

Sensi: udito
il suono onda meccanica

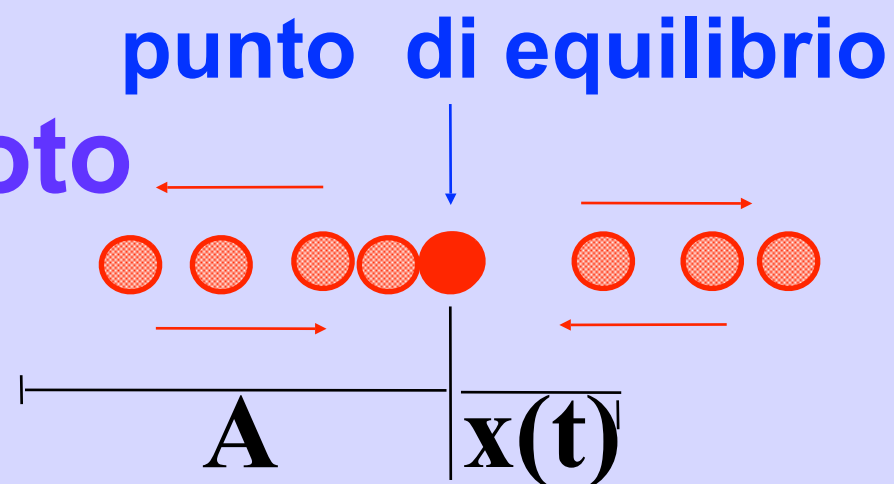
Concetti

- L' onda sonora è un onda meccanica
- Caratteristiche onde
- Propagazione onde

Il suono

suono : vibrazione meccanica delle particelle di un mezzo materiale (gas, liquido, solido)

molecola in moto



sono vibrazioni
di/tra molecole:
serve la materia!

fluidi :

- spostamenti delle particelle
- addensamenti e rarefazioni
- compressioni e dilatazioni

nel vuoto il suono
non
si propaga

onda di pressione

Periodo e frequenza

Fenomeno periodico: $S(t) = S(t+T)$

ritorna alla stessa configurazione dopo uno stesso intervallo di tempo

Periodo T = minimo intervallo di tempo

dopo il quale il fenomeno **ritorna alla stessa configurazione**
= **durata di una oscillazione** (unità di misura: secondo).

$$\begin{aligned} f(t) &= A \sin(2\pi t/T) \\ &= A \sin[(2\pi/T) t] \\ &= A \sin(\omega t) \end{aligned}$$

