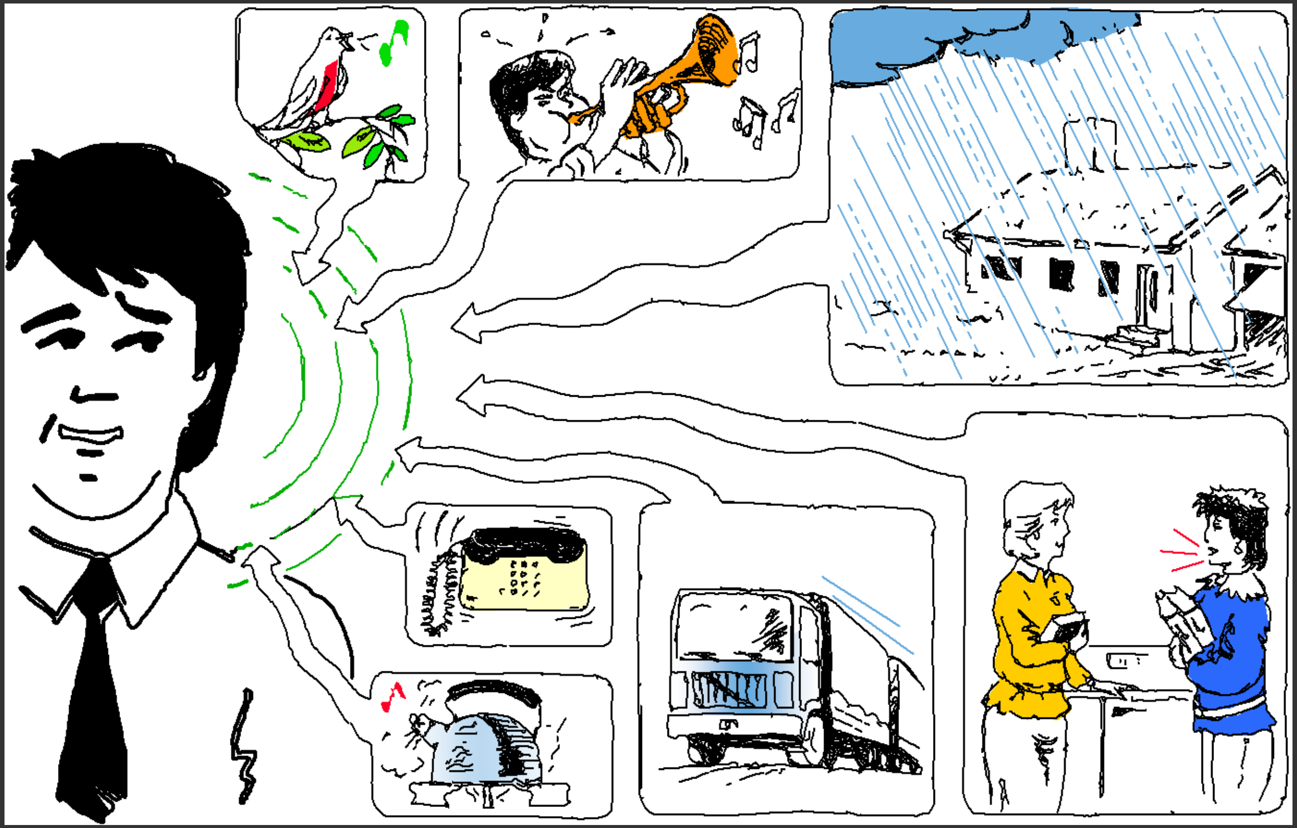
1

Lezioni di acustica

il suono

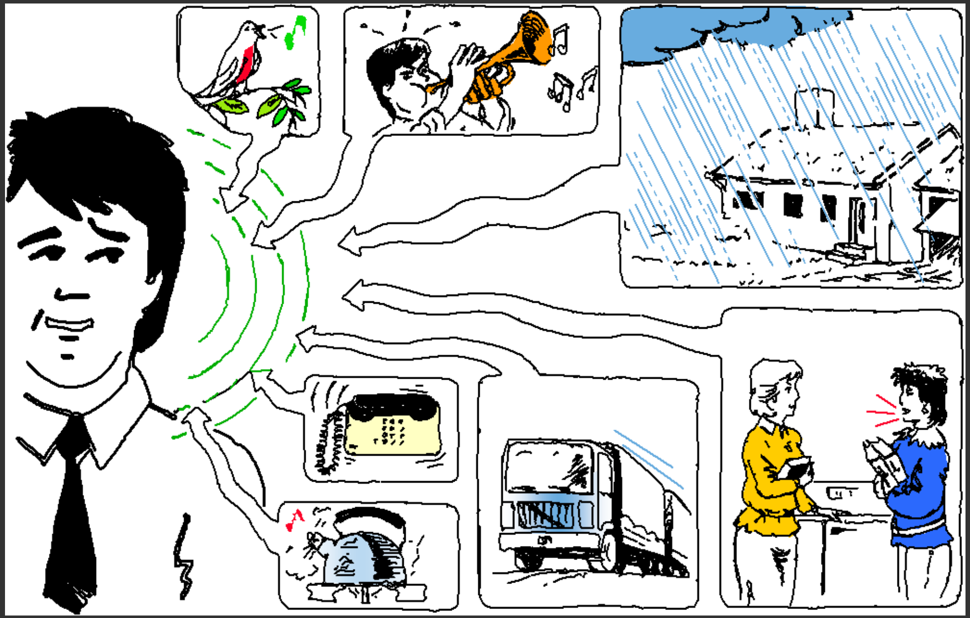
Cos’è il suono?



Una perturbazione di carattere oscillatorio che si propaga in un mezzo elastico

Alla propagazione corrisponde una propagazione di energia ma non una propagazione di materia!

