

# Fisica per applicazioni di realtà virtuale

Anno Accademico 2022-23

Prof. Matteo Brogi

Dipartimento di Fisica, stanza B3, nuovo edificio

**Lezione 16**

Acustica parte 1

# Acustica: lo studio del suono

Onde sonore sono onde meccaniche (lezioni 14-16) **longitudinali**

⇒ Senza materia il suono non si propaga

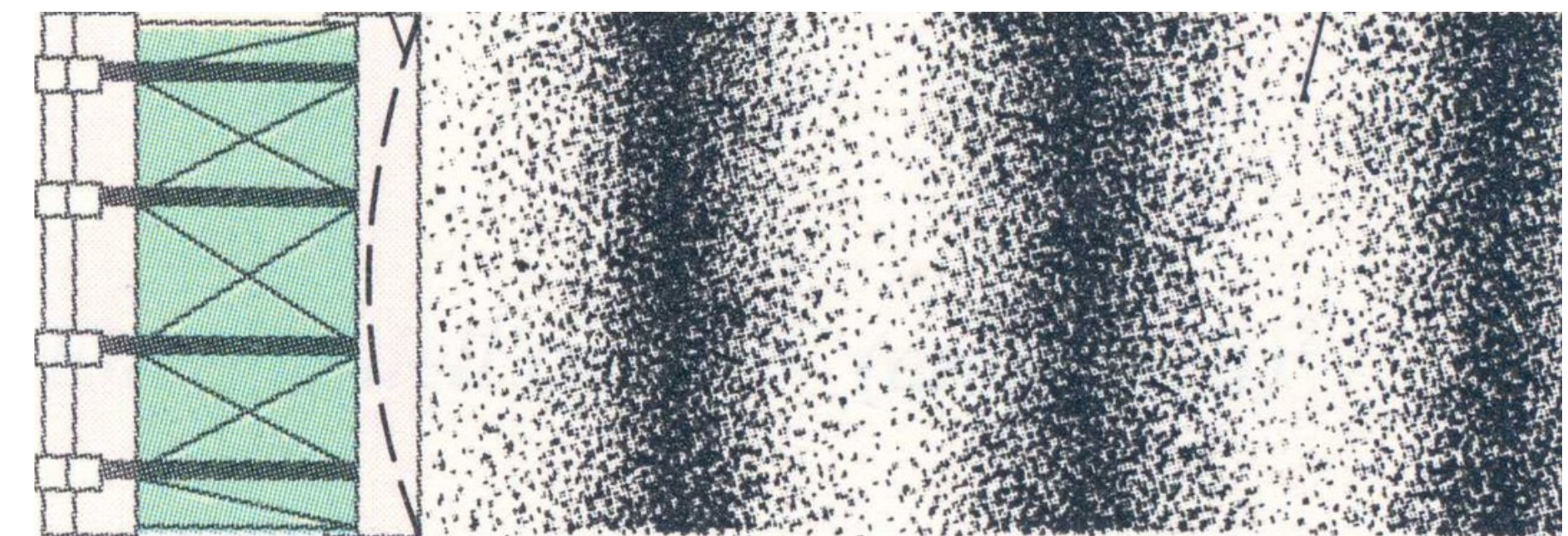
(particolare fondamentale ma spesso dimenticato in film/videogiochi nello spazio)

Longitudinali: l'onda si *propaga* nella stessa direzione dell'*oscillazione materiale*

velocità d'onda  $v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$

Velocità dipende dal  
modulo di compressione  $B$

Fenomeno di compressione  
e rarefazione del mezzo



Le molecole del mezzo oscillano di moto armonico (a velocità  $\neq v$ )  
generando una serie di stati di compressione e rarefazione



# Velocità di un'onda acustica

Velocità del suono in diversi materiali, a 20 °C e 1 atm	
Materiale	Velocità (m/s)
Aria	343
Aria (0 °C)	331
Elio	1005
Idrogeno	1300
Acqua	1440
Acqua di mare	1560
Ferro e acciaio	≈ 5000
Vetro	≈ 4500
Alluminio	≈ 5100
Legno duro	≈ 4000