pulsazione $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$

Se 1 oscillazione dura n secondi,
in 1 secondo ci sono $1/n$ oscillazioni

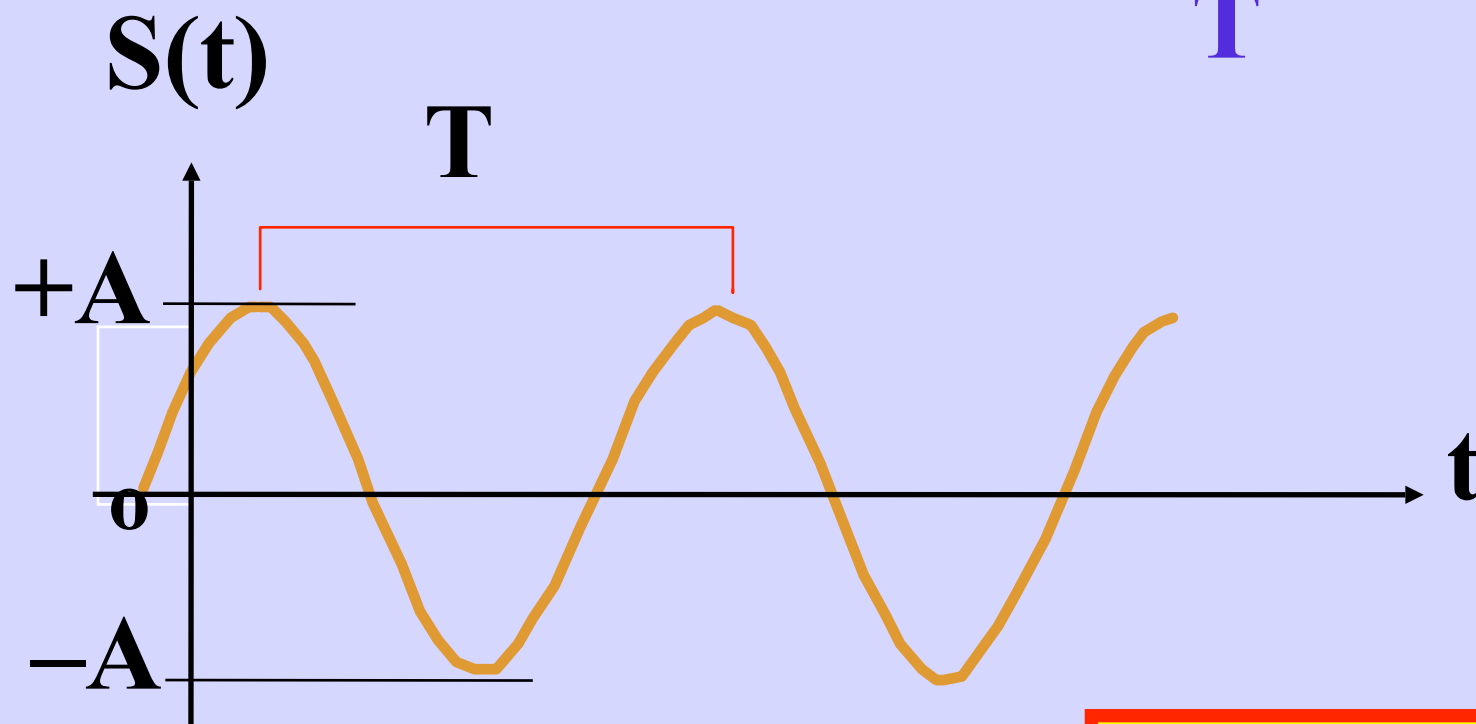
frequenza =
n. oscillazioni/sec

$$f = 1/T \quad \text{Hz} = 1/s$$

Ampiezza ed energia di un'onda

$$S(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$



A = ampiezza
T = periodo
f = frequenza
 ϕ = fase

ENERGIA DI UN'ONDA

$$E \propto A^2$$

Legge di propagazione delle onde

Ogni onda si propaga con una propria **velocità costante**

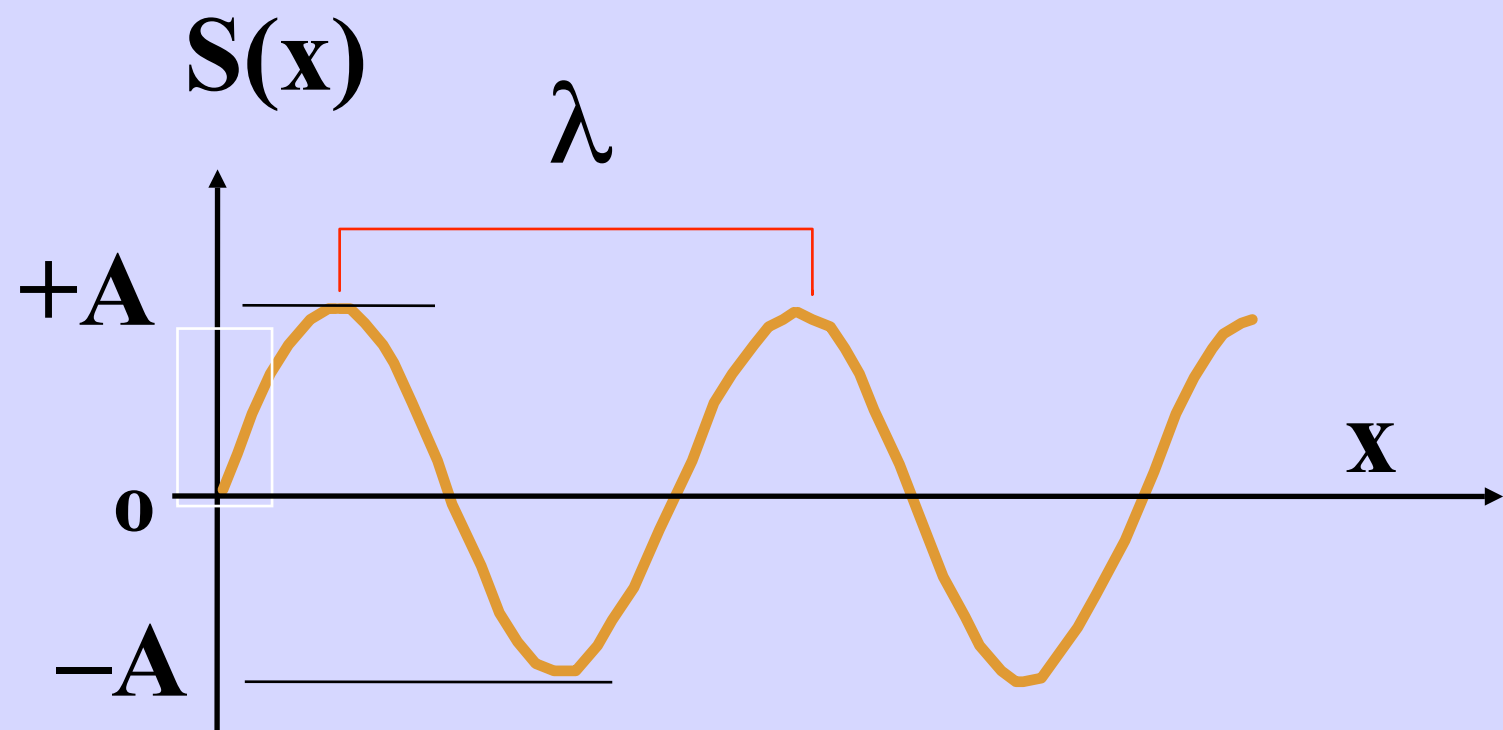
Lunghezza d'onda λ =

minima distanza

dopo la quale il fenomeno riprende la **stessa configurazione** =
distanza percorsa in un periodo
(unità di misura: metro).

Moto rettilineo uniforme:

$$x = v t \rightarrow \lambda = v T$$

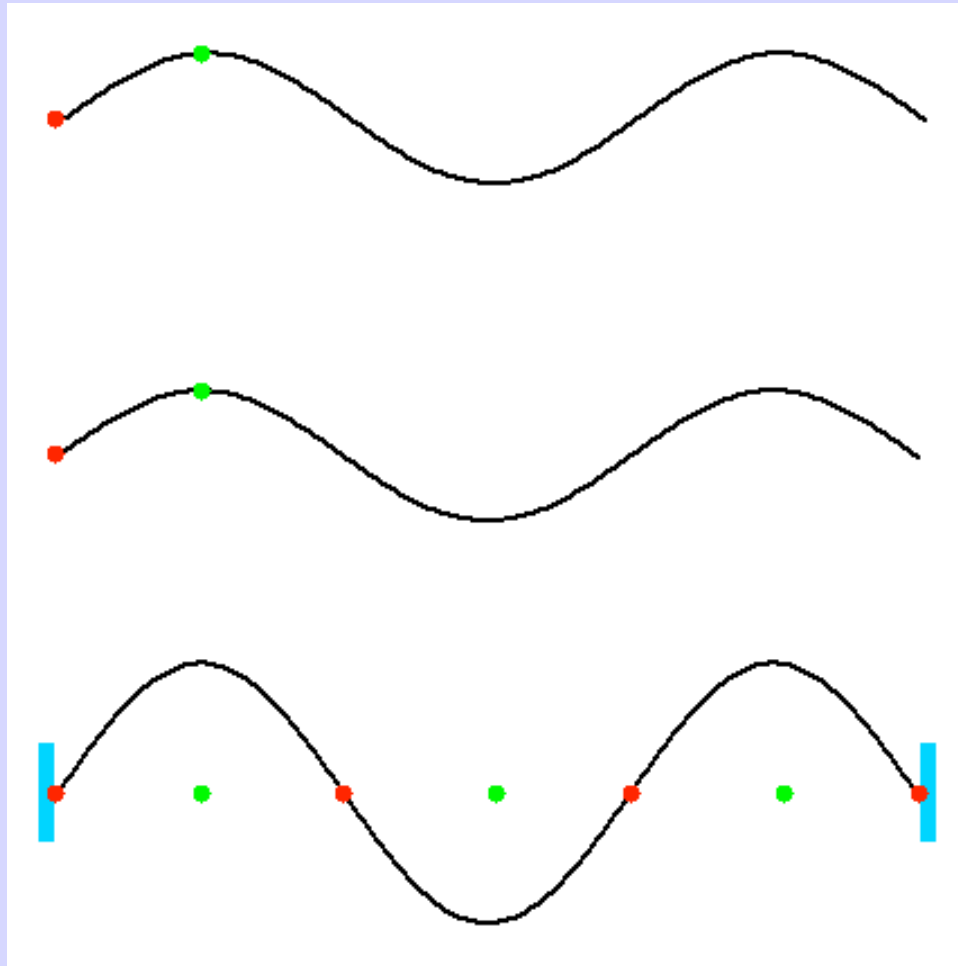


Onde Stazionarie

Le onde stazionarie sono un particolare fenomeno di interferenza, in cui la sovrapposizione avviene tra onde che viaggiano in senso opposto.

$$S_1 = A \sin(2\pi (t/T - x/\lambda))$$

$$S_2 = A \sin(2\pi (t/T + x/\lambda))$$



$$S = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \sin(2\pi t/T)$$

In qualunque istante ci sono dei punti che non oscillano - detti NODI - e dei punti che oscillano con ampiezza massima - detti VENTRI.

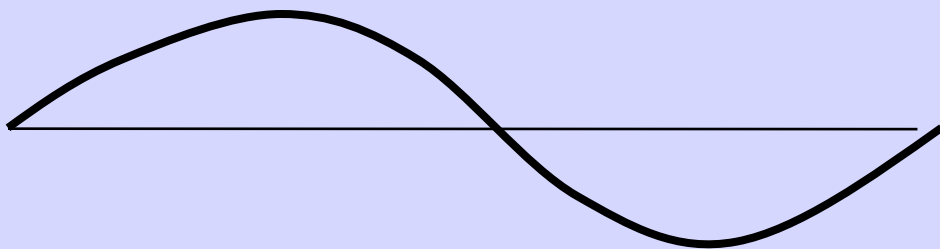
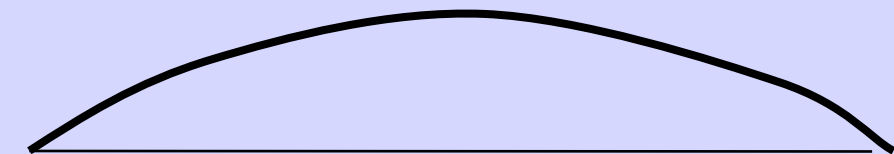
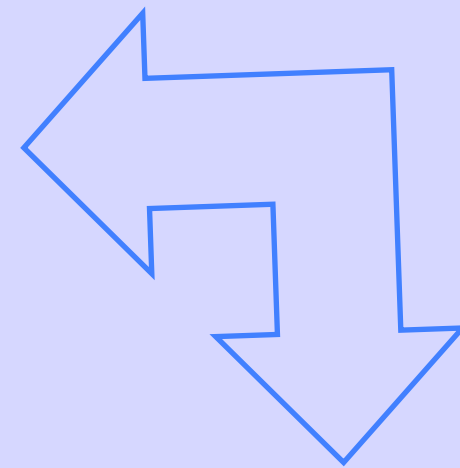
Onde stazionarie si possono generare in una corda che venga fatta vibrare ad una estremità e fissata all'altra.

