



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE



Il suono e la sua propagazione

A.Carini – Elettronica per l'audio e l'acustica

Il suono

- Il suono è un'onda che si propaga allontanandosi dalla sua sorgente, consiste in variazioni di densità in un mezzo elastico.
- Il mezzo di propagazione: aria, acqua o un mezzo solido.
- La generazione, la propagazione e la rilevazione del suono sono legati all'esecuzione e conversione di un lavoro meccanico.
- Il generatore del suono esegue lavoro meccanico agitando il mezzo.
- L'onda sonora si propaga con la trasmissione di questa energia meccanica sfruttando le proprietà elastiche e inerziali del mezzo.
- Il suono nell'aria consiste in una variazione periodica della pressione.
- E' costituito da un'onda *longitudinale*: le particelle si spostano parallelamente alla direzione di propagazione (spostamenti $< 1 \mu\text{m}$).

Le onde sonore: onde longitudinali

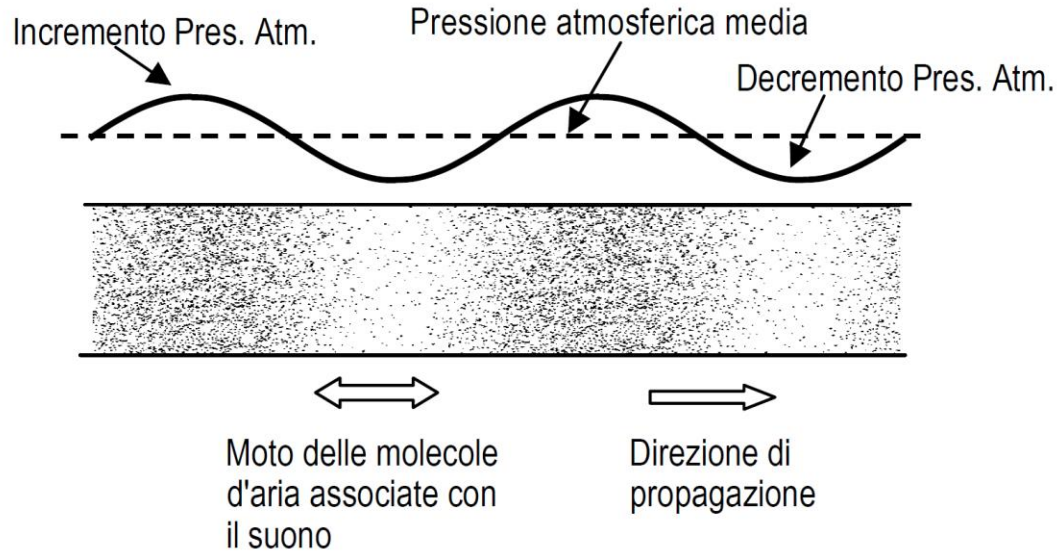


Figura 2.36 Schema della propagazione dell'onda sonora.

Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

La frequenza delle onde sonore

- La frequenza viene misurata in cicli/s ovvero Hz.
- Il suono è un fenomeno fisico a bassissima energia. Gli uomini possono udire un tono a 1 kHz con una intensità di appena 10^{-12} W/m² (luce diurna 1000 W/m²)
- Per rilevare potenze così basse i trasduttori sfruttano le risonanze e questo spiega perché uomini e animali sentono i suoni in una banda limitata.
- Banda dell'udito: 20 Hz – 20.000 Hz (ma 12.000 Hz a 40 anni!)
 - Suoni con $f > 20.000$ Hz → ultrasuoni
 - Suoni con $f < 20$ Hz → infrasuoni

[Qual è la frequenza limite degli ultrasuoni?

Libero cammino medio delle molecole d'aria: $7 \cdot 10^{-8}$ m

Corrisponde a mezza lunghezza d'onda di un suono a 2.5 GHz.