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Dipendenza dalle proprietà del mezzo (**densità** ed **elasticità**)

$$v = (331 + 0.6T) \text{ m s}^{-1} \quad (\text{aria, } T \text{ in } ^\circ\text{C})$$

Dipendenza dalle condizioni fisiche del mezzo (**temperatura T**)

**Elio:** densità minore ma  $B$  simile  $\Rightarrow v$  maggiore dell'aria

**Liquidi:** densità 1000× maggiore ma  $B$  1000× minore (lezione 13)  
 $\Rightarrow$  simile ai gas come H, He



# Caratteristiche del suono

Onda **longitudinale** di **pressione** generata da uno spostamento fisico della sorgente (per es. membrana di un tamburo)

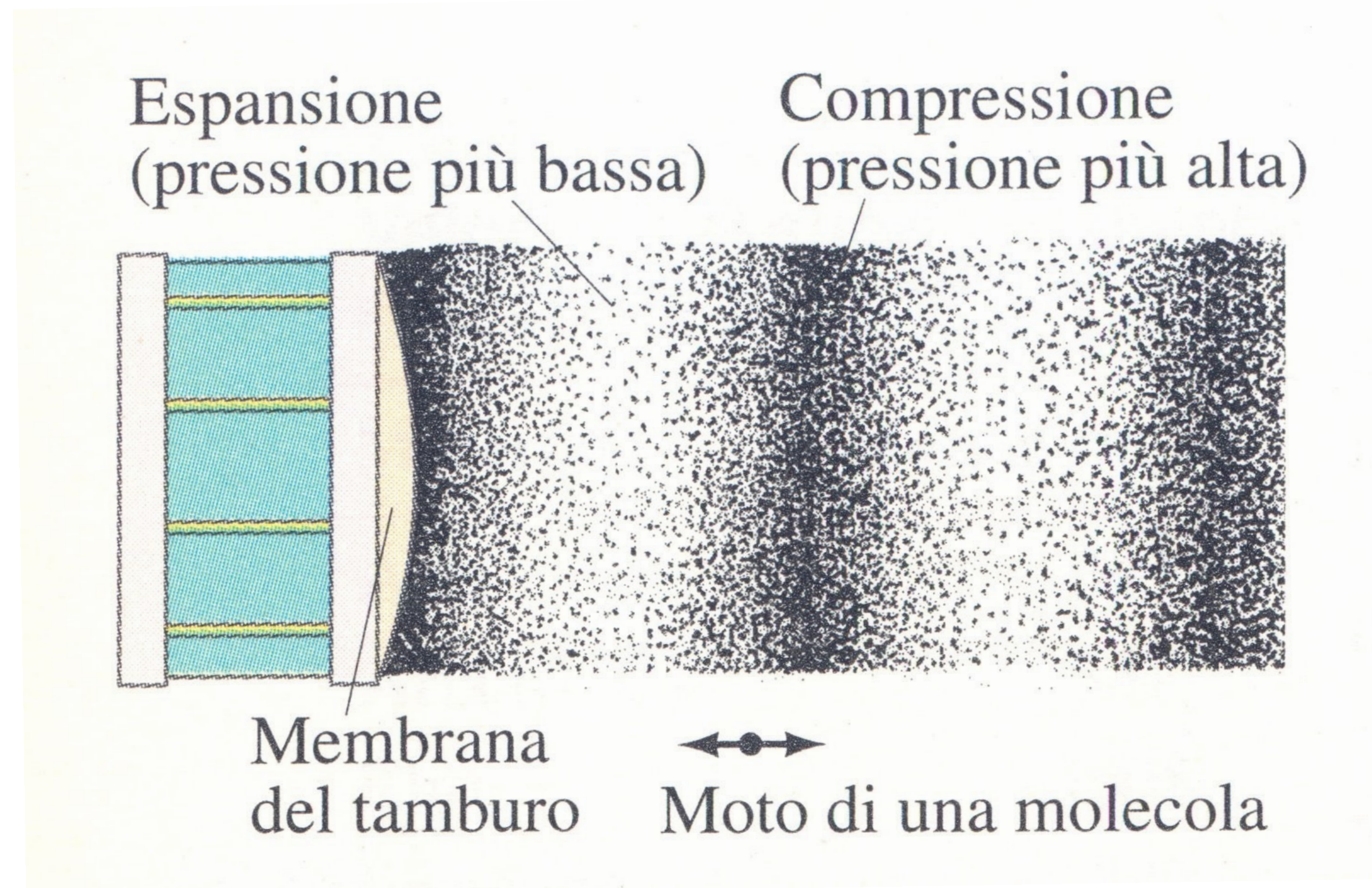
**Pressione:** forza applicata (normale) per unità di superficie

