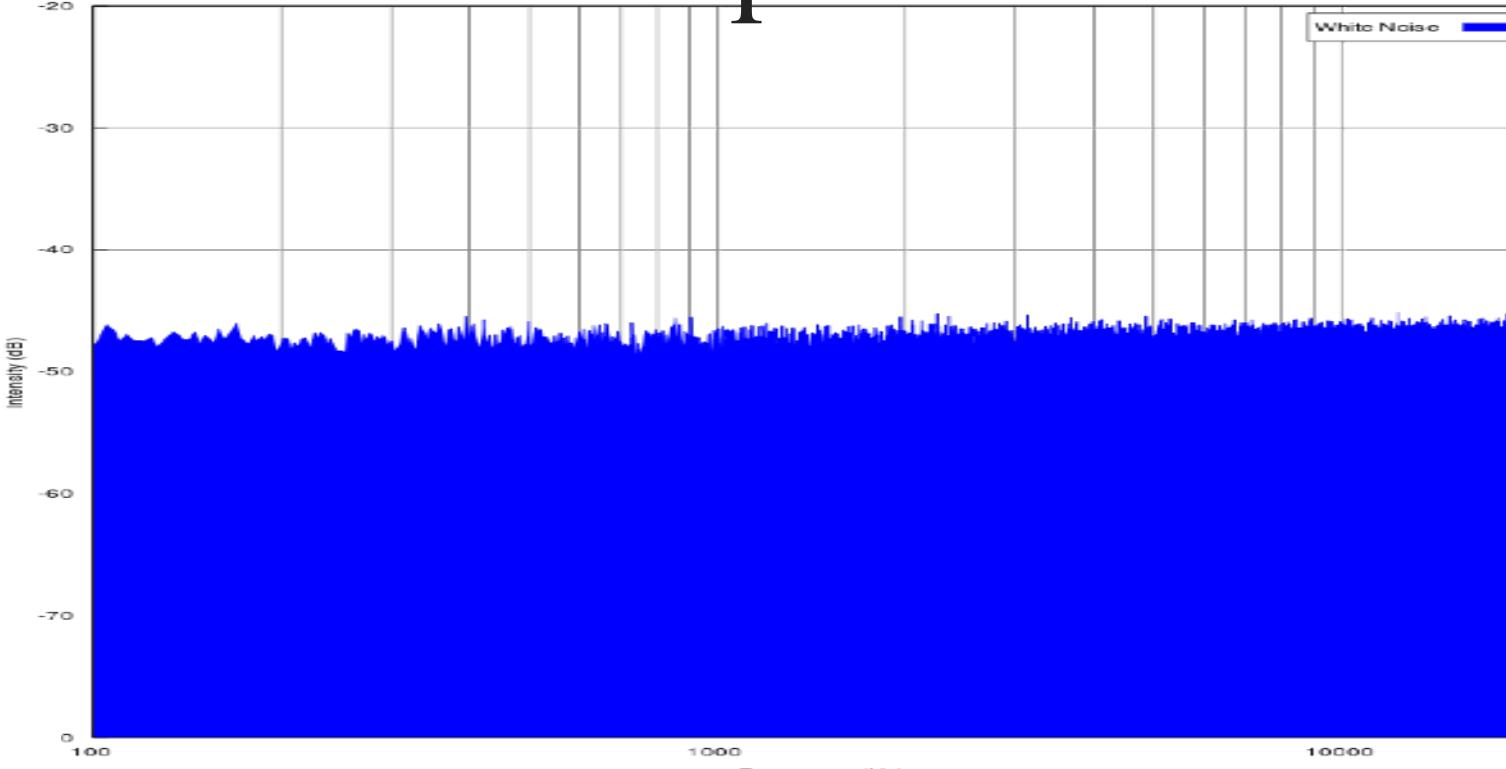
Piano: suono molto complesso che lo rende uno strumento eccellente anche come solo



Violino: suono pulito piccato sulle prime armoniche,
ottimo per definire la melodia
(centrata sulla nota, quindi la fondamentale)

Rumore e i suoi “colori”

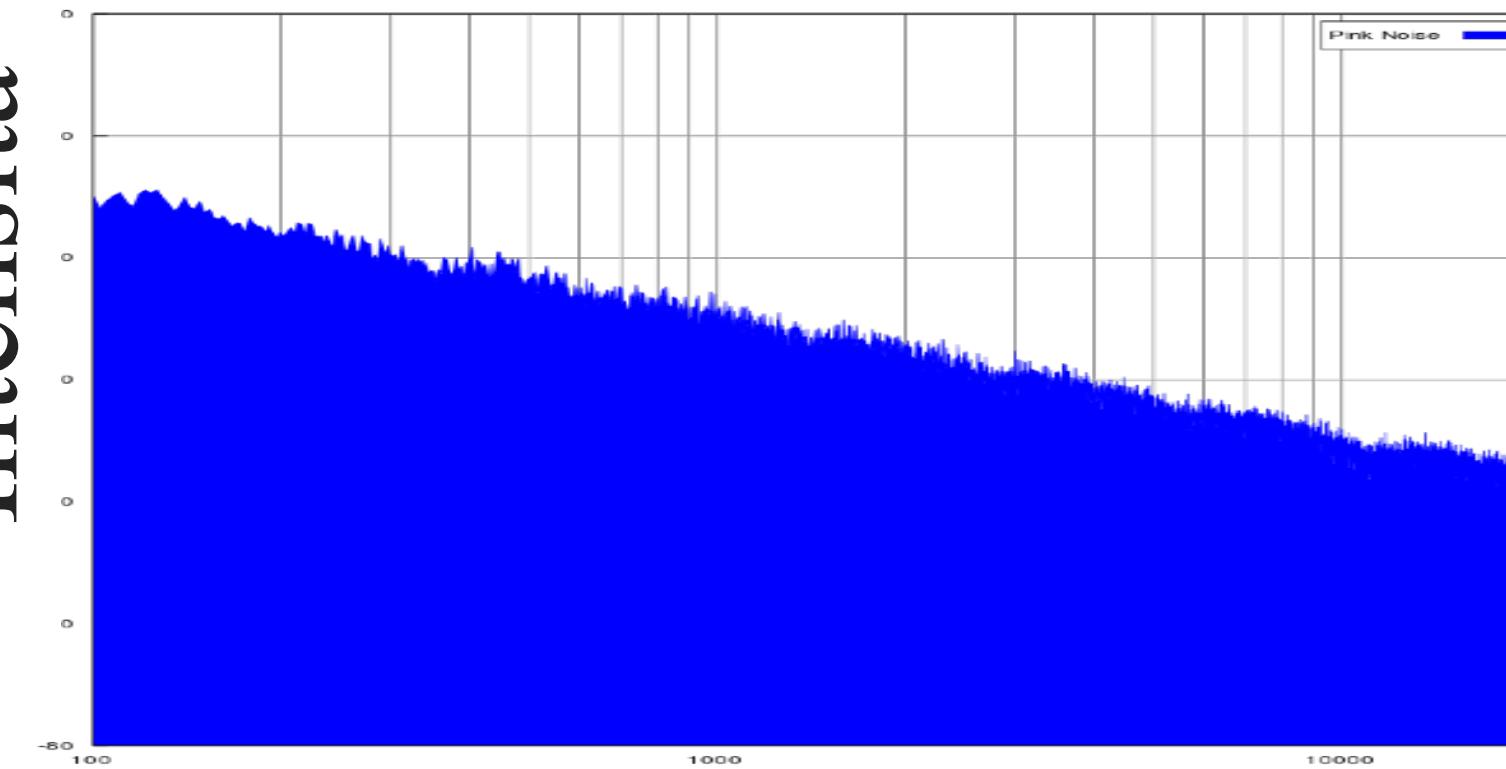
Frequenza



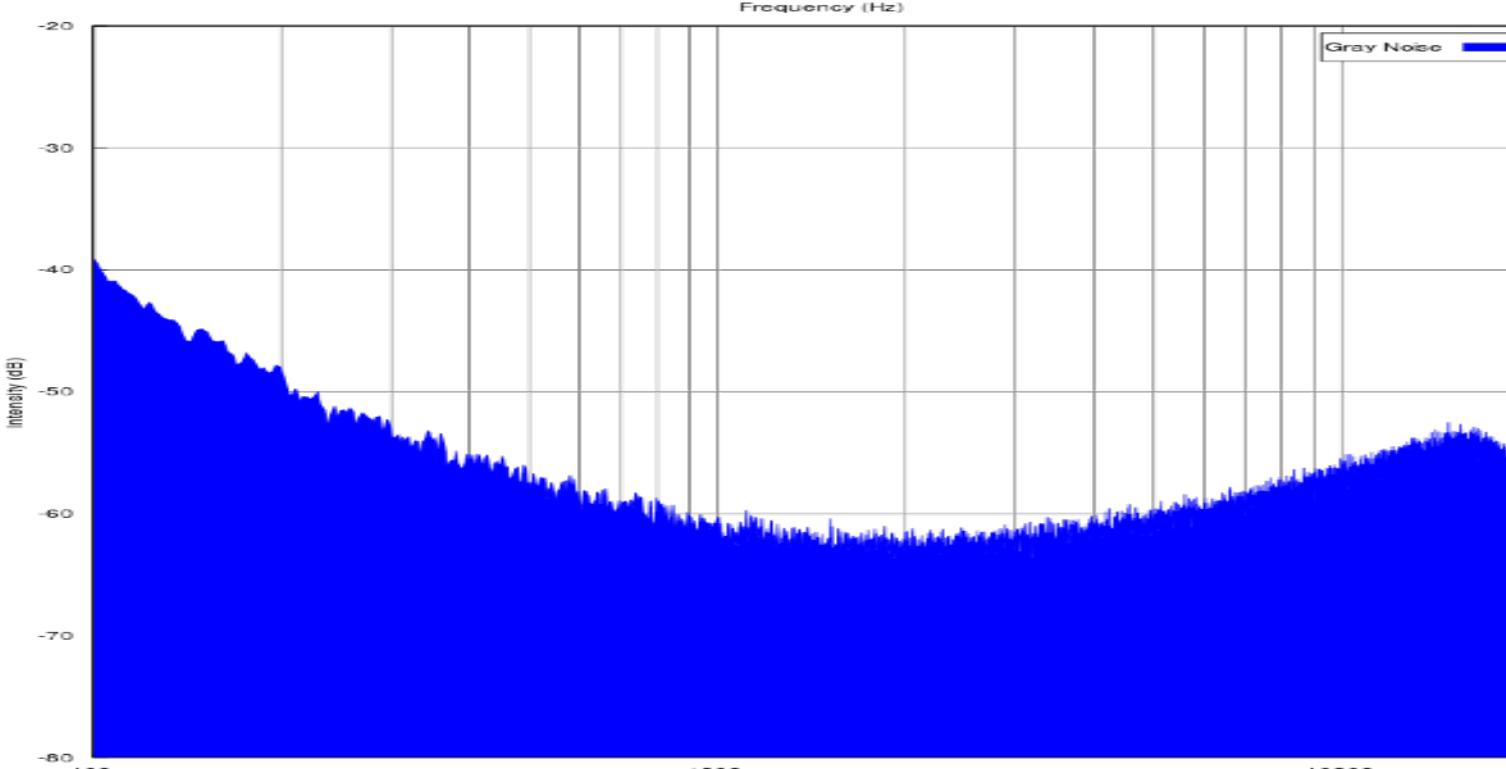
Combinazione di frequenze in rapporti casuali = **rumore**
(il tono dominante non è udibile)