A questa frequenza l'aria cessa di essere un mezzo continuo]

Frequenze delle onde sonore

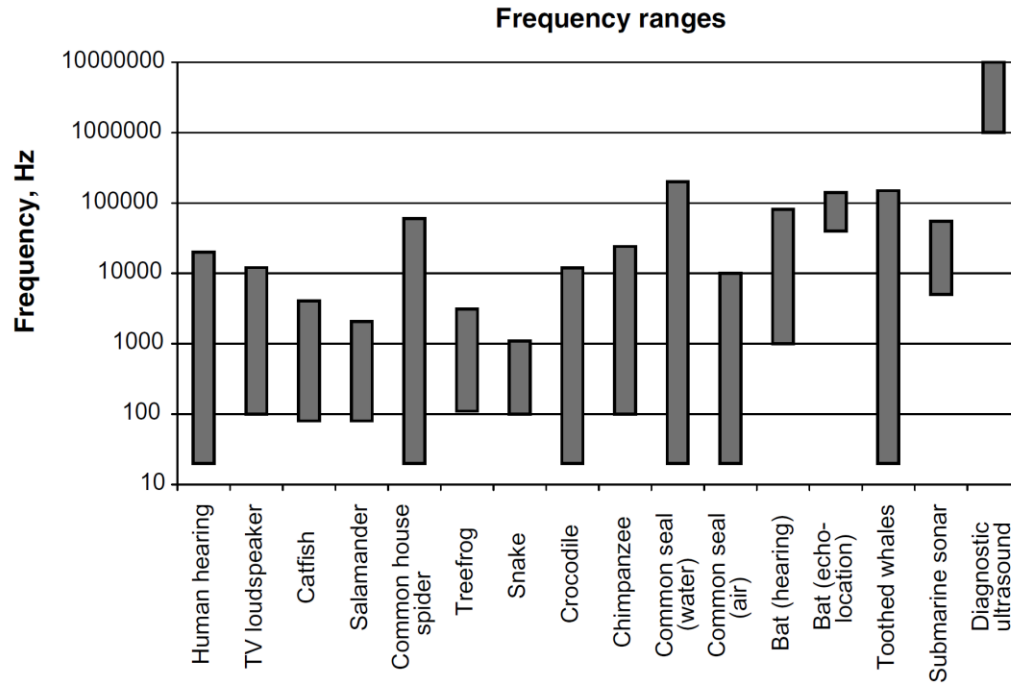


Figure 3.2 Frequency ranges heard by various animals. TV loudspeaker and diagnostic ultrasound are for reference only

Da: I. Tashev «Sound Capture and Processing» John Wiley & Sons, 2009

Velocità del suono

$$c = \sqrt{\frac{C}{\rho}}$$

C [Pa] rigidità del mezzo e ρ [kg/m³] la sua densità

[Formula per mezzi non dispersivi, l'aria è non dispersiva sino ai 28 kHz]

Solidi: $C = E$ modulo di Young

- Acciaio $E = 200$ GPa, $\rho = 7850$ kg/m³, $c = 5047$ m/s

Liquidi: $C = K$ modulo di elasticità a compressione cubica adiabatico

- Acqua distillata $K = 2.2 \cdot 10^9$ Pa, $\rho = 998.2$ Kg/m³, $c = 1484.6$ m/s

- Mare $c \sim 1500$ m/s

Gas: $C = B$ modulo di elasticità $B = \gamma p$

Velocità del suono nell'aria

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$$

p pressione, ρ densità, γ indice adiabatico (rapporto tra calore specifico a pressione costante e volume costante)

Per compressione-espansione adiabatica (senza scambio di calore) $\gamma=1.4$

$$c = \sqrt{\frac{\gamma k T}{m}}$$

$$k = 1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \quad T [\text{K}] = 273.15 + T [^{\circ}\text{C}]$$

$$m = 4.8 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \quad \text{massa di una molecola}$$

Velocità del suono a 0°C è 331,3 m/s
mentre a 20°C è 343,2 m/s

Impedenza acustica

In generale: rapporto tra la forza di eccitazione e la velocità di risposta.