Elementi fondamentali del fenomeno sonoro sono:



Sorgente

(generatore di perturbazione, di vibrazioni)

⇒

Mezzo elastico

(Solido o fluido attraversato dalla perturbazione ma non da essa modificato)

⇒

Ricevitore

(Qualcosa "sensibile" alla perturbazione)

Sorgente: *generatore di perturbazione, di vibrazioni*

1. **Corpi solidi oscillanti: strumenti a corda**
2. **Colonne d'aria oscillanti: strumenti a fiato, organi**
3. **Corpi in rapido movimento: eliche, fruste**
4. **Gas in rapida uscita da contenitori: razzi, reattori**
5. **Rapidi incrementi di pressione: esplosioni, detonazioni**
6. **Voce umana: meccanismo 1+2**

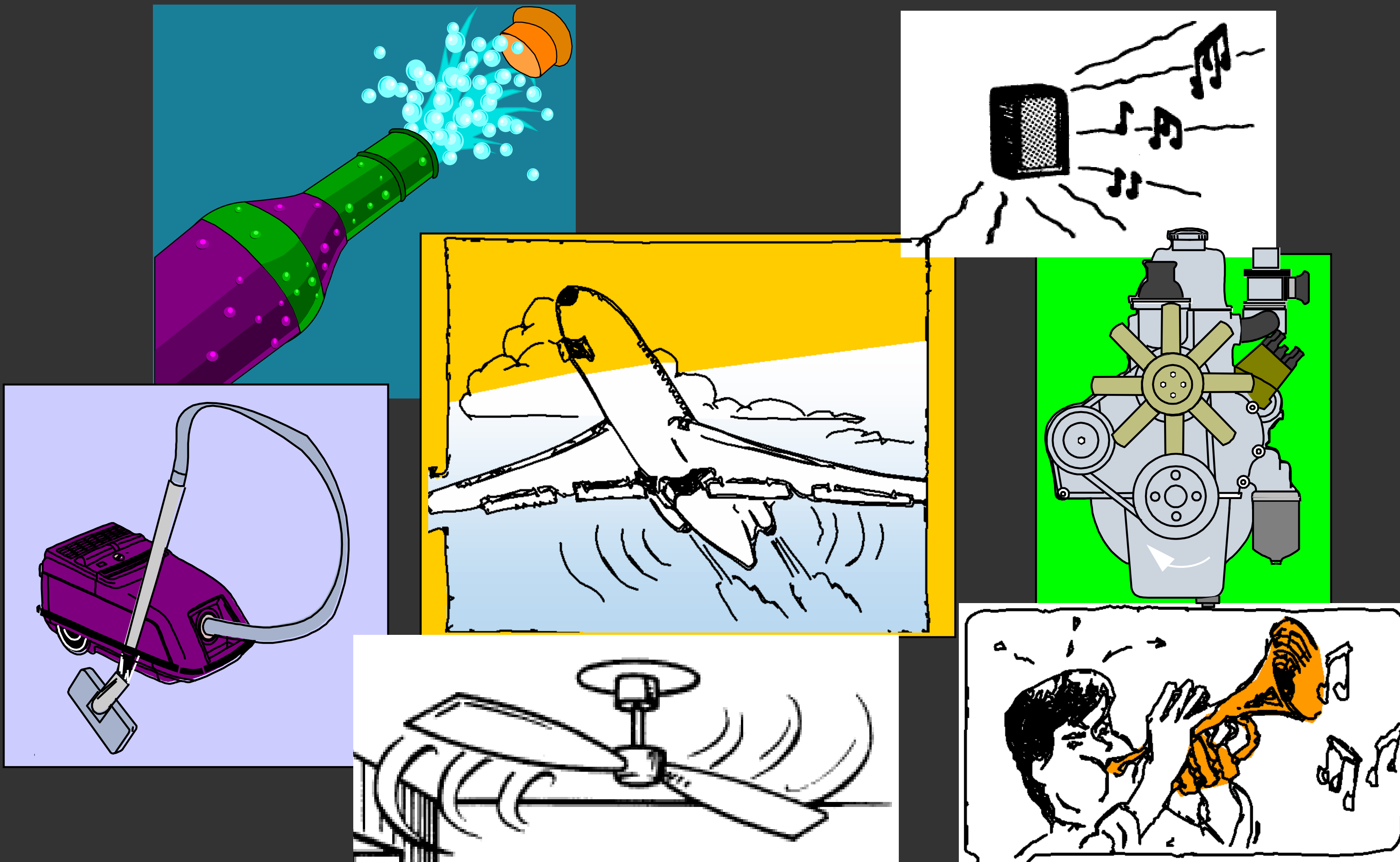
Mezzo elastico: *solido o fluido attraversato dalla perturbazione ma non da essa modificato*

- **Il mezzo di maggior interesse pratico è l'aria**
- **altri mezzi possono essere: la crosta terrestre, una parete, etc..**
- **il suono non si propaga nel vuoto**