Rumore **bianco**: tutte le frequenze hanno
la stessa ampiezza

Intensità



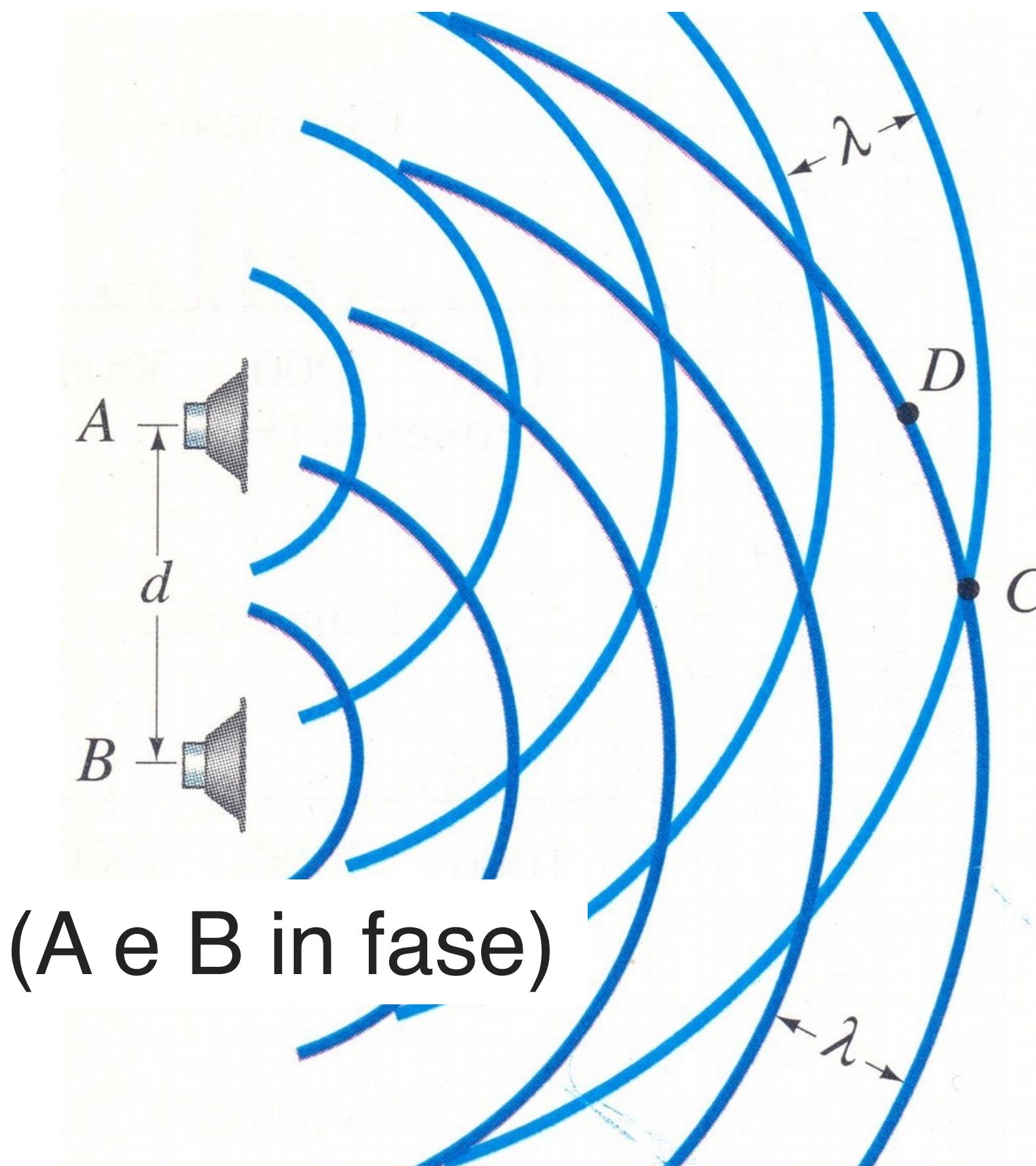
Rumore **rosa**: l'ampiezza A va come
 $A \sim 1/f$ (rumore 1/f)



Rumore **grigio**: rumore bianco corretto
per le curve isofoniche
(percezione costante)

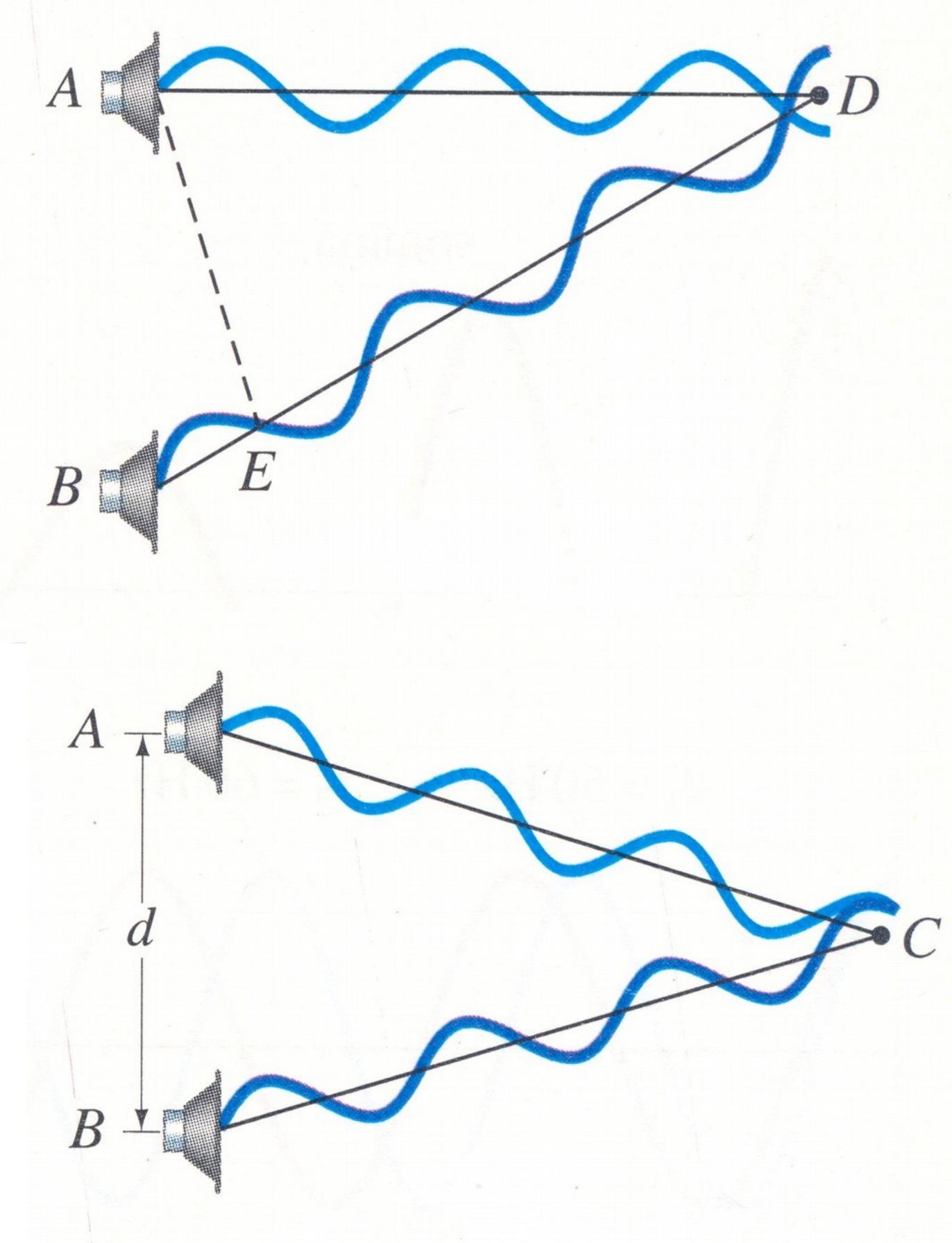
Interferenza

Posizione dell'ascoltatore \Rightarrow differenza di cammino \Rightarrow differenza di fase



Al punto **D** si ha
interferenza distruttiva
(dipende dalla frequenza)

Al punto **C** o ogni altro
punto equidistante da A e B
si ha interferenza costruttiva



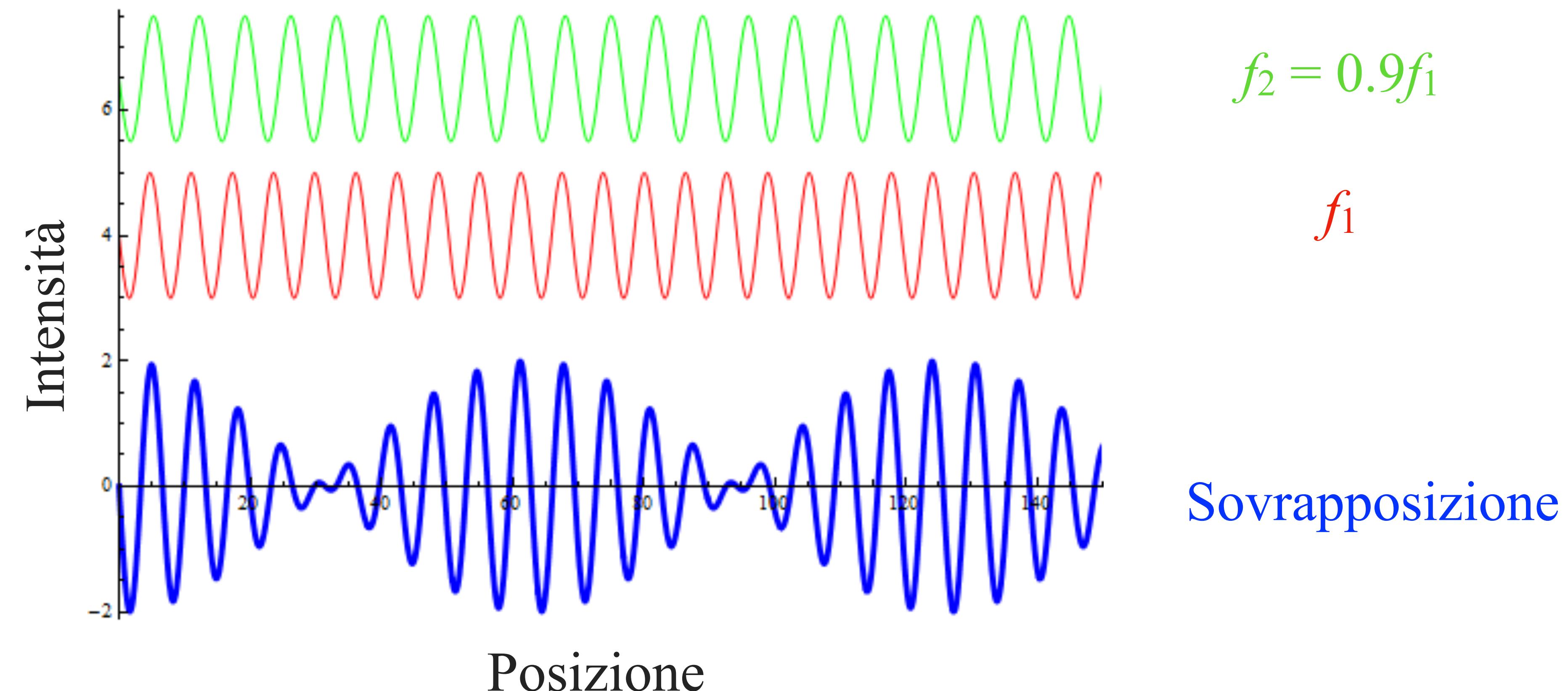
Luogo dei punti equidistanti = asse: per un ascolto HiFi bisogna sedersi frontalmente
Sistemi 5+1: il *centrale* è responsabile del parlato (non deve subire interferenza)