Condizione perché avvenga è che la lunghezza della corda L sia

$$L = (k+1)\lambda/4 \quad k = 0, 1, 2, 3..$$

se la corda è fissata ai due estremi

$$L = k \lambda/2 \quad k = 0, 1, 2, 3..$$



Quando queste condizioni sono soddisfatte si formano onde stazionarie persistenti e il sistema è in **RISONANZA**

L'organo che ci consente di percepire i suoni è costituito da alcune sotto-strutture:

orecchio esterno:

- ***padiglione auricolare***,
che consente di intercettare i suoni
provenienti da diverse direzioni e
convogliarli nel meato,

- ***meato acustico***, in cui si formano delle
onde stazionarie persistenti che pongono
in oscillazione la membrana timpanica



- **l'orecchio medio**, costituito dagli *ossicini*, che trasmette e amplifica la pressione sonora alla finestra ovale tramite un sistema di leva meccanica e
- **l'orecchio interno**, costituito da un canale spiraliforme (*coclea*) rivestito dalla membrana basilare. Sulla membrana è disposto l'*organo del Corti*, i cui recettori (cellule ciliate) trasducono il segnale sonoro e lo trasmettono al nervo acustico.

La struttura anatomica determina il funzionamento dell'orecchio, quindi l'ampiezza della pressione sonora e la sensibilità.

In particolare, la minima intensità sonora apprezzabile dall'orecchio umano è di 10^{-12} W/m^2 , mentre intensità di circa 1 W/m^2 sono percepite come dolorose. C'è dunque un intervallo di ben 12 ordini di grandezza!!!

Caratteristiche del suono

onda sonora: vibrazione meccanica percepibile dal senso dell'udito (orecchio)

sensibilità orecchio umano

$$20 \text{ Hz} < f < 2 \cdot 10^4 \text{ Hz}$$

infrasuoni

ultrasuoni

$$\lambda = v \cdot T$$

$$f = v \cdot T$$

$$v_{\text{aria}} = 344 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{acqua}} = 1450 \text{ m/s}$$

$$17.2 \text{ m} < \lambda < 1.72 \text{ cm}$$

$$72.5 \text{ m} < \lambda < 7.25 \text{ cm}$$

**Caratteristiche
di un suono:**



altezza

timbro

intensità

→ frequenza

→ composizione armonica

→ $E/(S \cdot t)$

Onde

Esempio:

l'orecchio umano è capace di percepire suoni con frequenze nell'intervallo di circa 20 Hz e 20000 Hz. Essendo la velocità del suono nell'aria pari a circa 340 m/s si ottiene:

$$20 \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{340 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 17 \text{ m}$$

$$20000 \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{340 \text{ m/s}}{20000 \text{ Hz}} = 1.7 \text{ cm}$$

Esempio:

per sapere a che distanza è caduto un fulmine è sufficiente misurare il tempo intercorso tra il lampo e il tuono. Supponendo una velocità del suono in aria pari sempre a 340 m/s si ottiene:

$$\text{distanza} = v \cdot t = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 4 \text{ s} = 1360 \text{ m}$$

Intensità = energia trasportata nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie

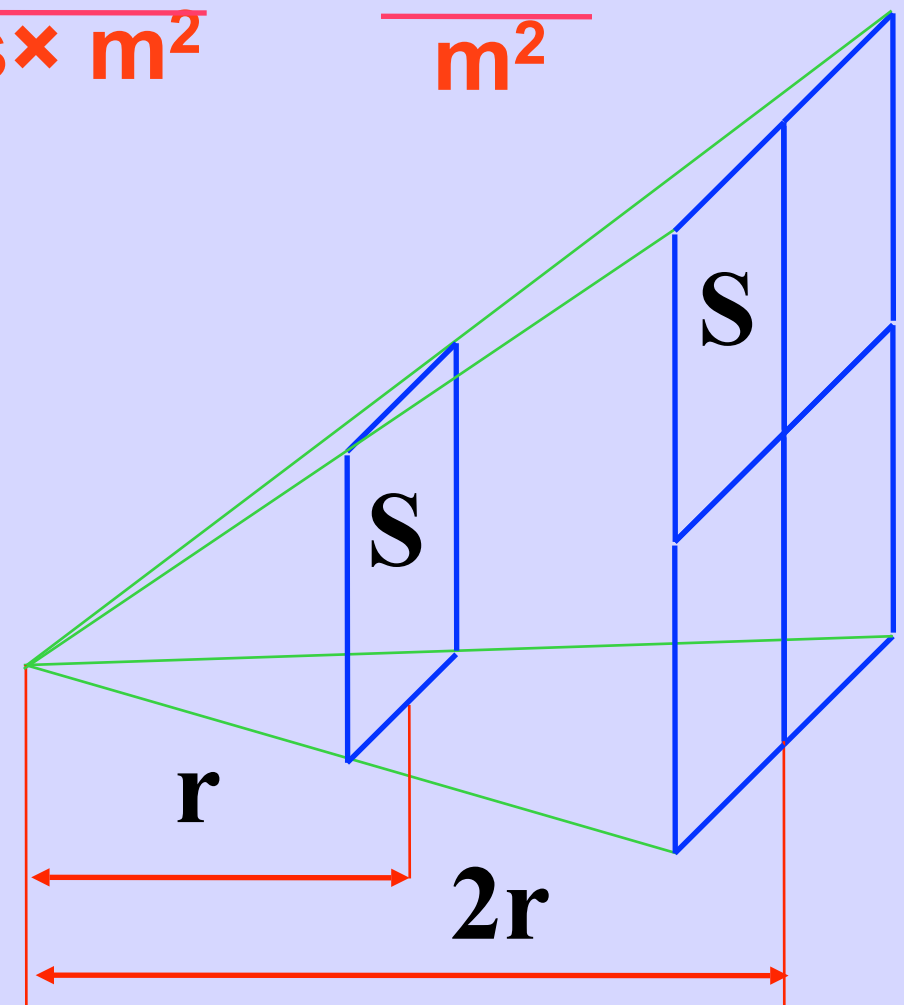
$$I = \frac{E}{\Delta t \times S} \quad \text{unità di misura: } \frac{\text{joule}}{\text{s} \times \text{m}^2} = \frac{\text{watt}}{\text{m}^2}$$

onda sferica: $S = 4\pi r^2$

L'energia é costante (cons.energia)



**L'intensità diminuisce
con il quadrato della distanza**



L'onda sarà pertanto caratterizzata dalla sua
velocità di propagazione v che in generale dipenderà dal
mezzo in cui si propaga

Es.: in aria la velocità è relativamente bassa
(340 m/s), ma diventa più elevata in un liquido (1500 m/s)
o in un metallo (5000 m/s);
e dall'intensità I , che è legata all'energia trasportata dall'onda.

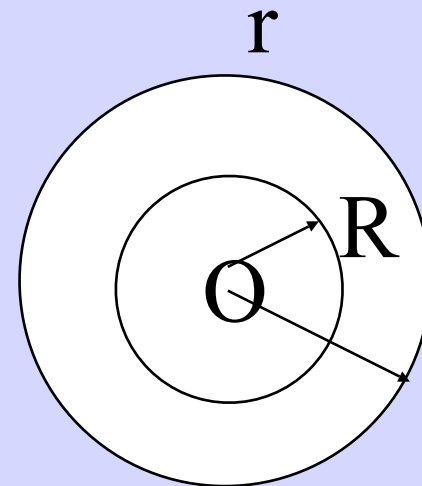
In particolare si definisce:

$I = E/St$ = energia che attraversa la superficie S nel tempo t
(e si misura in W/m^2)

Ovviamente, data una sorgente sonora in O, anche se l'energia E dell'onda si mantiene costante, l'intensità si riduce con il quadrato della distanza:

$$I(R) 4 \pi R^2 t = I(r) 4 \pi r^2 t$$

$$I(R) / I(r) = (r / R)^2$$



Un altoparlante fornisce una potenza acustica di 1 W. A che distanza l'intensità sonora è scesa a 0.05 W/m², se assumiamo che tutta la potenza venga emessa isotropicamente su mezza sfera?