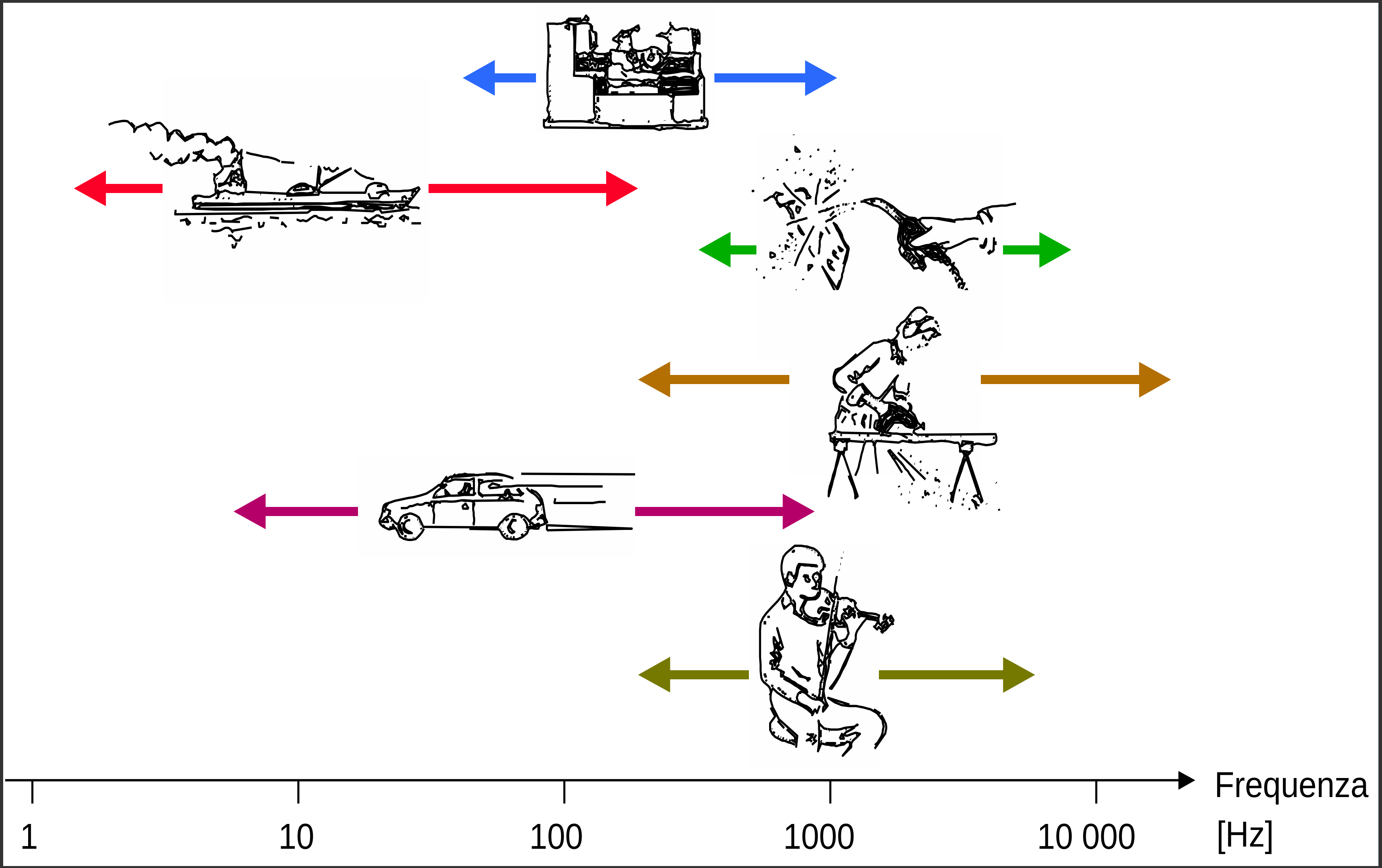
Ricevitore: *qualcosa "sensibile" alla perturbazione*

- **un microfono**
- **una membrana**
- **l'orecchio umano**

Sorgente: *generatore di perturbazione, di vibrazioni*

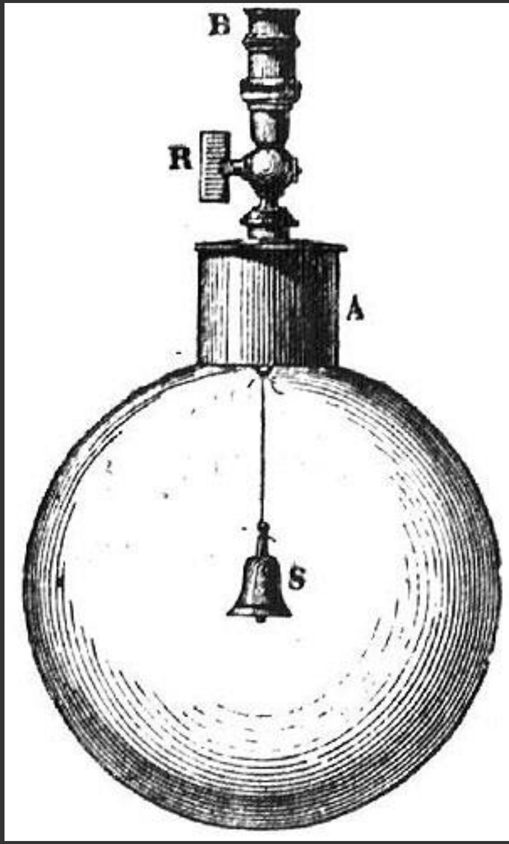


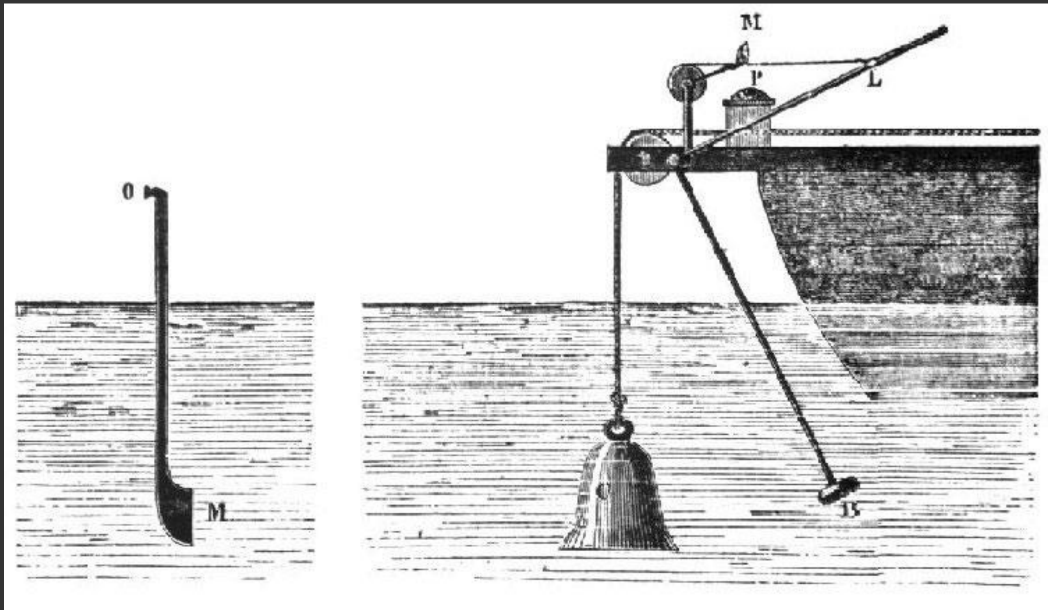
Sorgente: *generatore di perturbazione, di vibrazioni*



Mezzo elastico: *solido o fluido attraversato dalla perturbazione ma non modificato da essa*

Gli esperimenti di Kircher e von Guericke





La misura della velocità del suono di Collodon in acqua.