Battimenti (introdotti nella lez. 15)

Interferenza = sovrapposizione di onde *coerenti*

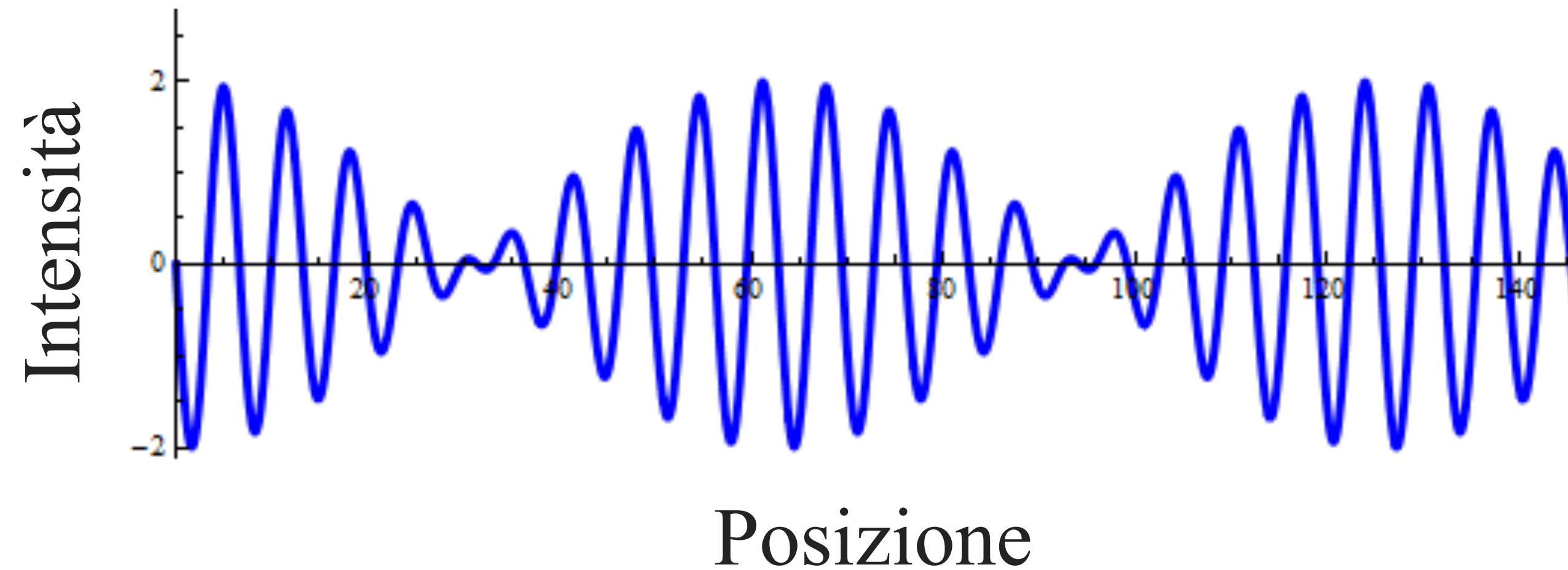
Sovrapposizione di onde incoerenti non è un'onda

Caso particolare: due onde con frequenze quasi uguali (3-5% diff. relativa)



Caratteristiche dei battimenti

Onda risultante con una *frequenza intermedia*,
modulata in ampiezza con una *frequenza di battimento*



$$f_{mod} = |f_1 - f_0|$$

Frequenza di battimento
(modulazione in ampiezza)
differenza delle frequenze individuali

$$f_{ris} = \frac{f_1 + f_0}{2}$$

Frequenza portante
media delle frequenze individuali

Utilità: accordatura di uno strumento a corde multiple (per es. chitarra, basso)

Risoluzione temporale dell'orecchio umano

Capacità di distinguere due suoni impulsivi molto vicini tra loro
(modulazione di ampiezza)

In teoria: dipende solo dall'oscillazione delle ciglia dell'organo di corti $\Rightarrow \mu s$

In pratica: ci vogliono ~ 2 ms per produrre l'impulso elettrico, che deve poi raggiungere il cervello ed essere interpretato come suono

La *risoluzione temporale* dipende dalla **durata dell'impulso**

Long bursts (~ 80 ms): migliore risoluzione ~ 3 ms

Short bursts (~ 10 ms): peggiore risoluzione $\sim 20-30$ ms a seconda dell'età

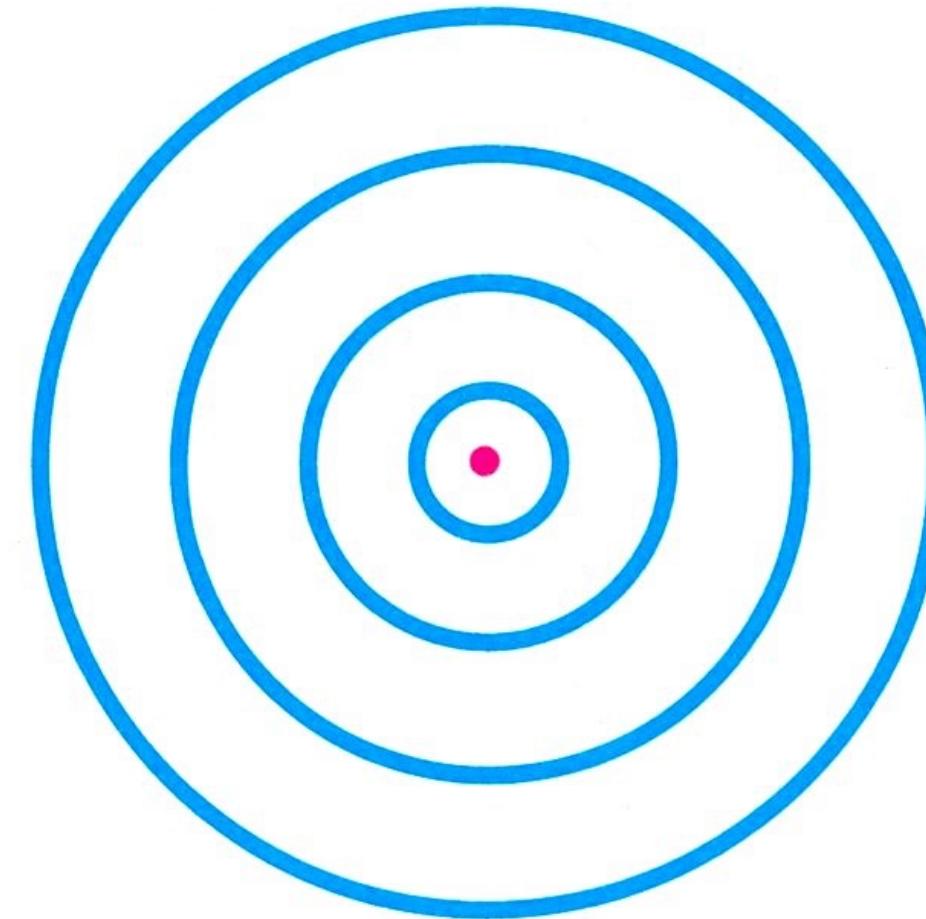
Conseguenza 1: generazione sonora a livello del singolo frame in VR (13 ms)

Conseguenza 2: percezione dei battimenti

Una modulazione con $|f_1 - f_2| \geq 30$ Hz viene difficilmente percepita

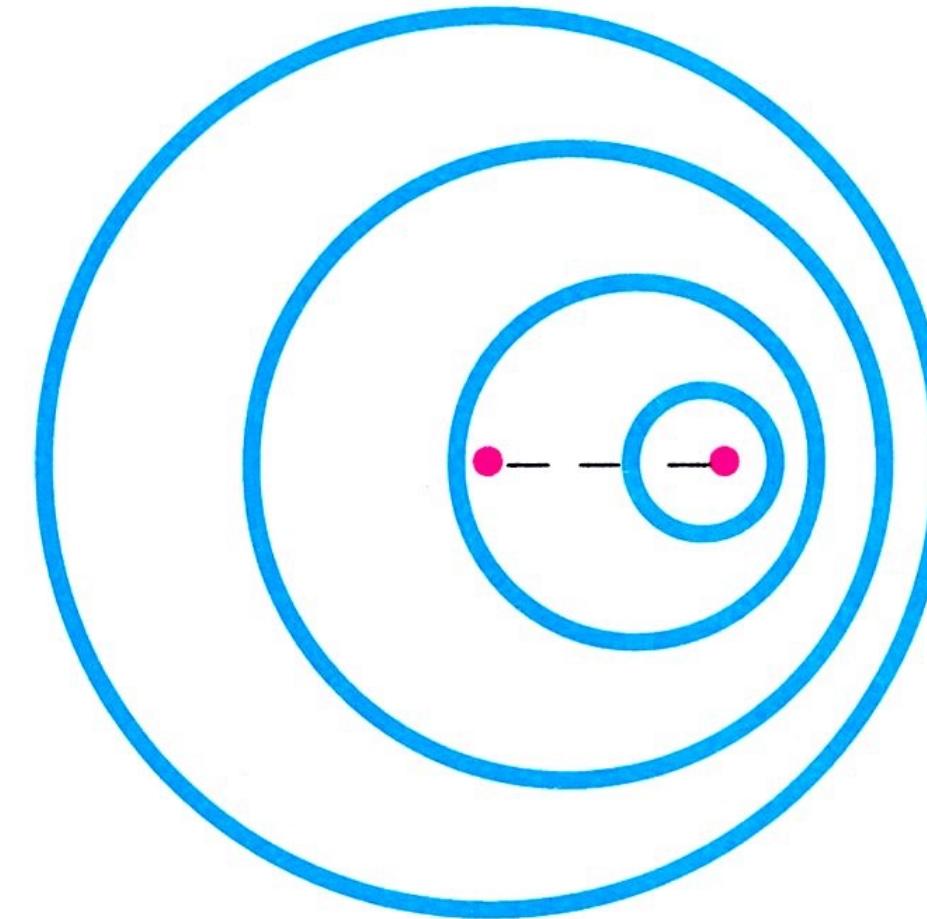
Effetto Doppler: moto relativo della sorgente / osservatore