Poiché $I = P / 2 \pi r^2$ si ottiene:

$$r = \sqrt{1 / (2 \pi \cdot 0.05)} = 1.78 \text{ m}$$

Tuttavia, in questo intervallo di intensità, **la percezione del suono non è lineare** : in accordo con la legge di Weber-Fechner **la sensazione sonora s è legata al logaritmo dell'intensità I attraverso la relazione:**

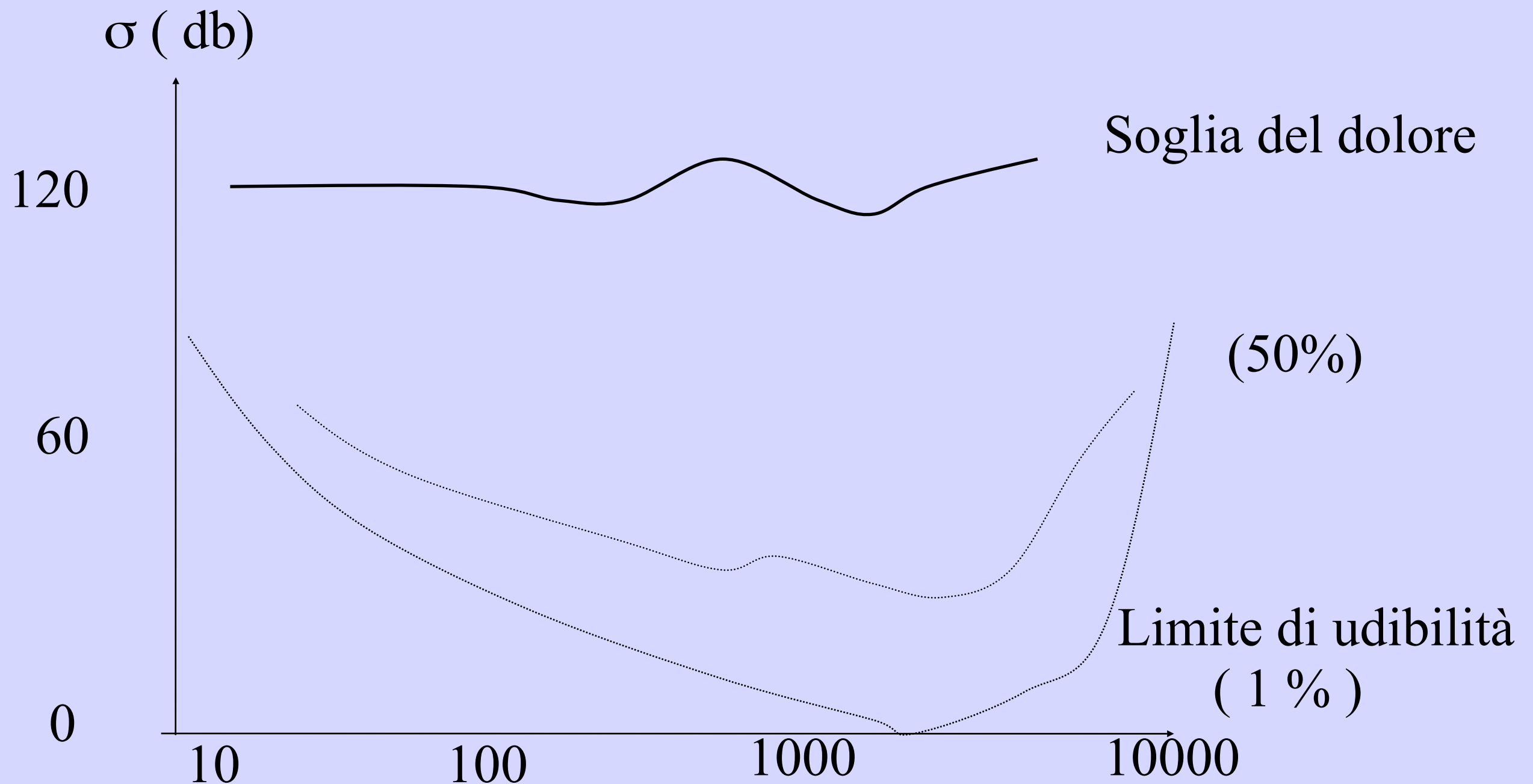
$$\sigma = \sigma_0 + 10 \log \frac{I}{I_0}$$

(N.B.: σ_0 e $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ sono la sensazione sonora e l'intensità di soglia)

L'unità di misura è il **decibel (db)**.

Il nostro orecchio è dunque in grado si percepire (senza danni) suoni per cui σ varia tra 0 e 120 db

E' però importante osservare che l'intervallo di sensazioni sonore percepibili non è lo stesso per i suoni di tutte le frequenze: il nostro orecchio ha una **curva di sensibilità**, il cui massimo corrisponde a circa 3000-5000 Hz.



Esempio

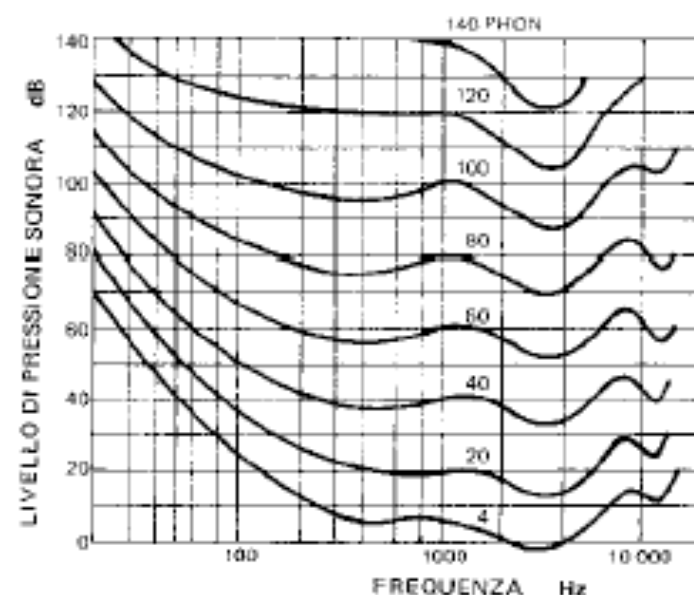
Un altoparlante produce una sensazione sonora di 40 db alla distanza di 10 m. Quanto vale l'intensità in quel punto? Se si affianca un secondo altoparlante uguale al primo, quanto vale la sensazione sonora risultante?

$$\sigma = \sigma_0 + 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$$40 = 10 \log (I / 10^{-12}) \text{ ----> } I = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