$$P = \frac{F_N}{A}$$

**Unità:**

$\text{N m}^{-2} = \text{Pa}$  (Pascal)

$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} =$

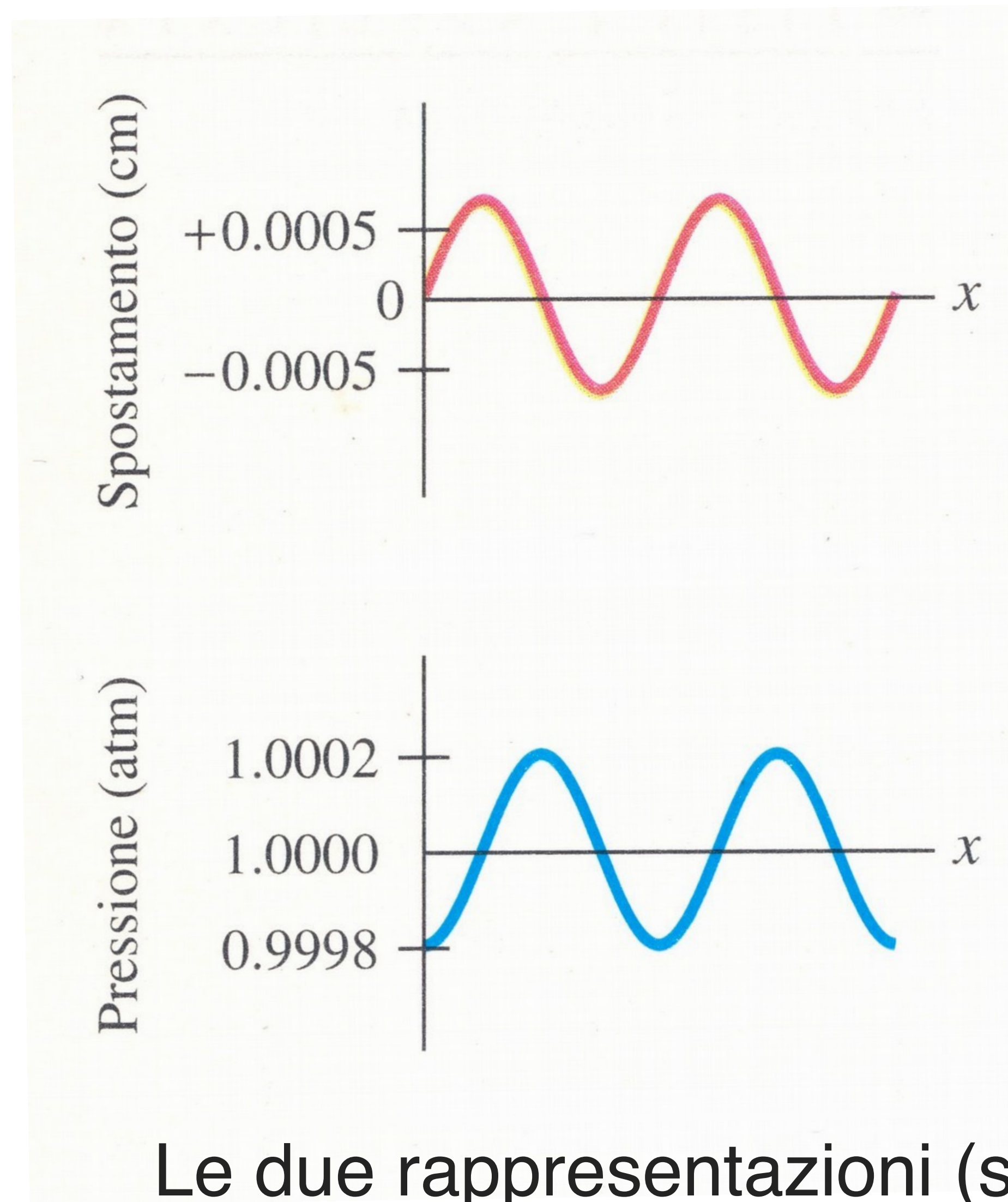


**gas:**  $P$  viene dal moto di agitazione delle molecole

**fluidi:**  $P$  viene dalla forza peso degli strati di liquido sovrastanti (lo vedremo nell'ultima unità)



# Caratteristiche del suono



Lo **spostamento** delle molecole  
è **sfasato** rispetto all'onda di  
**pressione** di  $\pi / 2$

⇒ A un massimo (o minimo) della  
pressione corrisponde uno  
spostamento nullo