Facile da comprendere usando i **fronti d'onda**



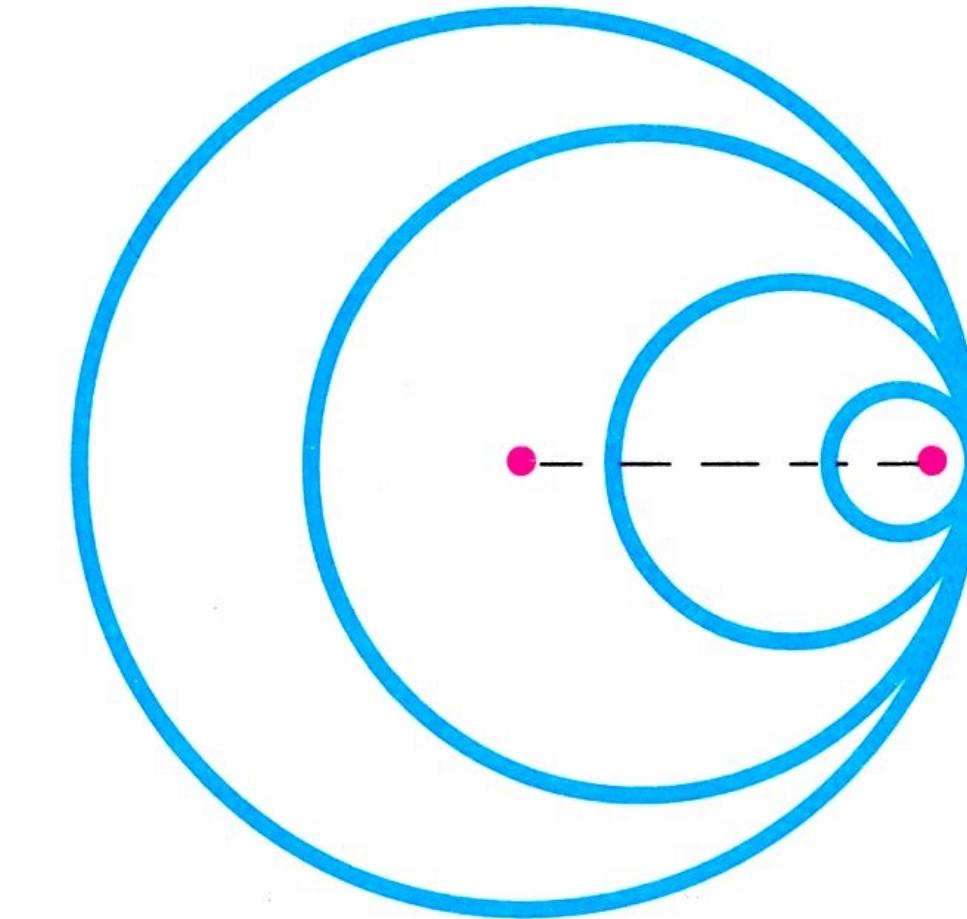
$$v_{\text{ogg}} = 0$$

*Fronti d'onda concentrici,
separati da una λ*



$$v_{\text{ogg}} < v_{\text{suono}}$$

*Fronti d'onda emessi
seguendo la sorgente:
si accumulano davanti,
si disperdono dietro*

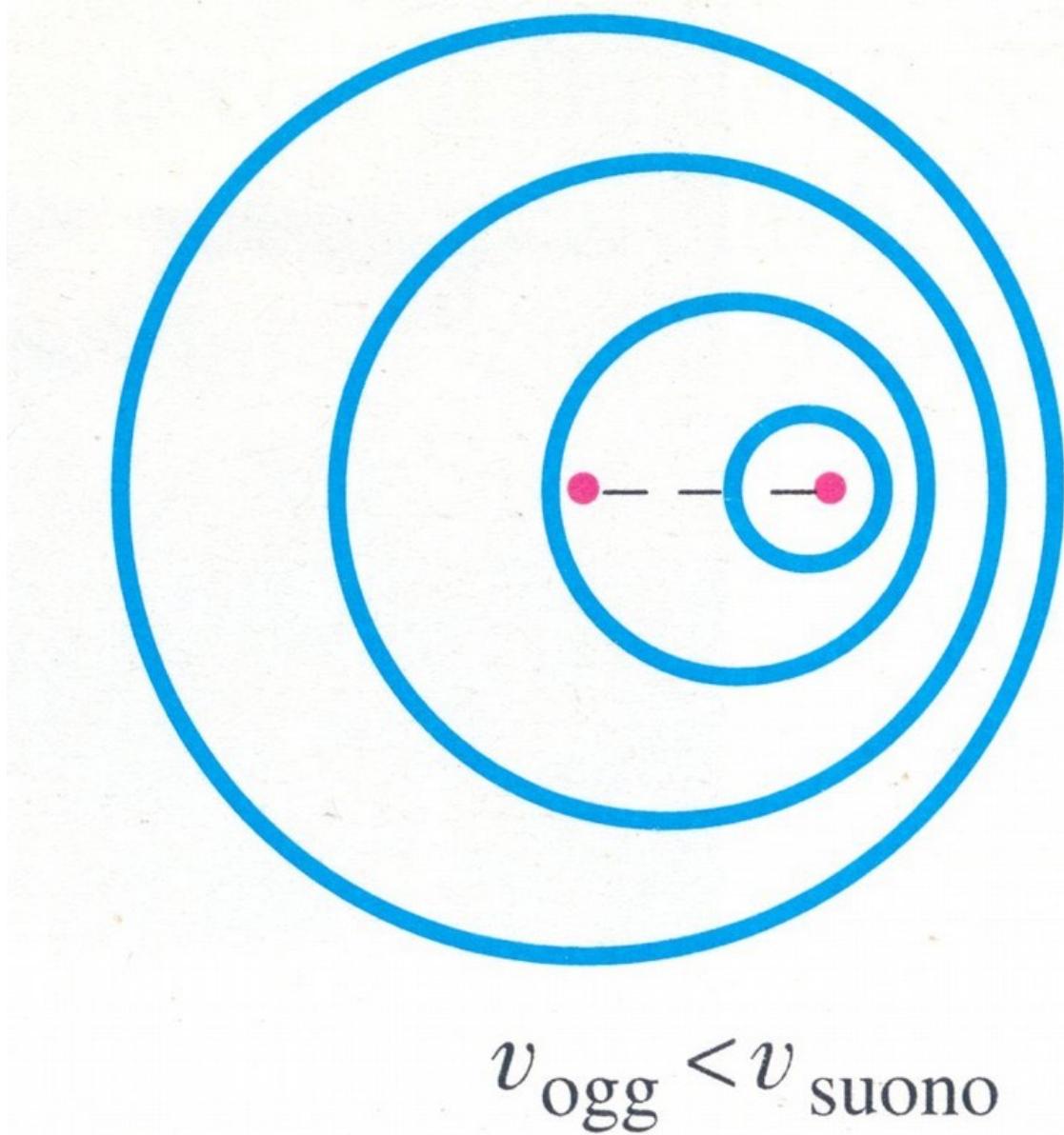


$$v_{\text{ogg}} = v_{\text{suono}}$$

*Fronti d'onda coincidono
davanti alla sorgente:
gigantesca interferenza
costruttiva (muro del suono)*

Muro del suono: altissima densità di energia (e aumento di pressione)
⇒ design di veicoli che superano la barriera del suono deve essere adeguato

Effetto Doppler (velocità subsonica)



$$v_{\text{ogg}} < v_{\text{suono}}$$

Fronte d'onda: luogo dei punti a fase costante
⇒ separati da λ

Accumulo (avvicinamento): λ scende, f sale
Rarefazione (allontanamento): λ sale, f scende

$$\lambda_1 = \frac{v - v_s}{f_{\text{em}}} \quad f_1 = \frac{v}{v - v_s} f_{\text{em}}$$

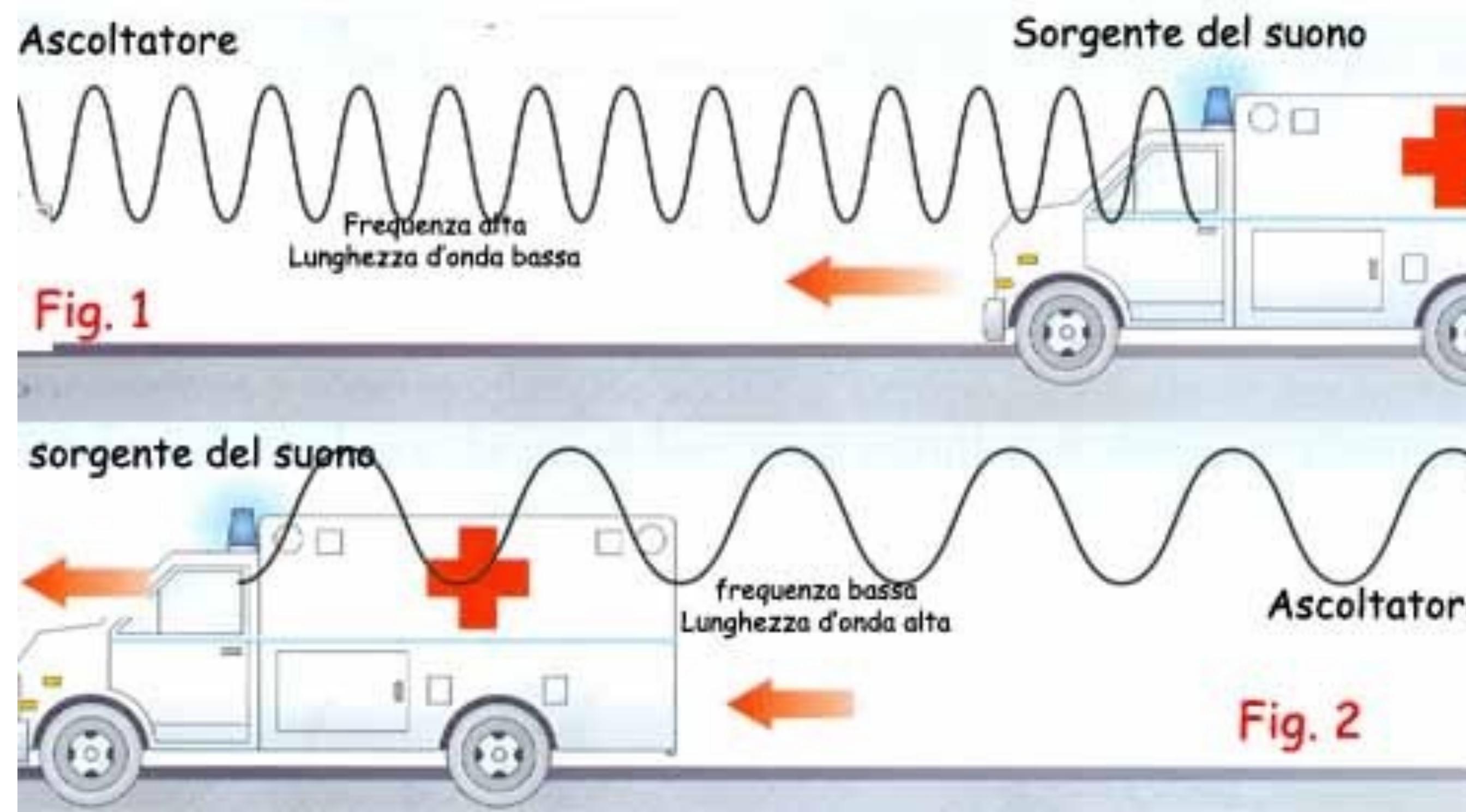
Stesso effetto *qualitativo* se la sorgente è ferma e l'osservatore si muove
Diverso effetto *quantitativo*: non c'è perfetta simmetria tra i due effetti!