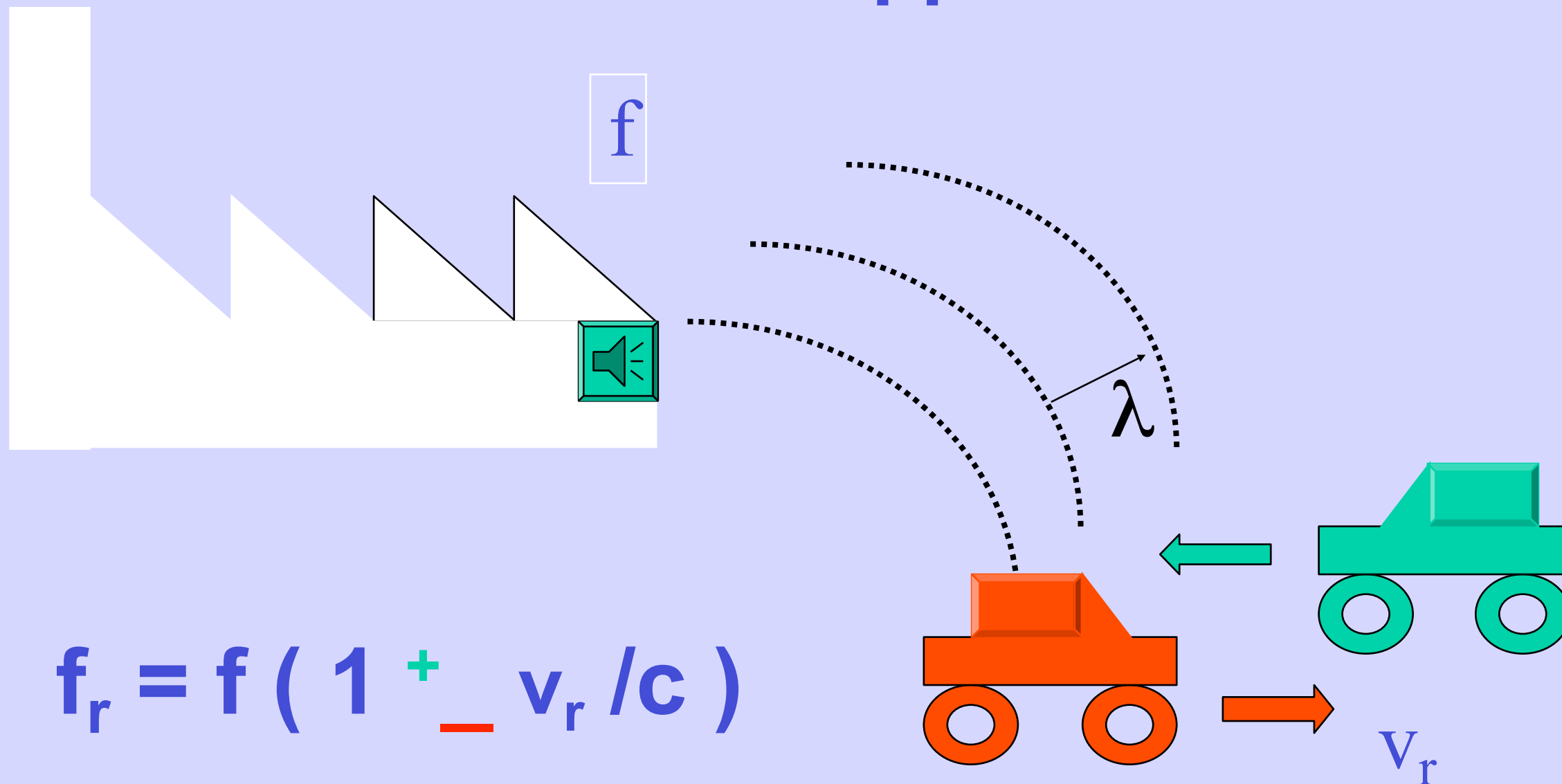
Con 2 altoparlanti, $I = 2 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$ dunque

$$s = 40 + 10 \log 2 = 43 \text{ db}$$

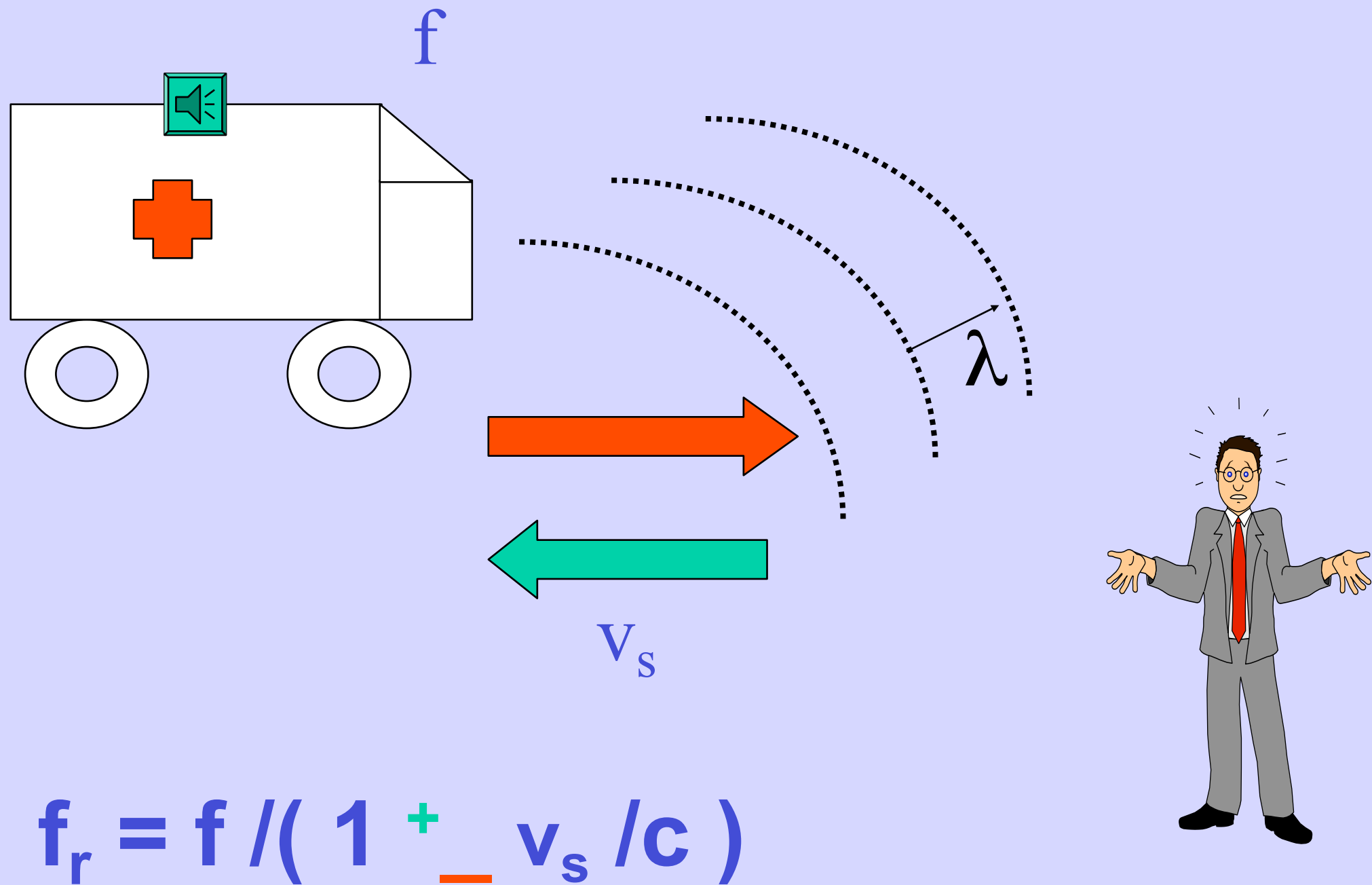


Gamma di rumore	Livello di pressione sonora dBA	Caratteristica della fascia di livelli di pressione sonora
α	0-35	Rumore che non arreca fastidio né danno
β	36-65	Rumore fastidioso e molesto, che può disturbare il sonno e il riposo
χ	66-85	Rumore che disturba ed affatica, capace di provocare danno psichico e neurovegetativo ed in alcuni casi danno uditivo
δ	86-115	Rumore che produce danno psichico e neurovegetativo, che determina effetti specifici a livello auricolare e che può indurre malattia psicosomatica
ε	116-130	Rumore pericoloso: prevalgono gli effetti specifici su quelli psichici e neurovegetativi
ζ	131-150 e oltre	Rumore molto pericoloso: impossibile da sopportare senza adeguata protezione; insorgenza immediata o comunque molto rapida del danno