⇒ A un valore "medio" di pressione  
corrisponde il max. spostamento

Le due rappresentazioni (spostamento o pressione) sono equivalenti  
e possono essere utilizzate a seconda del problema da risolvere

# Fisiologia del suono, nomenclatura

**Tono (pitch):** l'equivalente della frequenza, può essere acuto o grave

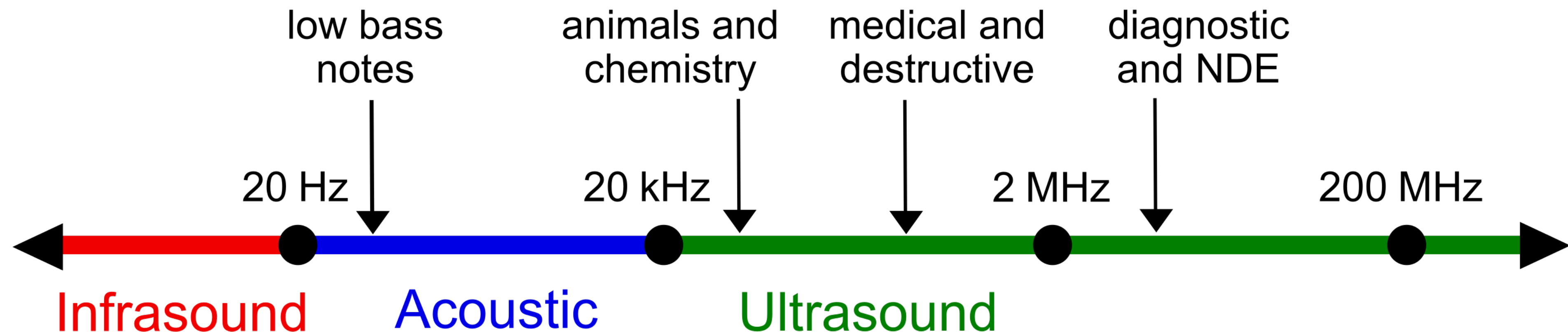
**Orecchio umano:** da 20 a 20,000 Hz

Il limite superiore cambia con l'età: il mio è 17.5 kHz (stabile da ~10 anni)

Fuori da questo intervallo: **infrasuoni** ( $< 20$  Hz) o **ultrasuoni** ( $> 20$  kHz)