$$f_2 = \frac{v + v_{\text{obs}}}{v} f_{\text{em}} \quad f_1 \neq f_2$$

Nota: l'intero spettro subisce l'effetto Doppler ⇒ problemi di intelligenza (fonemi)

Discontinuità dell'effetto Doppler

Classico esempio: un'ambulanza che ci viene incontro e ci oltrepassa



Nell'istante in cui passa davanti a noi il segno della v_s cambia
Percepiamo un *balzo in frequenza* (una **discontinuità** nel tono)

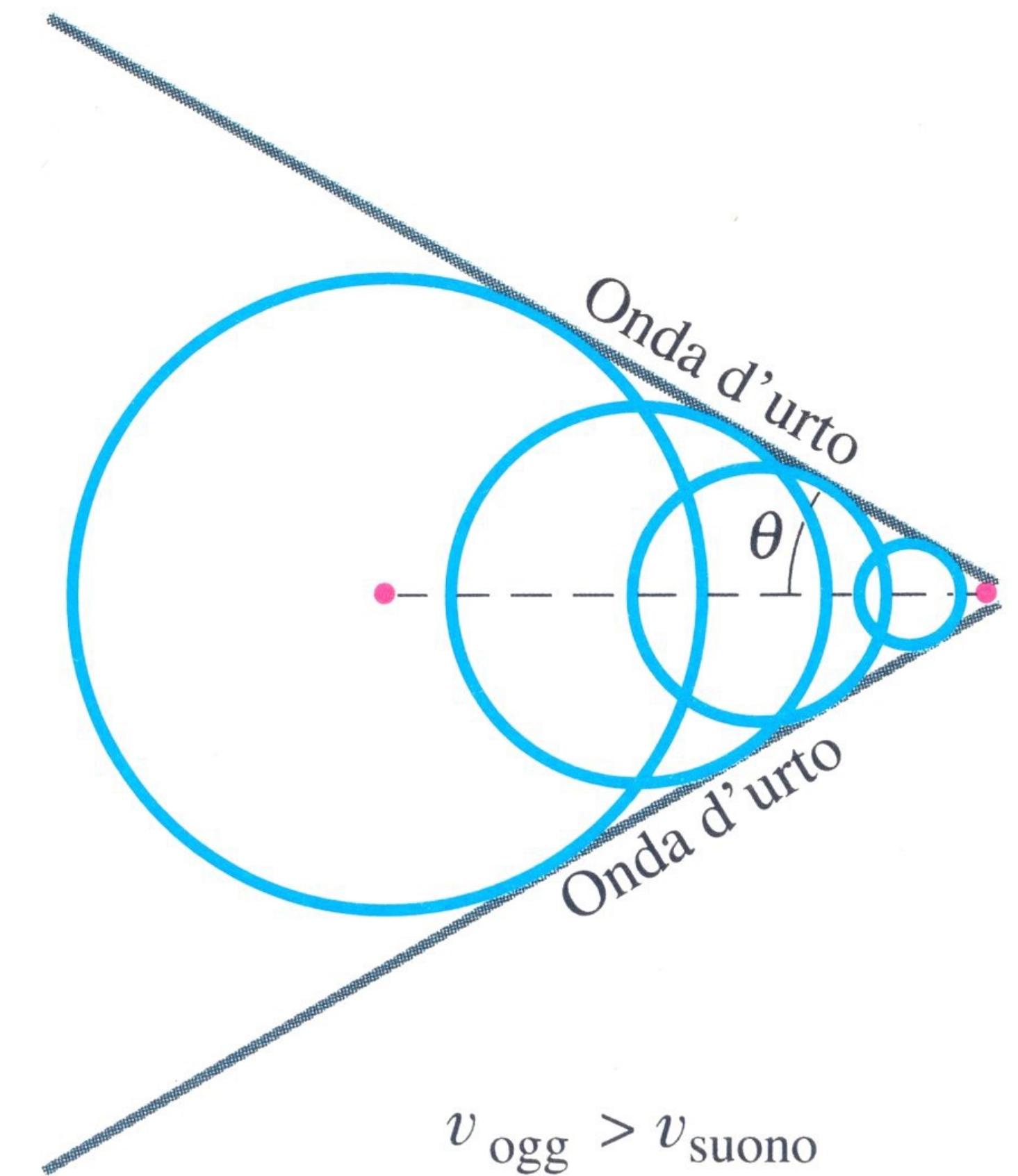
Effetti supersonici

Fronti d'onda si accumulano dietro alla sorgente

*Interferenza **costruttiva** sulla superficie laterale
di un **cono** definito dall'inviluppo dei fronti d'onda*

*Angolo di **apertura** legato al rapporto tra velocità
del suono / sorgente \Rightarrow **numero di Mach***

$$Ma = \frac{v_{\text{source}}}{v_{\text{sound}}} = \frac{1}{\sin \theta}$$



Il numero di Mach è sempre definito *localmente*: la velocità del suono cambia a seconda del mezzo e le sue condizioni (per es. a terra \neq in quota)

Perché si ode un “bang” al superamento del muro del suono?

Il cono si propaga seguendo i fronti d'onda
⇒ raggiunge l'osservatore a terra

Interferenza costruttiva = accumulo di energia e
pressione ⇒ onda d'urto percepita come un rumore



Diverse parti di un aereo generano onde sonore
⇒ le loro onde d'urto arrivano all'osservatore a tempi diversi

⇒ è possibile udire **bang multipli**

Applicazioni militari: il sonar

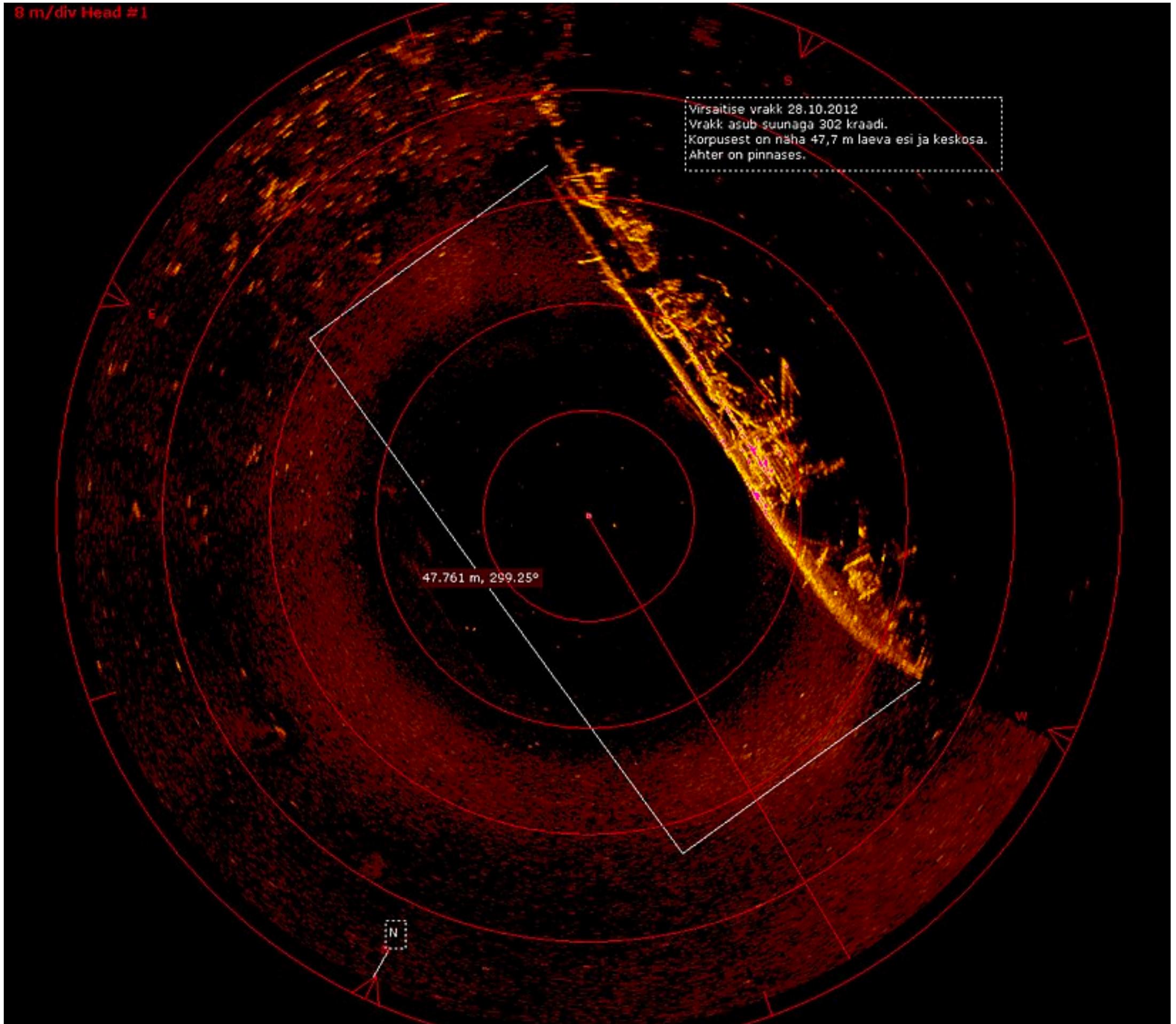


Immagine sonar di un relitto della II guerra mondiale sul fondo marino

SONAR = SOund, NAVigation and Ranging

Basato su **eco** (riflessione):
intervallo misurato + stima della v_{suono}
= posizione e distanza

Necessaria una **calibrazione** per
densità e temperatura dell'acqua

Usabile sia in aria che in acqua
ma usato soprattutto in acqua:

- Rilevazione navi nemiche
- Mappatura fondo marino
- Localizzazione banchi di pesci