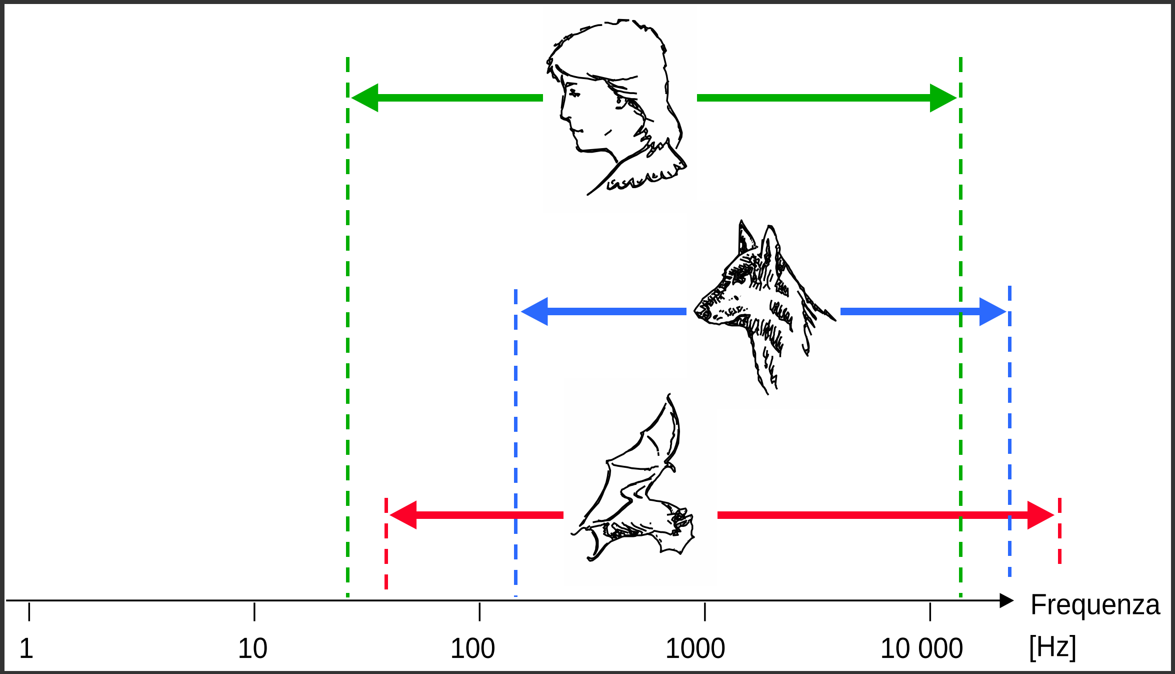
Ricevitore: *qualcosa "sensibile" alla perturbazione*

Il ricevitore fondamentale è l'orecchio umano sensibile solo a perturbazioni caratterizzate da frequenze comprese tra:

20 Hz < **suono udibile** < **20 kHz**

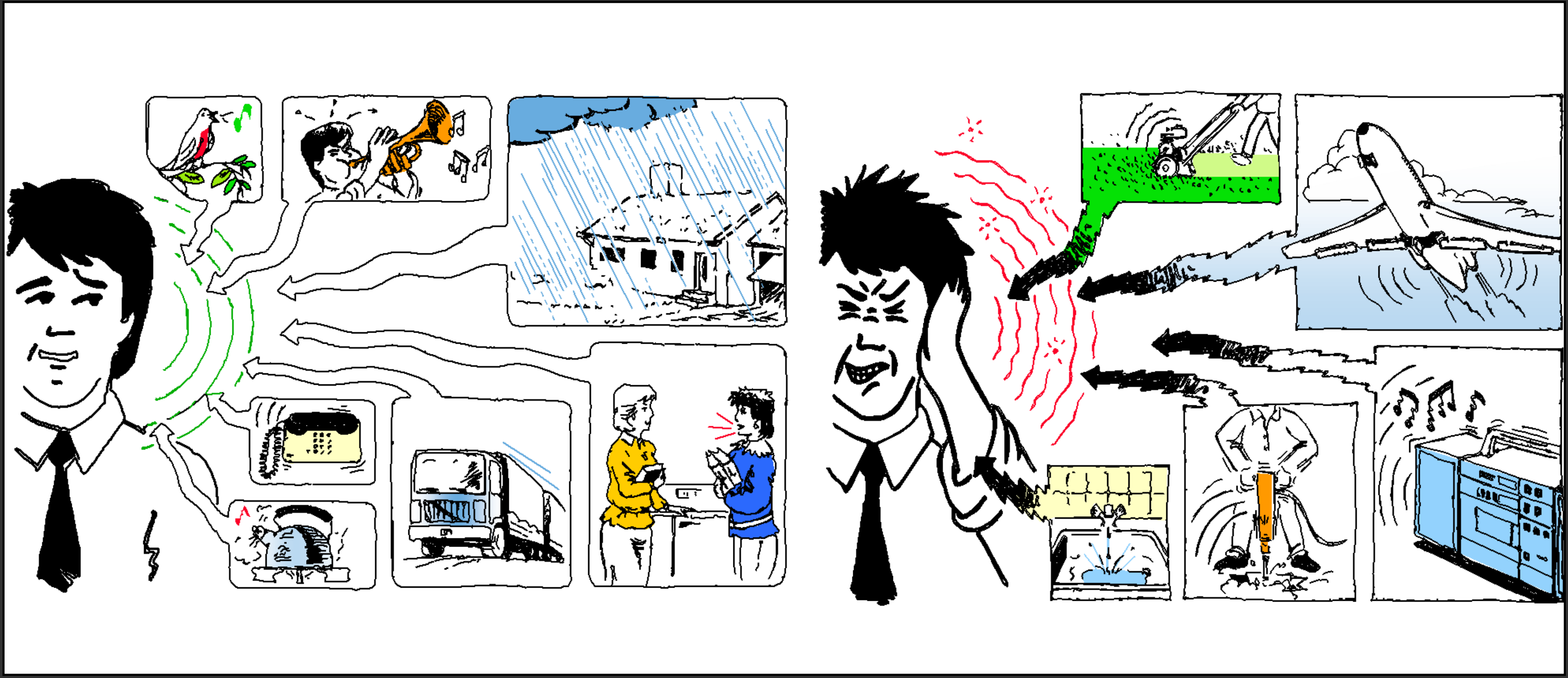
infrasuoni — *ultrasuoni*

800 Hz < **parlato** < **5 kHz**



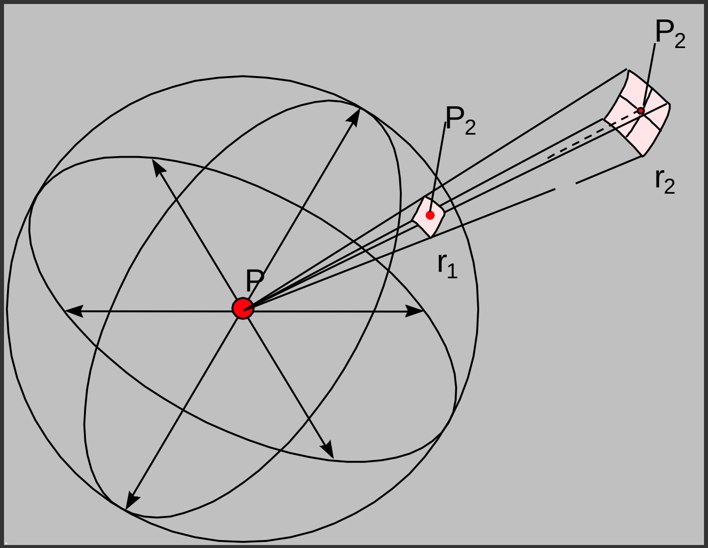
Suono o rumore?

La stessa manifestazione fisica provoca sensazioni diverse in relazione allo stato psico-fisico-emozionale del recettore; in base, quindi, alla risposta soggettiva del recettore sarà descritta come **SUONO** o come **RUMORE**.



La propagazione del suono

Se in un punto di un mezzo elastico omogeneo e isotropo si determina una variazione di pressione questa si propaga in tutte le direzioni dando origine a onde sferiche con centro nella sorgente di perturbazione.



La regione dello spazio in cui si verifica la propagazione di onde sonore viene detta campo sonoro.

La propagazione nello spazio: l'equazione delle onde

E' importante conoscere al variare del tempo nei diversi punti dello spazio il valore della perturbazione.

Dai bilanci di massa, di energia e di quantità di moto in un elemento infinitesimo di volume *dx·dy·dz* del mezzo in cui si propaga l'onda è possibile ricavare per la pressione, la densità e la velocità delle particelle le seguenti equazioni differenziali, dette di Laplace:

$$\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} = \frac{1}{c_2} \frac{\partial \Delta p}{\partial t^2}$$

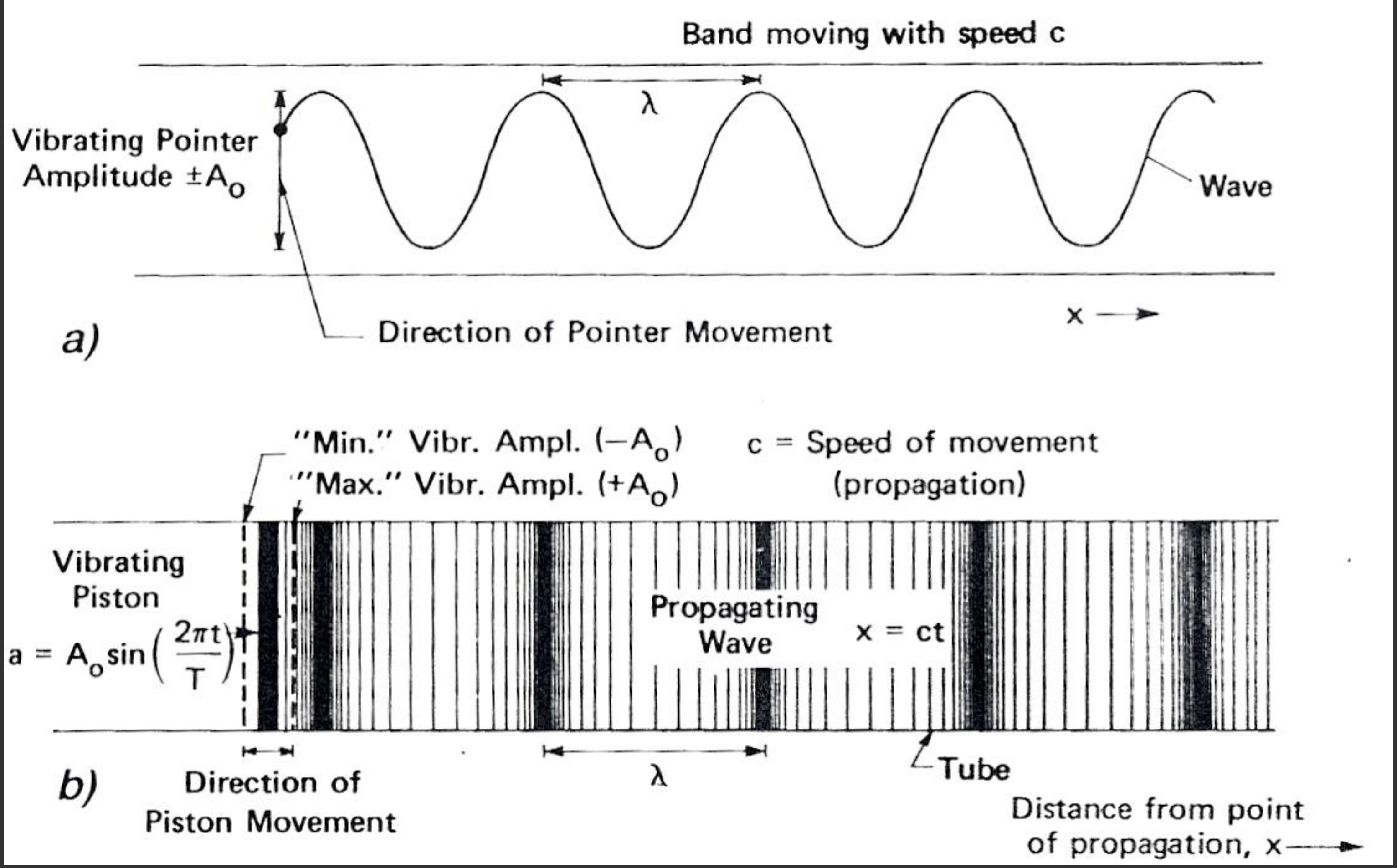
$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c_2} \frac{\partial v_x}{\partial t^2}$$