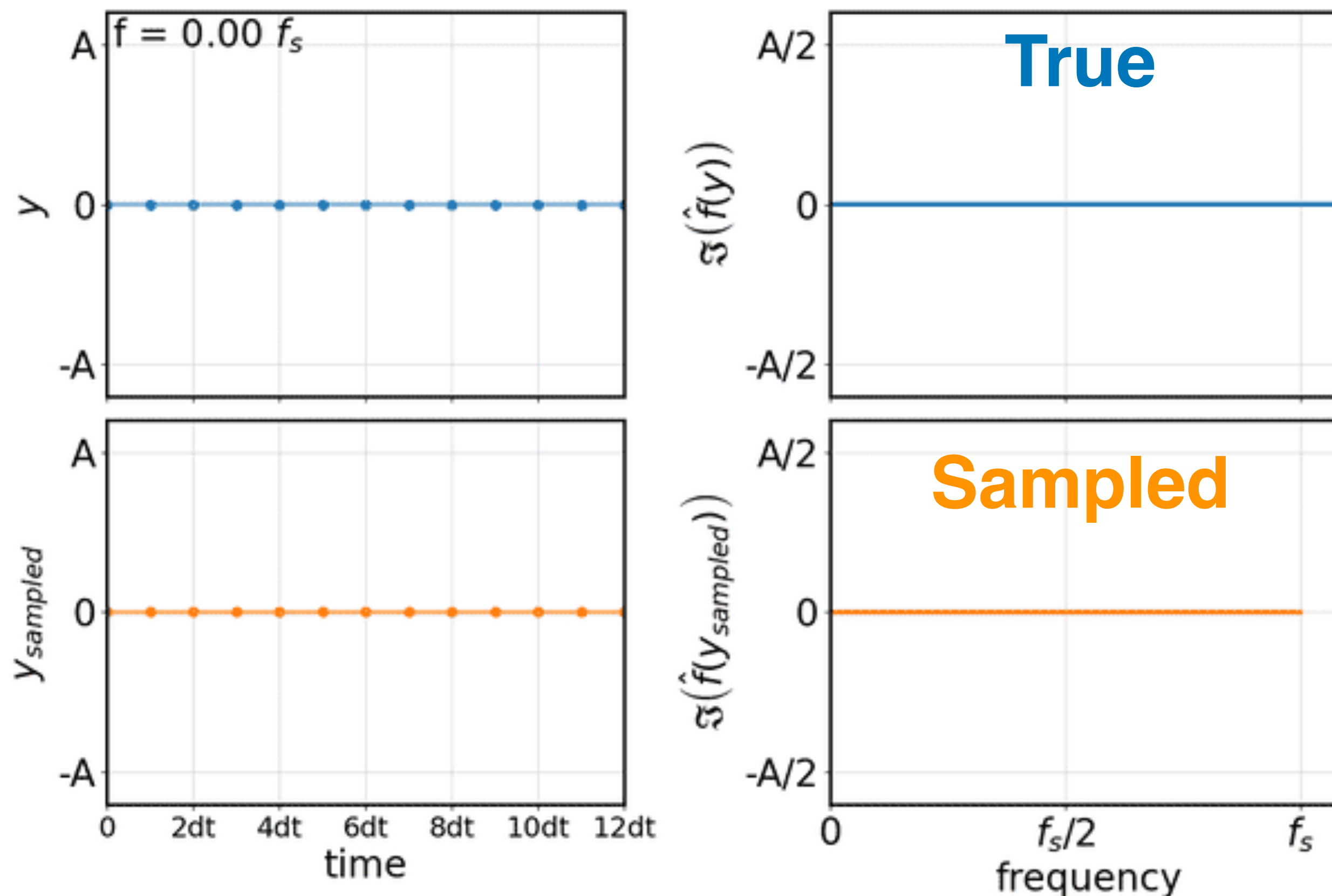
Ultrasuoni particolarmente comuni tra gli animali (cane: 50 kHz)  
e anche usati per spostarsi (pipistrello: 100 kHz)

Infrasuoni anche se non udibili potenzialmente pericolosi  
ad alto volume (3<sup>a</sup> armonica compatibile con frequenza cardiaca)



# Intervallo udibile e campionamento digitale

**Teorema di Nyquist:** un campionamento a frequenza  $f$  registra / riproduce onde correttamente fino a una frequenza  $f/2$