Le frequenze usate dal sonar

Inizialmente nel range **udibile**: facilitava troppo il nemico

Attualmente nel range 20-100 kHz ⇒ **ultrasuoni**

La **frequenza** non può essere arbitraria: ottimizzata per **distanza** e **dimensione**

***Distanza:** dipende dall'attenuazione*

*Frequenze troppo alte necessitano troppa energia per essere emesse
e vengono assorbite troppo efficacemente*

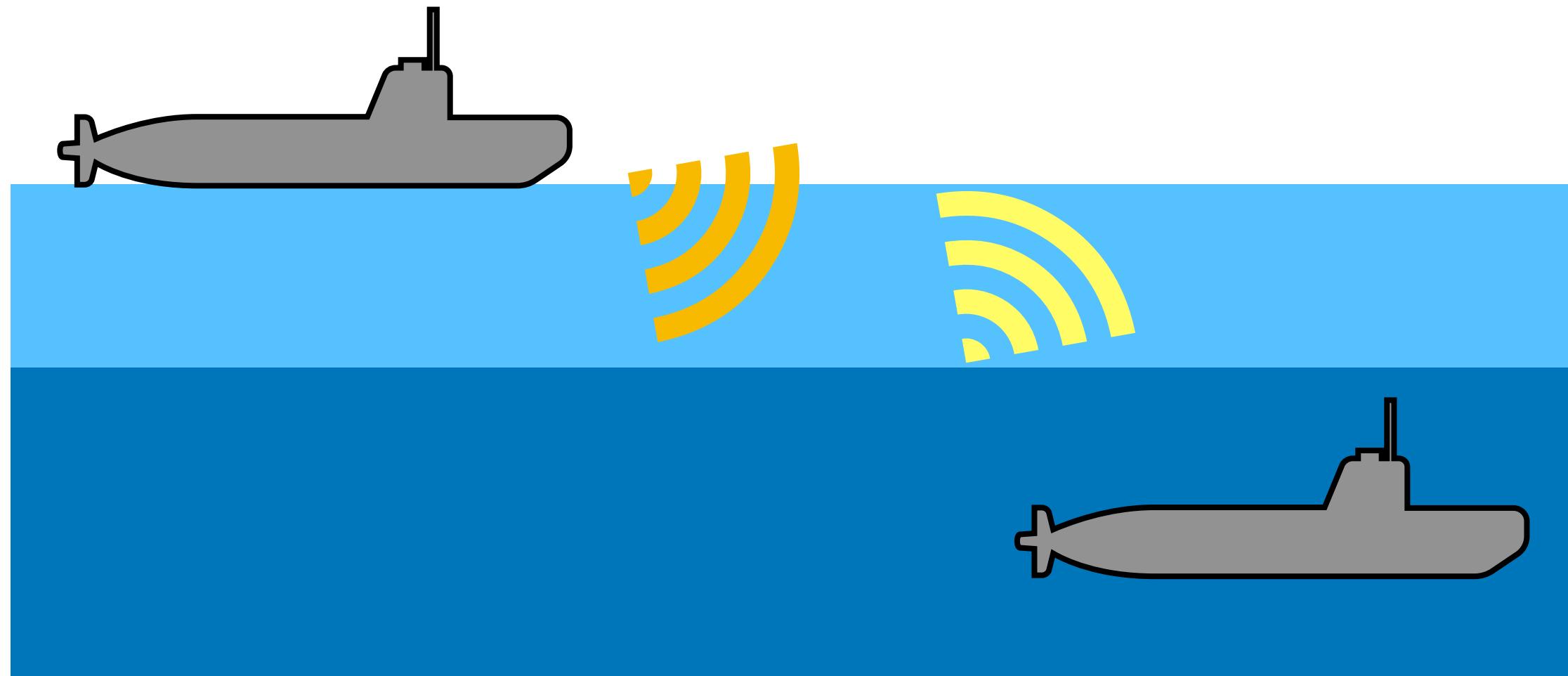
***Dimensione:** dipende dalla lunghezza d'onda*

Bersagli piccoli necessitano λ piccole (cfr. diffrazione da fenditura) per riflettere

Le due condizioni sono **incompatibili** ⇒ 20-100 kHz è un compromesso
(distanze di km, dimensioni di m)

Invisibilità al sonar: il termoclima

Cambiamenti di **temperatura** marina influenzano l'efficacia del sonar



*Mari tropicali: strato caldo superficiale e uno freddo sottostante (anche nel mediterraneo) che non si mescolano (**termoclima**)*

Cambio repentino di temperatura = cambio repentino di densità ⇒ interfaccia

Interfaccia tra acqua marina a densità molto diverse
⇒ riflessione dell'onda all'interfaccia che impedisce di sondare in profondità

Un sottomarino nemico può *nascondersi* sotto il termoclima

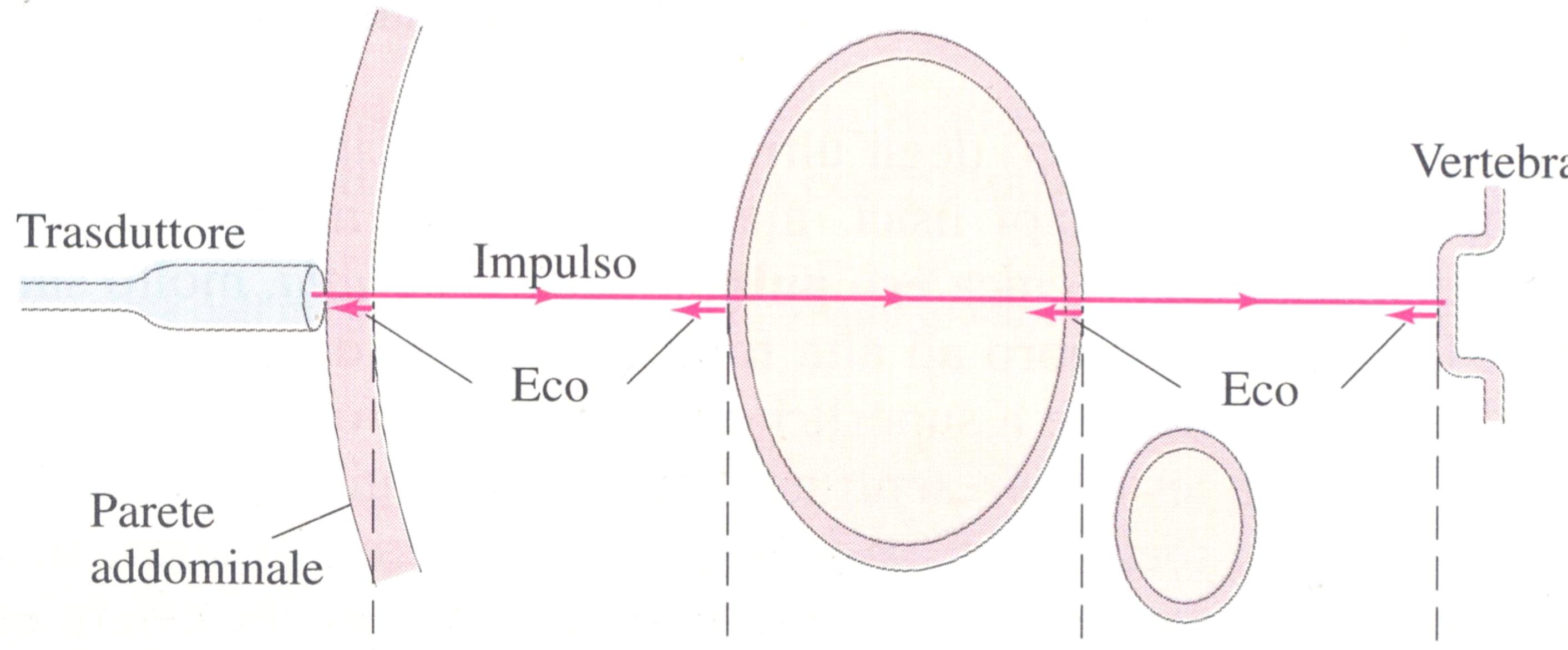
Applicazioni civili: l'ecografia

Stesso principio del sonar, ma diversi ordini di grandezza in gioco

Diagnostica con risoluzione del mm
(noduli, valvole cardiache, etc.)
su distanze di 1-10 cm

⇒ frequenze di 1-10 MHz con $v = 1540 \text{ m/s}$ (acqua)

$$\lambda = \frac{v}{f} \simeq 1.5 \text{ mm}$$



Intensità: molto basse
($\sim 10^4 \text{ W m}^{-2}$): nessun
danno documentato

Vantaggio: tessuti
trasparenti ai raggi X
riflettono gli ultrasuoni

Funzionamento dell'ecografia

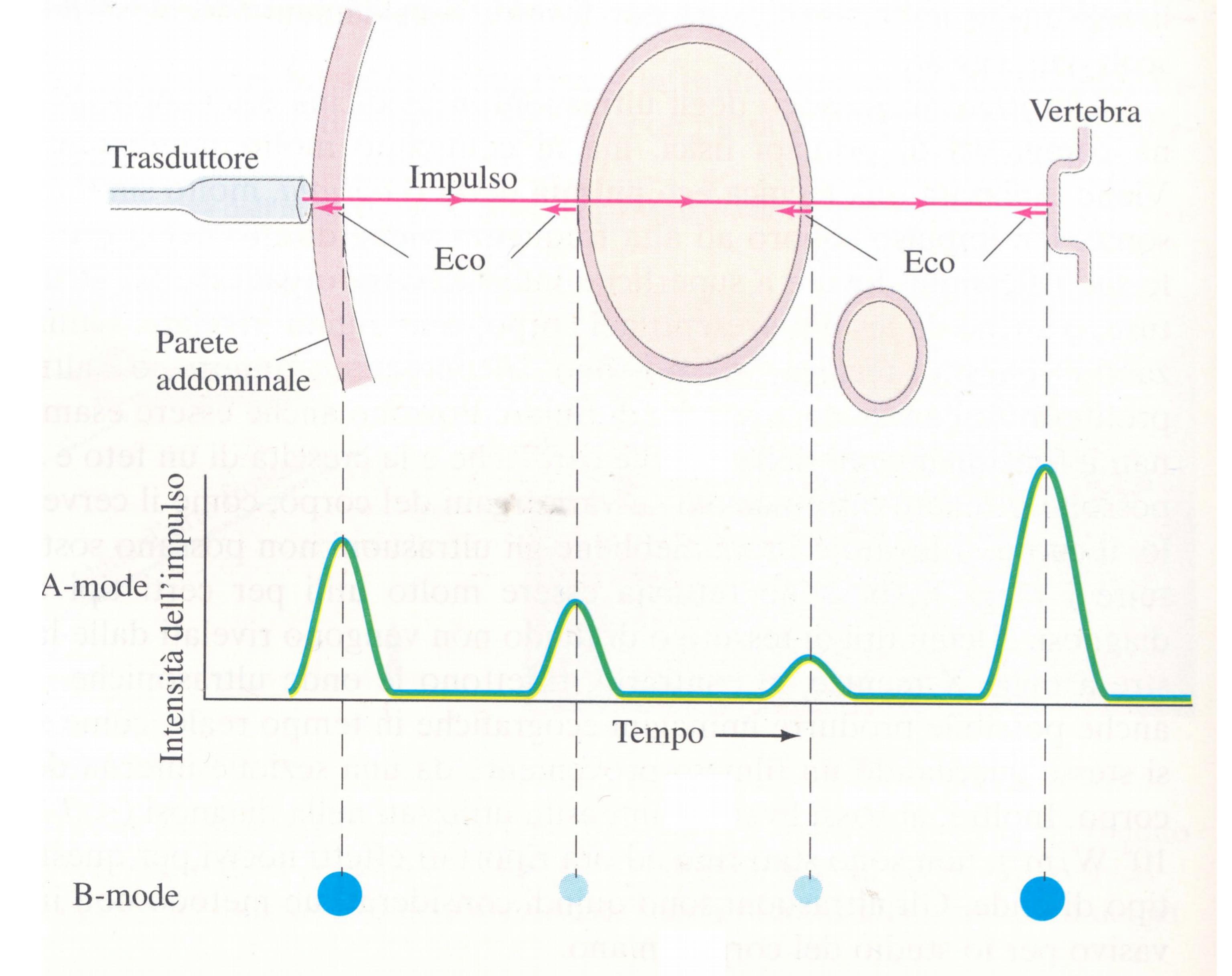
**Trasduttore: gel applicato con stessa v del corpo
⇒ riduce riflessioni**