In acustica: rapporto tra l'ampiezza della pressione acustica (forza di eccitazione) e la velocità delle particelle acustiche nel mezzo (la *particle velocity* – v)

$$Z = p / v \quad \text{ma} \quad p = \rho c v \quad \longrightarrow \quad Z = \rho c \quad [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$$

Table 3.1 Acoustic parameters of some materials

Material	Density (kg/m ³)	Speed of sound (m/s)	Specific acoustic impedance (kg/m ² ·s)
Air	1.2	330	400
Water	1000	1480	1.48E + 06
Steel	7850	5050	3.95E + 07
Aluminum	2700	6400	1.70E + 07
Brass	8500	4490	3.80E + 07

Da: I. Tashev «Sound Capture and Processing» John Wiley & Sons, 2009

Acoustic Particle and Particle Velocity

An *acoustic particle* is “a volume element large enough to contain millions of molecules so that the fluid may be thought of as a continuous medium, yet small enough that all acoustic variables may be considered nearly constant throughout...”

“A particle of free air exposed to a sinusoidal sound pressure of 1 Pa, moves back and forth with a velocity amplitude of about 2 mm/s.”

The *particle velocity* is the physical speed of an acoustic particle as it moves back and forth in the direction the sound wave is travelling.

Lunghezza d'onda

La più piccola distanza tra due punti che hanno la stessa pressione misurata nella direzione di propagazione.

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

Lunghezza d'onda nella banda 20-20.000 Hz:

20 Hz	17.16 m
100 Hz	3.4 m
1000 Hz	34 cm
10000 Hz	3.4 cm
20000 Hz	1.7 cm

Per confronto, la lunghezza d'onda della luce visibile varia tra 740 e 360 nm (10^{-9} m)

Lunghezza d'onda

- Le lunghezze d'onda del suono hanno dimensioni simili agli oggetti che ci circondano rendendo evidente la natura ondulatoria dei suoni.
- I suoni vengono riflessi, diffranti, interferiscono.
 - Vengono *diffranti* da oggetti più piccoli della lunghezza d'onda
 - Vengono *riflessi* da oggetti più grandi della lunghezza d'onda
- Il range di frequenze che udiamo è enorme $f_{\max}/f_{\min} = 1000$.
- La lunghezza d'onda spiega i meccanismi con cui udiamo la direzione:
 - Sotto i 100 Hz, non distinguiamo la direzione di provenienza
 - Attorno a 1 kHz, usiamo la differenza di fase tra le orecchie
 - Sopra i 3500 Hz, ci basiamo sull'involuppo d'energia.
- Ecolocalizzazione negli animali
 - Pipistrelli usano chirp tra 30 e 80 kHz → 11 e 4 mm
 - Balene freq. sino 200 kHz → 7 mm

Intensità acustica

Potenza media trasmessa per unità di superficie nella direzione di propagazione dell'onda $[\text{W}/\text{m}^2]$

Potenza di riferimento in aria: $I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$
(approssimativamente la soglia dell'udito a 1 kHz)

Livello di intensità (Intensity level) in dB

$$\text{IL} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{\text{ref}}} \right).$$

Sound pressure level

$I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ corrisponde a un'ampiezza della pressione acustica di $28.9 \mu\text{Pa}$

Per il livello di pressione sonora (sound pressure level – SPL) si fa riferimento al valore efficace

I $20.4 \mu\text{Pa}$ risultanti vengono approssimati a $20 \mu\text{Pa}$, che sono il riferimento per la misura della pressione acustica

$$A_{\text{SPL}} = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right)$$

Intensità acustica



130	soglia del dolore
120	concerto rock
113	timpani
110	fff di orchestra sinfonica
100	autocarro
94	tromba, pianoforte
90	strada rumorosa
86	clarinetto
80	negozio
70	ufficio
60	conversazione normale
50	casa silenziosa
40	notte in campagna
30	fruscio di foglie
20	vento
10	vento debole
0	il più debole suono percepibile

Figura 2.40 Valori tipici dell'intensità acustica.

Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

Legge dell'inverso del quadrato

Potenza di una sorgente sonora:

$$W = \int_S I \cdot dS.$$

S una sfera di raggio r :

$$I(r) = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2}.$$

Le onde sonore

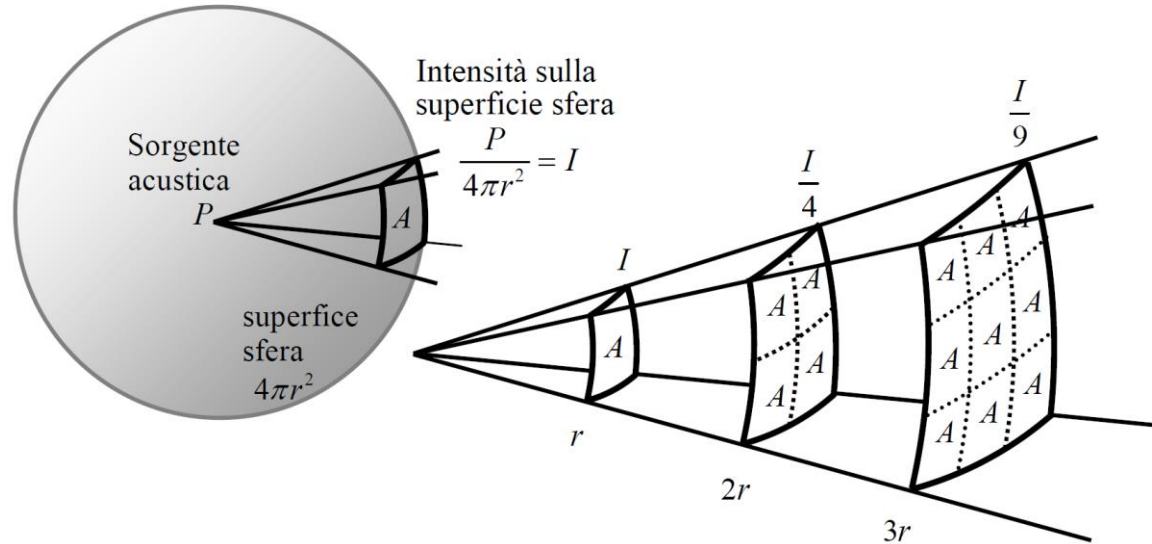


Figura 2.41 Legge dell'inverso del quadrato per l'intensità acustica.

Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

L'attenuazione del suono

L'intensità decade non solo con il quadrato della distanza, ma anche a causa di perdite di energia causate da attriti:

$$A(x) = A_0 e^{-bx}$$
$$I(x) = I_0 e^{-2bx}$$

Rapporto di attenuazione $b = \frac{(2\pi f)^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \xi + K \frac{c_p - c_v}{c_p c_v} \right]$

Viscosità di taglio η , viscosità seconda ξ , coefficiente di conduzione termica K calore specifico a pressione costante c_p e a volume costante c_v

$$B = \frac{20 \log_{10} A(x_1) - 20 \log_{10} (A(x_2))}{x_2 - x_1} = \frac{20b}{\log_{10} e} \quad \text{dB / m}$$