(così anche per le altre componenti della velocità)

$$\frac{\partial^2 \Delta \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta \rho}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta \rho}{\partial z^2} = \frac{1}{c_2} \frac{\partial \Delta \rho}{\partial t^2}$$

La propagazione del suono: onde piane

In alcuni casi si possono formare onde piane ossia onde il cui fronte di propagazione corrisponde ad una superficie piana. Le onde sferiche sufficientemente lontano dalla sorgente sono approssimate ad onde piane.



Considerando la trasformazione termodinamica che avviene nel mezzo durante la perturbazione (di solito una adiabatica) nel caso di onde piane la soluzione delle equazioni di Laplace porge:

$$v(t) = v_{\max} sen(\omega t - \frac{\omega}{c} x)$$

$$\Delta p(t, x) = \Delta p_{\max} sen(\omega t - \frac{\omega}{c} x)$$

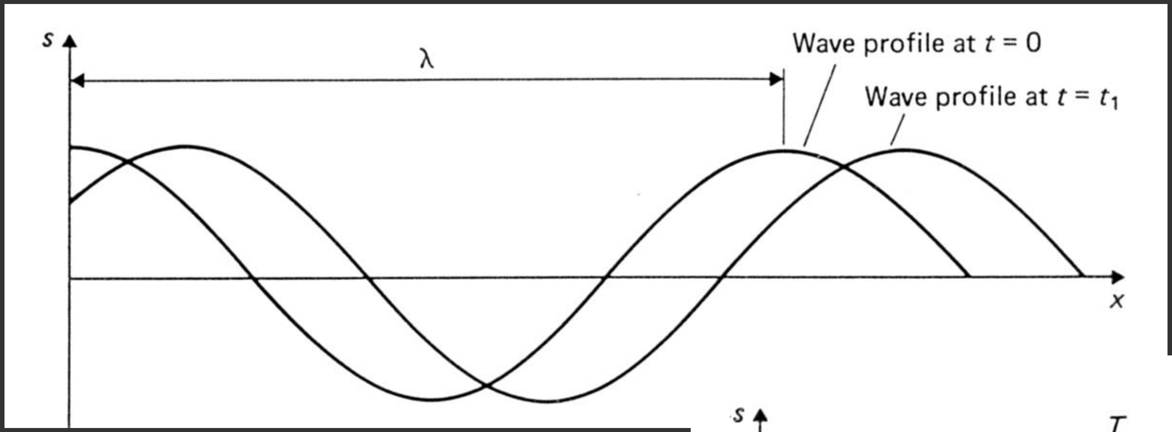
con: $\Delta p_{max} = \omega\, \rho_0\, c\, A$ $\qquad$ $\Delta p = \rho_0 \cdot c \cdot v$

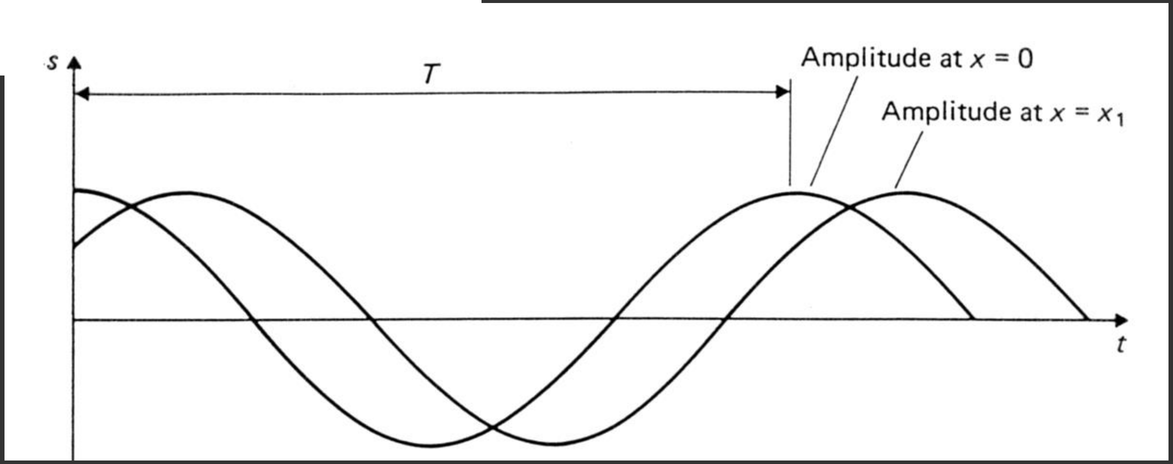
La seconda relazione è detta ***legge di Ohm acustica*** e il prodotto $\rho_0 c$ viene indicato come **resistenza (o impedenza) acustica** del mezzo - per l’aria in condizioni normali vale 412 kg/(m^{2}s)

Variazione di pressione per un'onda sinusoidale piana

$$\Delta p(t,x) = \Delta p_{max}\ \mathrm{sen}(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda})$$

$$\Delta p(t,x) = \Delta p_{max}\ \mathrm{sen}(\omega t - \frac{\omega}{c} x)$$





Valori efficaci

E’ utile caratterizzare l’onda di pressione con valori sintetici che diano un idea dell’effetto acustico.