Ogni superficie di separazione genera un'eco

Aampiezza della riflessione dipende da:

- 1) attenuazione per distanza
- 2) cambiamento di densità

Mezzi tipici sono
acqua ($v=1540$ m/s)
aria ($v=360$ m/s)
osso (~ 4 km/s)



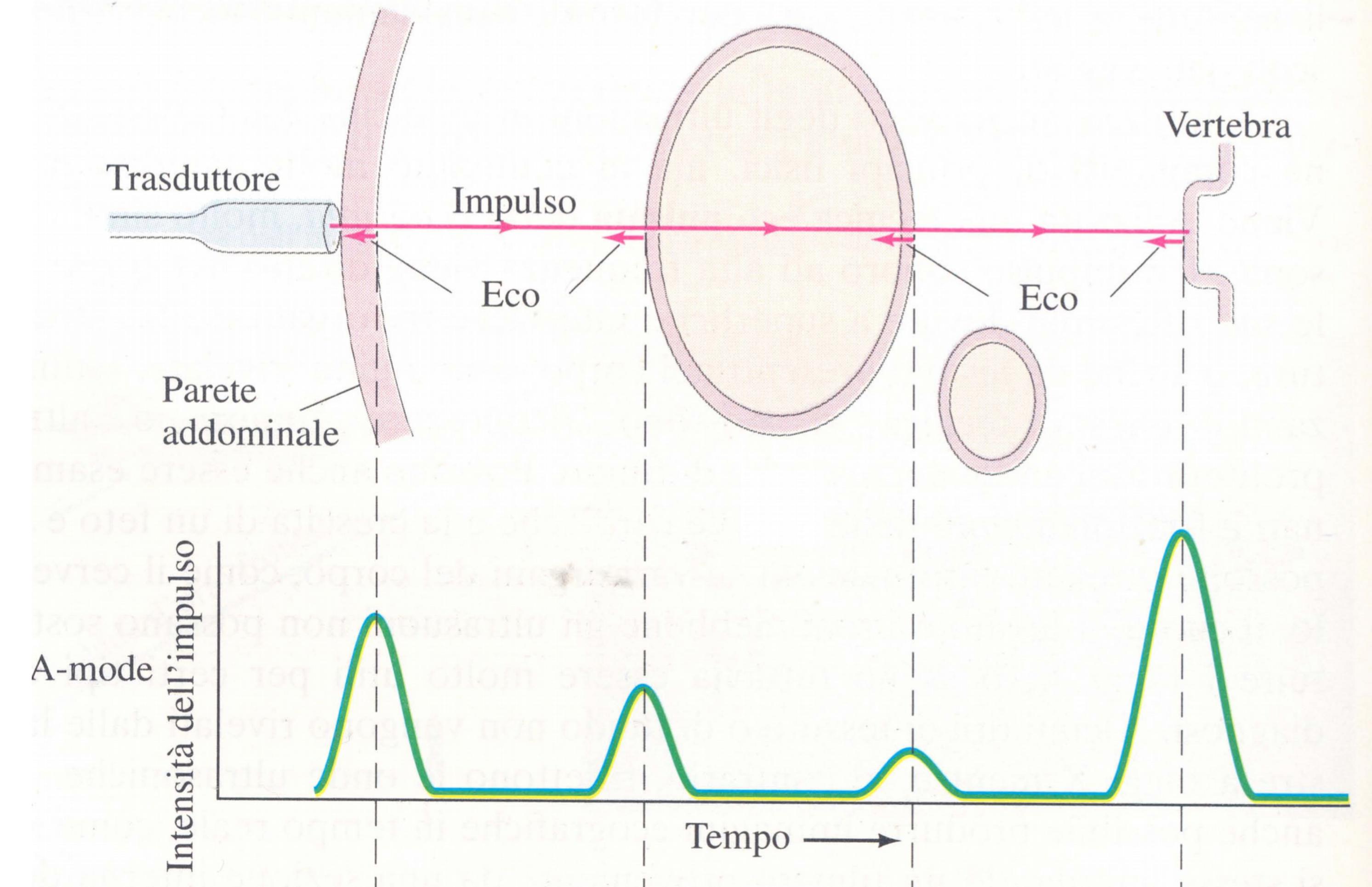
A-mode: un “grafico” dell’intensità vs tempo

A-mode: registra l’ampiezza del segnale riflesso e il ritardo

Per tipici segnali
 $(d = 25 \text{ cm})$ il ritardo
è $\sim 100s \mu\text{s}$: alla portata di strumenti moderni

Ossa

Cambiamento di mezzo consistente: solo onda riflessa
⇒ non si può vedere oltre



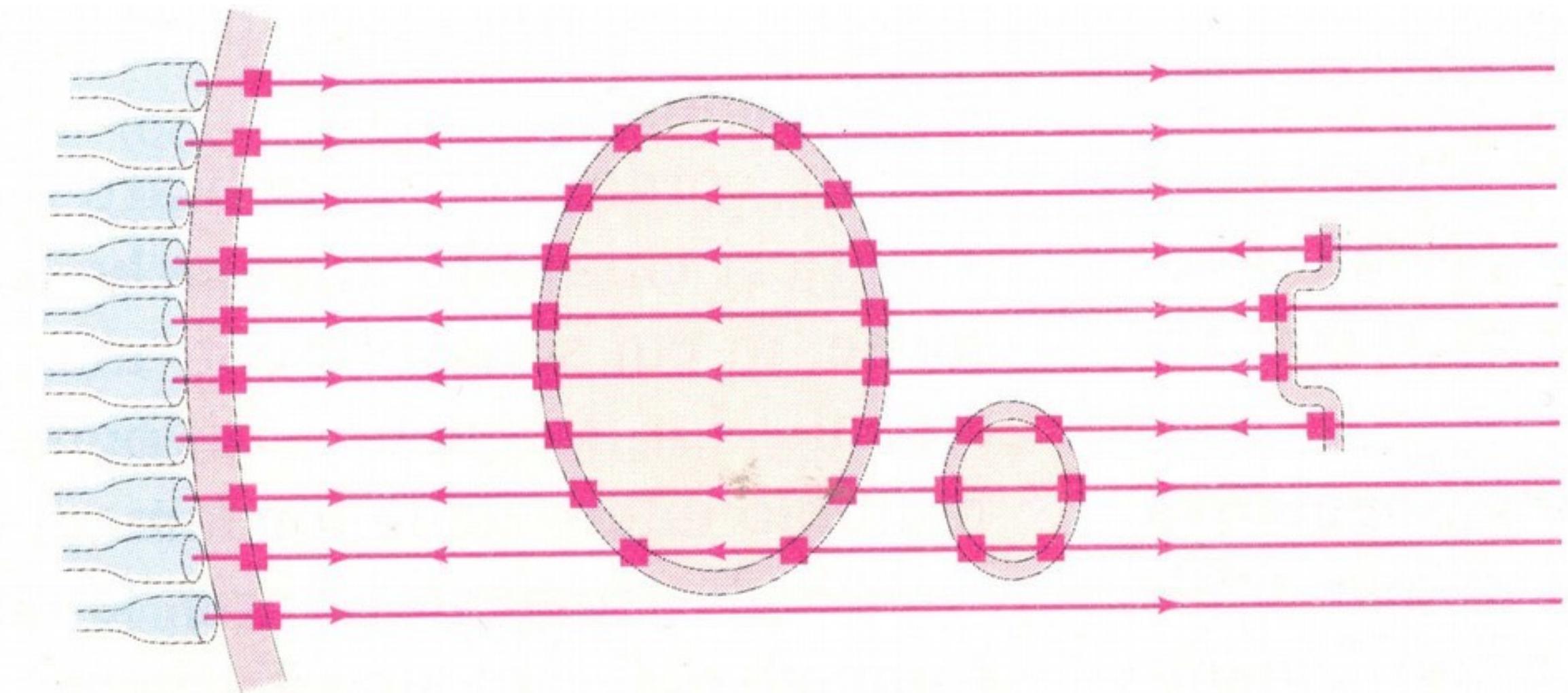
B-mode ed eco-Doppler

B-mode: ogni eco è rappresentato da un punto, la cui luminosità mappa intensità

Adatto per imaging: posso usare un array di trasduttori per costruire immagini 2D (oppure ruotare un trasduttore)