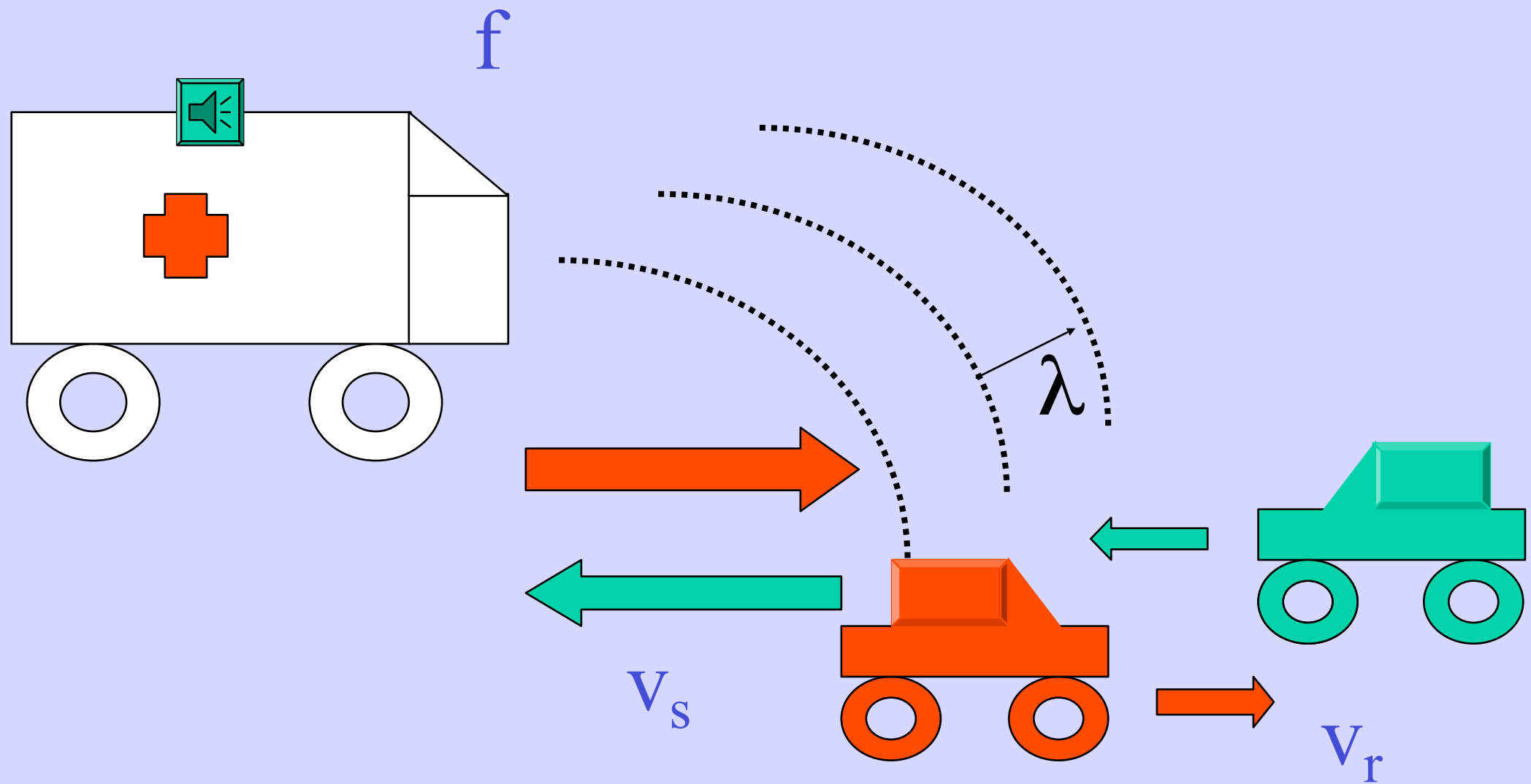
Effetto Doppler



Effetto Doppler



Effetto Doppler



$$f_r = f \left(1 + \frac{v_r}{c} \right) / \left(1 + \frac{v_s}{c} \right)$$

Es. Un'auto della polizia con una sirena a 1000Hz si muove a 90 Km/h. Calcolare la frequenza del suono quando:

- la macchina si avvicina all'ascoltatore fermo
- si allontana dall'ascoltatore fermo

$$f_r = f / (1 - v_s / c)$$

$$F_r = 1000 / (1 - 25 / 344) = 1078.4 \text{ Hz}$$

$$f_r = f / (1 + v_s / c)$$

$$F_r = 1000 / (1 + 25 / 344) = 932.2 \text{ Hz}$$

Effetto eco

L'eco è un fenomeno dovuto alla riflessione del suono: esso si ha quando le onde acustiche, originate da una sorgente, raggiungono un ostacolo e da questo vengono nuovamente riflesse verso la sorgente.

La durata T che intercorre tra l'istante di emissione dell'ultrasuono e l'istante di ricezione dell'eco è legata al percorso di andata e ritorno dell'onda sonora e sarà data da:

$$T = \frac{2D}{V}$$

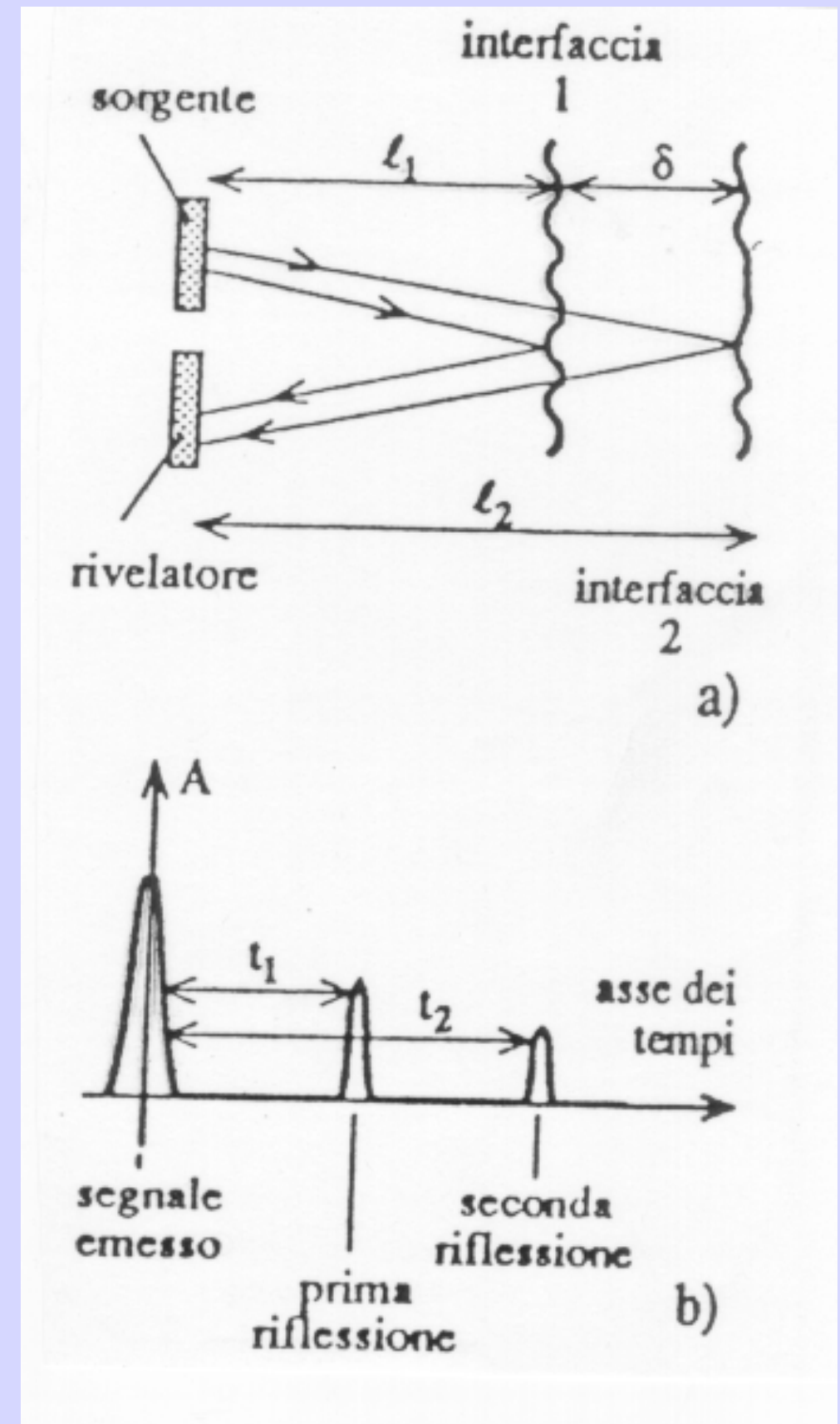
dove:

V = velocità dell'ultrasuono.