Un’idea potrebbe essere quella di considerare i valori medi, ma una funzione periodica presenta valori medi nulli, mentre il sistema uditivo manifesta una sensazione sonora.

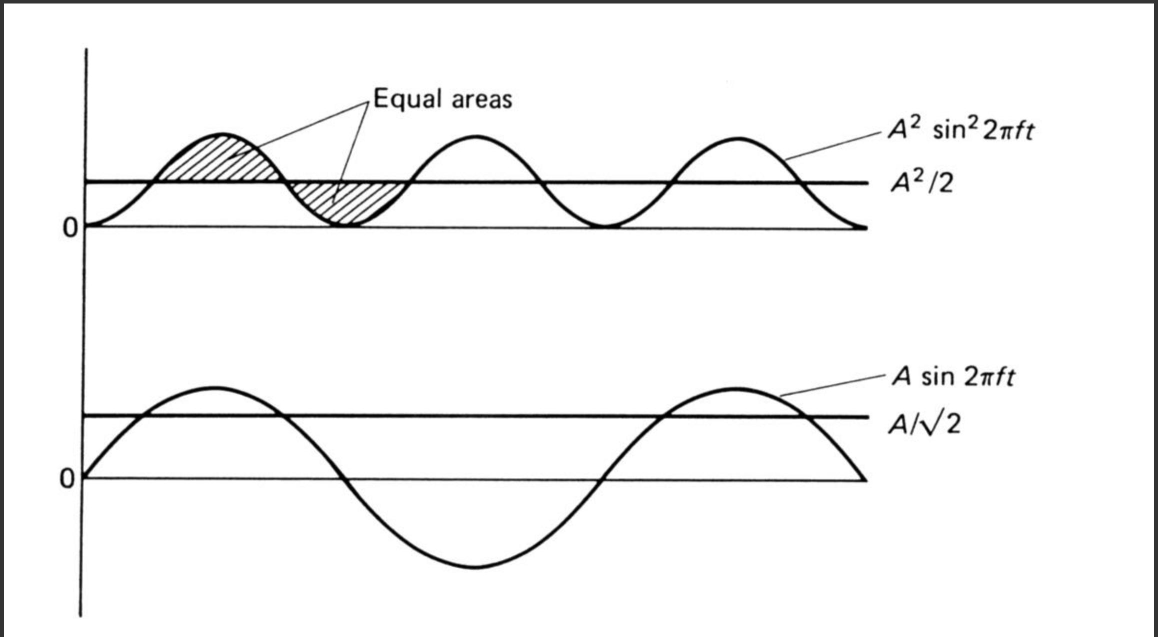
D’altra parte utilizzare i valori massimi/minimi significa descrivere solo l’ampiezza in un dato istante.

Il sistema uditivo manifesta una sensazione sonora dipendente dal contenuto energetico dell’onda è quindi necessario ricavare valori rappresentativi del contenuto energetico. Questo si fa considerando i cosidetti “*valori efficaci*”.

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [x(t)]^2 dt}$$

Per caratterizzare la perturbazione variabile di pressione legata alla propagazione dell'onda si ricorre al *valore efficace della pressione, p_{eff}*:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [p(t)]^2 dt}$$



per un'onda sinusoidale

$$p_{eff} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}$$

Velocità del suono

La velocità dell'onda acustica dipende essenzialmente dalla densità e dalla deformabilità (modulo di Young) del mezzo.

Gas

$$c = \sqrt{\frac{p_o \cdot k}{\rho}}$$

c: velocità del suono [m / s]

p_o: pressione atmosferica

k: c_p / c_v

ρ: densità del mezzo

Ammettendo comportamento ideale:

$$pV = mRT$$

da cui:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R_o T}{M}$$

Risulta allora:

$$c = \sqrt{\frac{kR_o T}{M}}$$

R_o : costante universale dei gas

m : massa

M : massa molare

T: temperatura termodinamica

Un esempio: l'aria

Nel caso dell'aria in condizioni atmosferiche standard, 0°C e 101325 Pa, la densità ρ è pari a 1.21 **[Kg / m³].**

Essendo **k** = 1.4 e M = 29 kg/kmole si ottiene una velocità del suono pari a:

$$c_o = \sqrt{\frac{1.4 \times 8314 \times 273.15}{29}} = 331{,}1\, m/s$$

A partire dalla velocità c_0 a 0°C si può ottenere la velocità ad altre temperature:

$$c = c_o \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \cong 331.4 + 0.6\, t$$

t = temperatura [°C]

Velocità del suono nei solidi

I Caso: Il solido è un *corpo continuo*, con sezione trasversale ampia rispetto alla sezione longitudinale.

$$c = \sqrt{\frac{Y(1-\eta)}{\rho(1+\eta)(1-2\eta)}} \qquad \left[m/s \right]$$

Y : modulo di Young [N / m^2], ρ: densità [Kg / m^3], η : rapporto di Poisson

II Caso: Il solido è una *barra*, cioè la sua sezione trasversale è piccola rispetto alla sezione longitudinale e alla lunghezza d'onda.