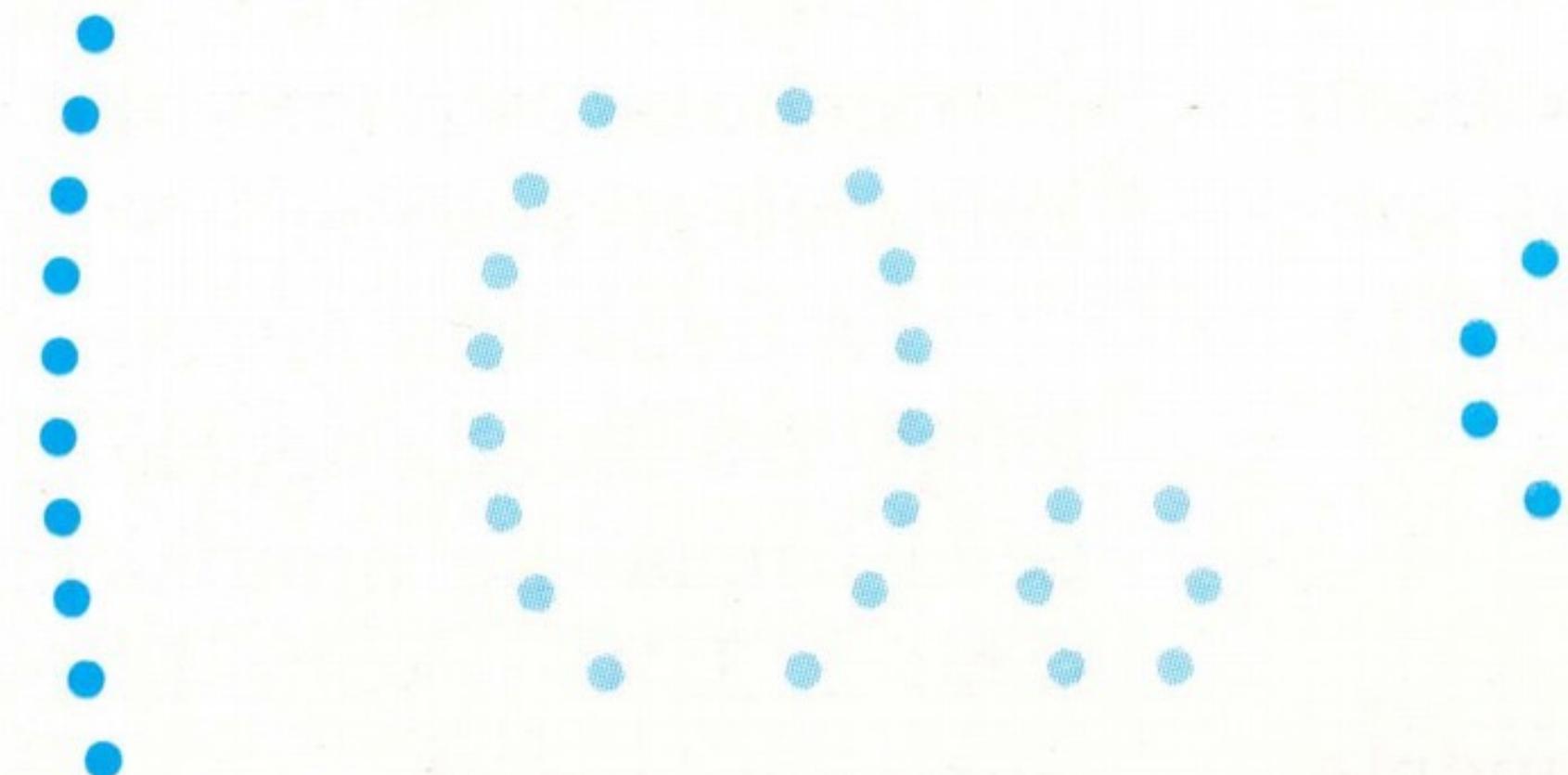
Risoluzione temporale

Normalmente bassa, crea immagini distorte nel caso di parti in movimento (valvole, cuore, feto, etc.)

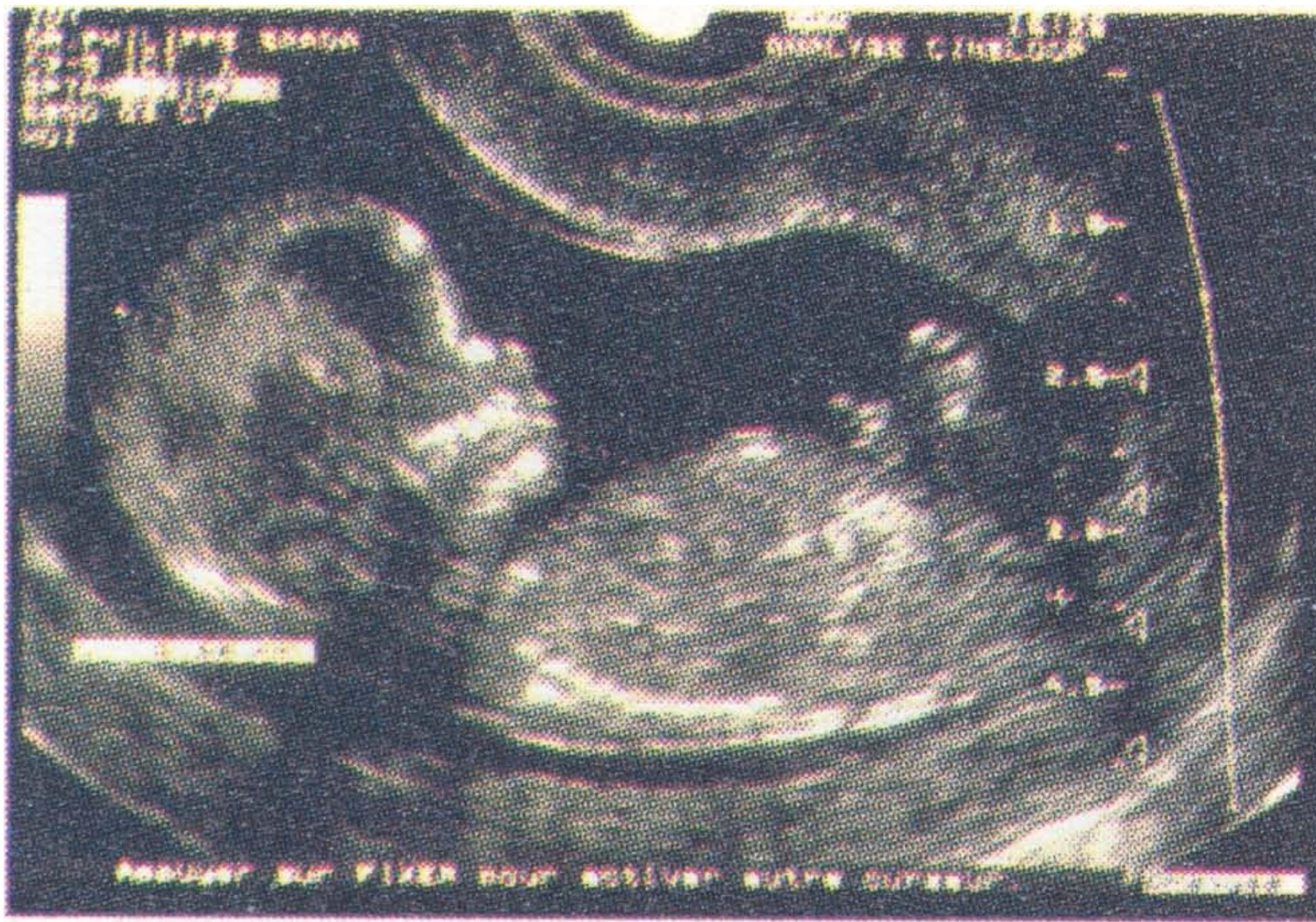


eco-Doppler

Combina la mappatura degli eco con la misura dell'effetto Doppler dell'onda riflessa
Può mappare il flusso sanguigno, battito cardiaco, etc...

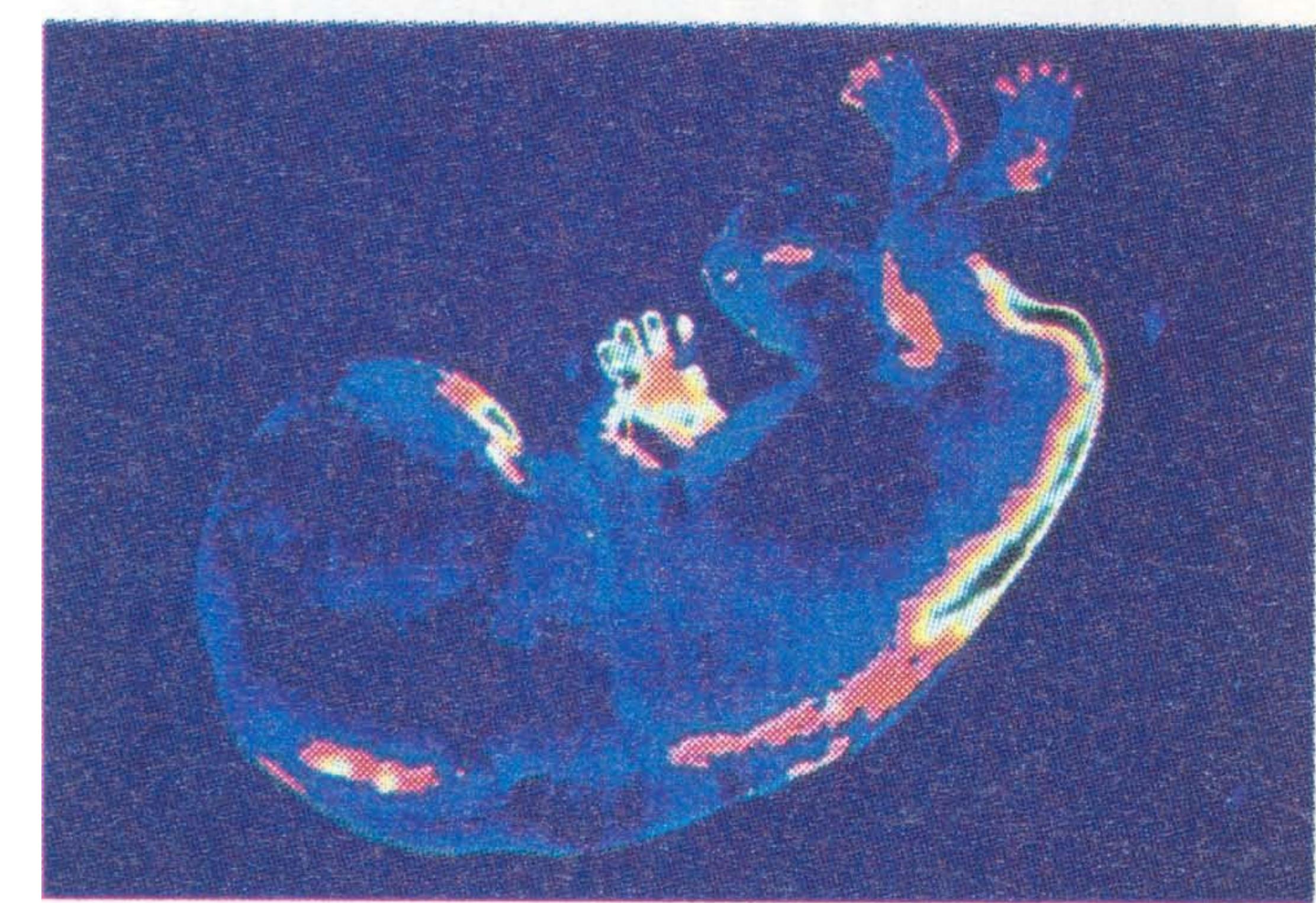


Ecografie di feti (B-mode ed eco-Doppler)



B-mode classico

Solo intensità registrata, si vedono bene le forme del bambino ma soggetto a sfocatura per parti mobili



eco-Doppler

Combinazione tra riflessione (intensità) e velocità (colore) che mette in luce per es. vasi sanguigni