D = distanza fra sorgente ed ostacolo.

Ogni interfaccia produce un'eco per riflessione. Il tempo di ricezione permette di localizzare l'interfaccia, ossia di stimare la sua distanza dalla sonda.

DAL TEMPO DI ARRIVO DELL'ECO SI RISALE ALLA DISTANZA DELLA STRUTTURA RIFLETTENTE.



Un altro importante parametro, anch'esso dipendente dal mezzo, è **l'impedenza acustica (Z)** espressa dalla relazione:

$$Z = \rho C$$

Essa rappresenta il prodotto della densità del mezzo per la velocità di propagazione del suono nel mezzo stesso, ed è indipendente dalla frequenza utilizzata.

Consideriamo ora due mezzi, 1 e 2, con densità differente, cioè che abbiano una impedenza acustica diversa.

Al passaggio del confine fra i due mezzi considerati si può avere il fenomeno della **riflessione** ed il fenomeno della **rifrazione**.

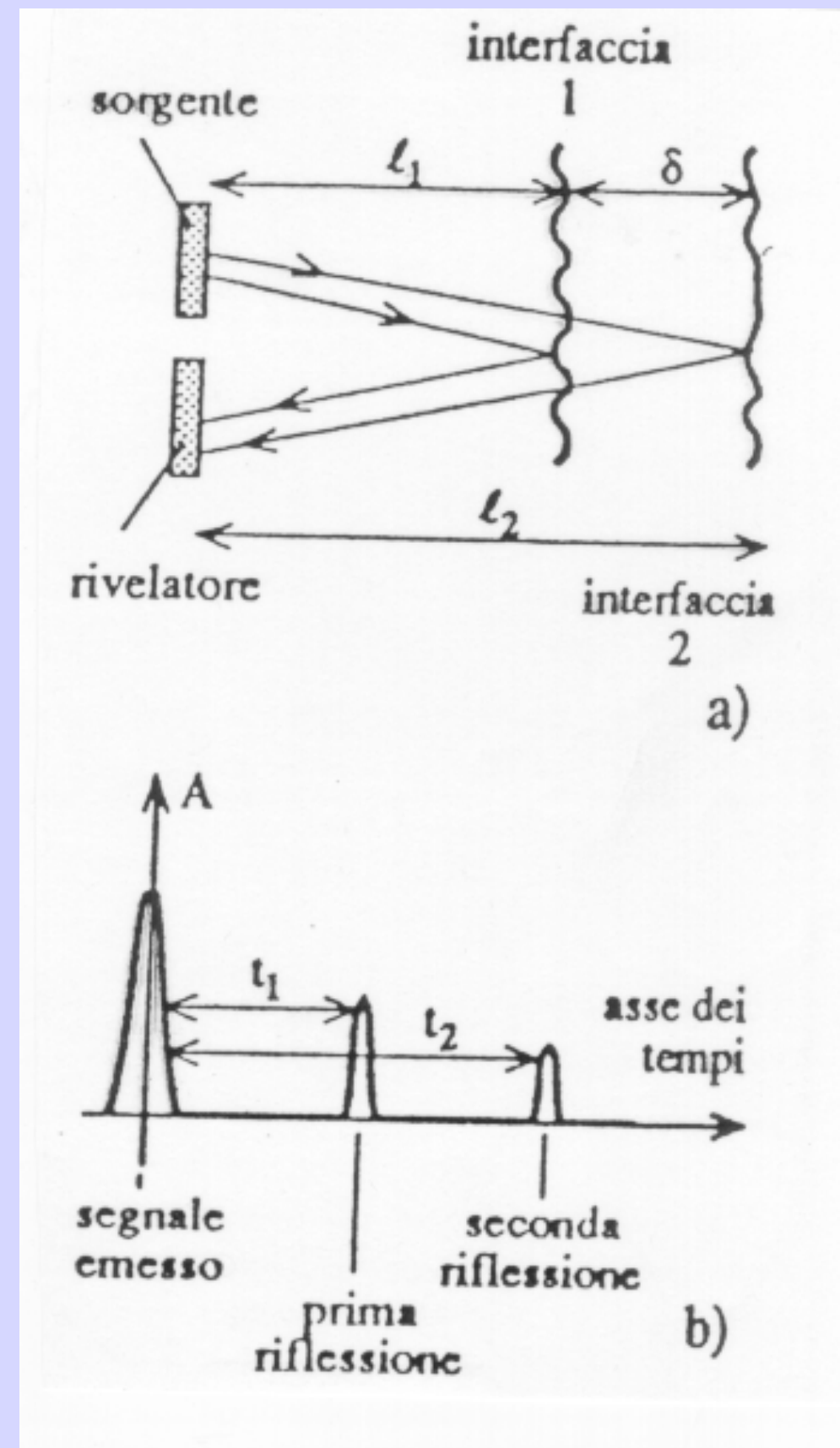
Naturalmente occorre conoscere la velocità di propagazione dell'US nei tessuti. Essa normalmente viene supposta uniforme, ma

NON E' VERO:

- nei tessuti molli varia da 1200 a 1800 m/s,
- nei tessuti più duri (es. osso) può raggiungere i 4000 m/s

Ne deriva che, assumendo una velocità media costante, laddove c'è discrepanza con il valore vero si avrà una DISTORSIONE SPAZIO-VARIANTE dell'immagine.

L'intensità dell'eco naturalmente si riduce al crescere della distanza a causa dell'attenuazione



In realtà è possibile ottenere informazioni da oggetti in movimento anche studiando la frequenza del segnale riflesso, o meglio 'scatterato'. In questo caso si sfrutta l'**'effetto Doppler'**:

$f > 20000 \text{ Hz}$ - ULTRASUONI - ECO-DOPPLER

Nelle metodiche di imaging ecografiche viene utilizzata una particolare onda acustica ad elevatissima frequenza, **non percepibile dall'orecchio umano**, definita ultrasuono. In medicina esso costituisce uno strumento affidabile e soprattutto non invasivo per la visualizzazione degli organi, dei tessuti interni, dei vasi e per la conoscenza della dinamica dei flussi.

Ampiezza ed intensità sono funzioni decrescenti della profondità alla quale il fascio ultrasonoro giunge. La loro diminuzione viene definita **attenuazione**.