In questo caso si può trascurare l'effetto laterale rappresentato dal rapporto di Poisson, η:

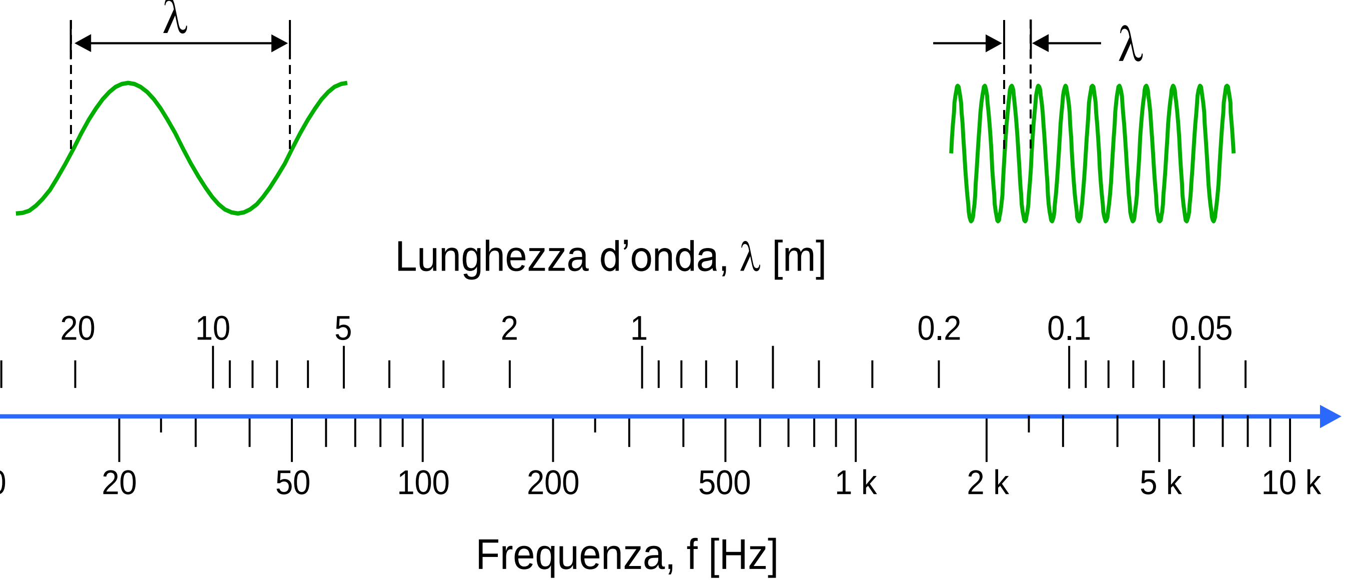
$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \qquad \left[m/s \right]$$

Velocità del suono nei materiali

materiale	velocità del suono m/s	rapporto rispetto all'aria
aria	344	1
piombo	1220	3.5
acqua	1410	4.1
metacrilato	1800	5.2
mattoni	3000	8.7
legno	3400	9.9
calcestruzzo	3400	9.9
vetro	5200	15.1
alluminio	5200	15.1
acciaio	5200	15.1
cartongesso	6800	19.8

La velocità del suono lega frequenza e lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{c}{f}$$



Propagazione dell'onda e intensità acustica

Alla propagazione della perturbazione di pressione corrisponde una propagazione di energia.

E' possibile quantificare una densità di **energia sonora D** corrispondente alla energia localizzata nell'unità di volume circostante un punto assegnato nel mezzo di propagazione esprimibile in [J/m^3].

Si è visto che un oscillatore armonico è dotato di un energia pari a :

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2$$

Pensando che nel volume considerato tutte le molecole vibrino in fase si ha:

$$D = \frac{1}{2} \rho\omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2$$

La propagazione di energia viene descritta dall'**intensità acustica**, **I**, ossia dal flusso di energia che per unità di tempo attraversa una superficie unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione del suono [W/m²].

L'**intensità acustica**, **I**, è legata alla densità acustica dalla velocità di propagazione dell'onda, c:

$$I = Dc \qquad I = 2\pi^2 \rho c f^2 A^2$$

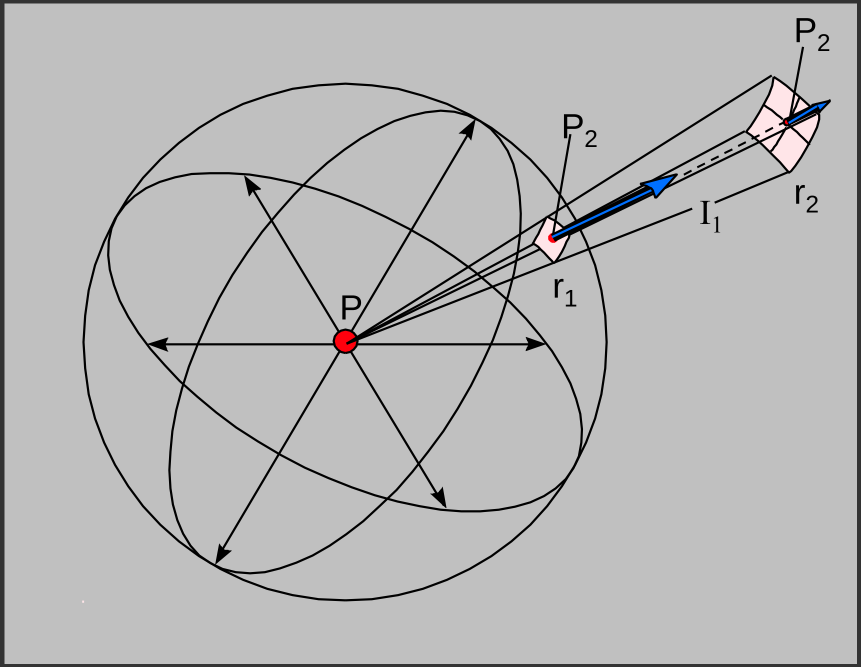
Ricordando che: $$p_{eff} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}} \qquad v_{eff} = \frac{v_{max}}{\sqrt{2}}$$

Si ottiene la seguente espressione per l'intensità: $$I = \frac{p_{eff}^{\,2}}{\rho_0 c}$$

Data una certa potenza W, che si distribuisce su di una superficie S, l'intensità corrispondente vale:

$$I = \frac{W}{S}$$

Le onde sonore che si propagano da una sorgente puntiforme sono onde sferiche. L'energia emessa si distribuirà su di una superficie sempre più grande mano a mano che l'onda si propaga.



$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

W: potenza della sorgente [W]

r: distanza dalla sorgente [m]

Con onde piane l'intensità resta costante. Con onde sferiche mano a mano che ci si allontana dalla sorgente l'intensità diminuisce poiché la potenza si distribuisce su di una superficie sempre più estesa. Si ha una rapidissima diminuzione iniziale.