**Aliasing:** onde con  $f' > f/2$  vengono interpretate come onde a frequenza minore

**Soluzione:** il segnale va “filtrato” per eliminare frequenze più alte di  $f/2$  (filtro passa-basso)

**Campionamento audio a 44.1 kHz:** tecnicamente  $f/2 = 22.05$  kHz appena sopra sensibilità umana, ma filtro produce frequenze spurie



# Volume e scala dei decibel (dB)

Il **volume** equivale all'intensità dell'onda,  
ed è una caratteristica fondamentale legata alla percezione

Sorgente del suono	Intensità (W/m <sup>2</sup> )
Aviogetto a 30 m	100
Soglia del dolore	1
Concerto rock rumoroso al chiuso	1
Sirena a 30 m	$1 \times 10^{-2}$
Interno di un'automobile che si muove a 90 km/h	$3 \times 10^{-5}$
Strada molto trafficata	$1 \times 10^{-5}$
Conversazione ordinaria, a 50 cm	$3 \times 10^{-6}$
Radio moderata	$1 \times 10^{-8}$
Sussurro	$1 \times 10^{-10}$
Fruscio di foglie	$1 \times 10^{-11}$
Soglia dell'udito	$1 \times 10^{-12}$

**Percezione umana:** orecchio  
sensibile a 12 ordini di grandezza!  
(intervallo di udibilità)

**Minima intensità udibile:**  
 $I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$

Sorgenti a distanza finita  
 $\Rightarrow$  onde sferiche

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



# Volume e scala dei decibel (dB)

Dato l'intervallo di udibilità (12 ordini di grandezza) ha senso esprimere l'intensità in una scala logaritmica

$$\beta \text{ (dB)} = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

**Scala dei decibel (dB) / bel (B)**

$$1 \text{ dB} = 0.1 \text{ B}$$

**La maggior parte dei fenomeni udibili ha un range di ~100 dB**

Sorgente del suono	Livello di intensità (dB)
Aviogetto a 30 m	140
Soglia del dolore	120
Concerto rock rumoroso al chiuso	120
Sirena a 30 m	100
Interno di un'automobile che si muove a 90 km/h	75
Strada molto trafficata	70
Conversazione ordinaria, a 50 cm	65
Radio moderata	40
Sussurro	20
Fruscio di foglie	10
Soglia dell'udito	0



# Attività umane in ambienti rumorosi e danni uditivi

In tipiche condizioni odierne (traffico, guida) il rumore di “fondo” è 75-80 dB

Sorgente del suono	Livello di intensità (dB)
Aviogetto a 30 m	140
Soglia del dolore	120
Concerto rock rumoroso al chiuso	120
Sirena a 30 m	100
Interno di un'automobile che si muove a 90 km/h	75
Strada molto trafficata	70
Conversazione ordinaria, a 50 cm	65
Radio moderata	40
Sussurro	20
Fruscio di foglie	10
Soglia dell'udito	0

Per udire chiaramente una conversazione, una radio, o musica in cuffia, bisogna aggiungere ~ 40 dB

**Questo porta il livello di intensità alla soglia del dolore (120 dB)**  
dolore = danno irreversibile

Il “fischio” percepito dopo un concerto o una notte in discoteca denota un danno = perdita di sensibilità alle frequenze più alte.



# Acustica: esercizi introduttivi

**Esercizio 10.01:** A che distanza è caduto un fulmine se il tuono raggiunge l'ascoltatore con 6.0 s di ritardo e la temperatura durante il temporale è 15.0 gradi centigradi?

**Esercizio 10.02:** Siete seduti in un grande concerto all'aperto e la temperatura è 23° C. Il sistema di altoparlanti del palco è posto a 300 m da voi, e il concerto è trasmesso live via onde radio a un ascoltatore distante 5,000 km. Trascurando ogni ritardo nel processare il segnale radio, si determini chi sente prima la musica, e con quale intervallo.

**Esercizio 10.03:** A volume massimo, un altoparlante riproduce frequenze tra 30 Hz e 18 kHz con volume 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?