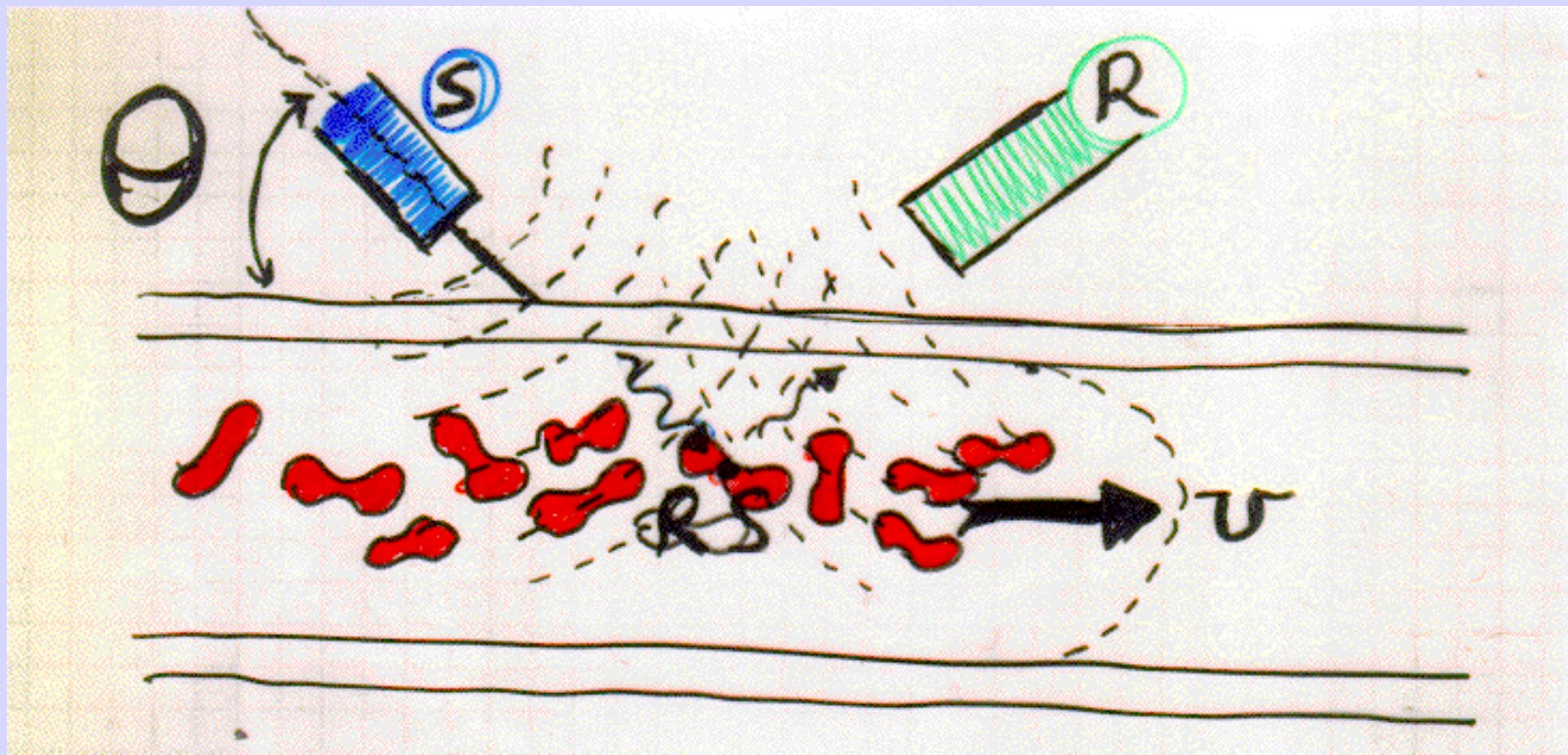
La velocità di propagazione è la velocità con la quale l'onda sonora attraversa un particolare mezzo.

Essa dipende quindi dal mezzo e viene determinata dalla **densità e dalla rigidità del mezzo** stesso: aumenta all'aumentare della rigidità e si riduce al diminuire della densità.

Dunque la velocità di propagazione è elevata nei liquidi ed ancor più nei solidi, mentre è bassa nei gas. **Normalmente nei tessuti la velocità viene considerata approssimativamente 1540 m/sec.**

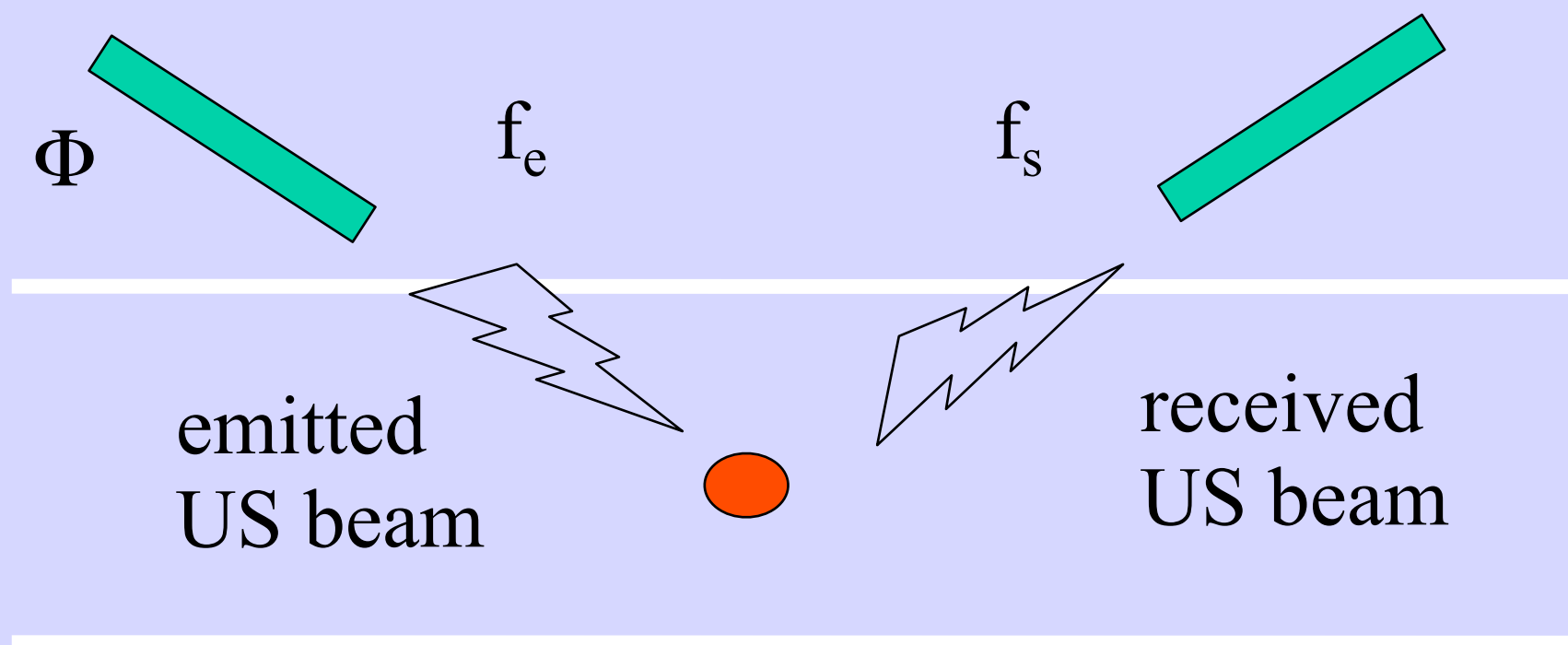
Se consideriamo un vaso sanguigno, al cui interno si trovano, immersi nel plasma, anche corpuscoli (globuli bianchi, piastrine, ma soprattutto globuli rossi), e inviamo un fascio di US che intercetta un globulo rosso, questi:

- verranno ricevuti **dal globulo in moto con velocità v** (che riceve US a **frequenza f_r**);
- **e verranno scatterati verso il ricevitore (che riceverà US di frequenza f_s** inviati da una sorgente in moto con velocità v)



S ferma, R' in moto: $f_r = f (1 - v \cos \theta / c) = f_s$

S=R' in moto, R fermo: $f_r = f_s \frac{1}{(1 + v \cos \theta / c)}$



Se sostituiamo e semplifichiamo:

$$\Delta f = f - f_r = 2v \cos\theta f / (c + v \cos\theta)$$

ma poiché

$$v \cos\theta \ll c$$

useremo la relazione approssimata:

$$\Delta f = 2 v f \cos\theta / c$$

Attraverso la misura del Doppler shift Δf

(conoscendo la frequenza della sonda f ,
la velocità di propagazione dell'US c , l'angolo di
insonazione θ)

posso risalire alla velocità v con cui si
muove il globulo rosso!