L'attenuazione del suono

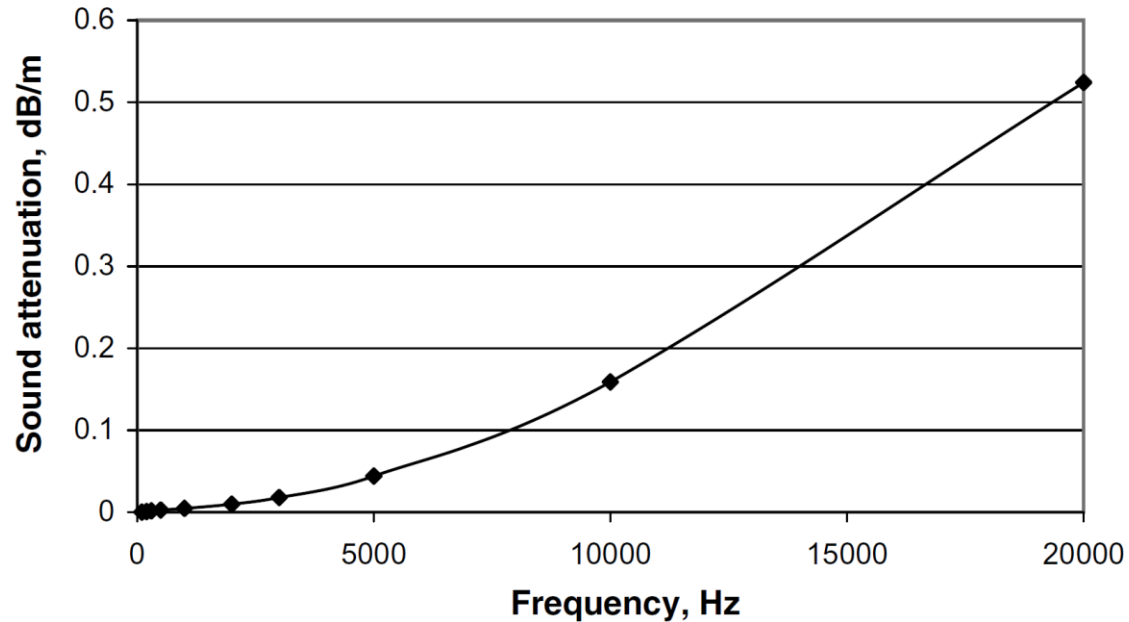


Figure 3.4 Attenuation of sound due to energy losses at normal atmospheric pressure, 20 °C temperature, and 50% humidity

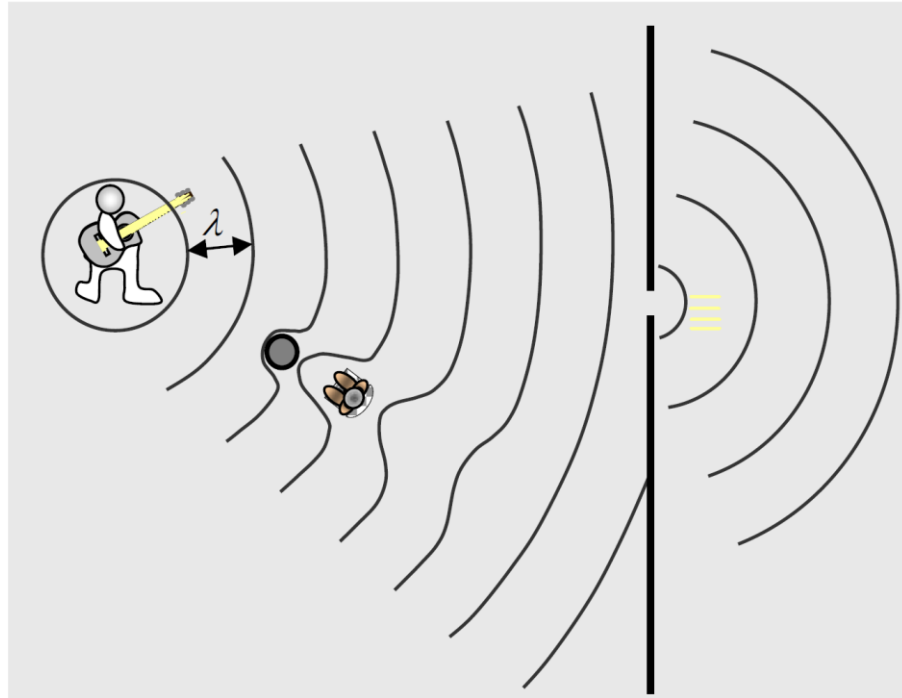
Principio di Huygens (pronuncia hoihens)

Principio con cui si può approssimare il moto di un'onda che avanza:

Ogni elemento $d\Sigma$ di un fronte d'onda Σ si può considerare formalmente come una sorgente secondaria di onde sferiche in fase con la primaria e di ampiezza proporzionale a quella dell'onda primaria e all'area $d\Sigma$.

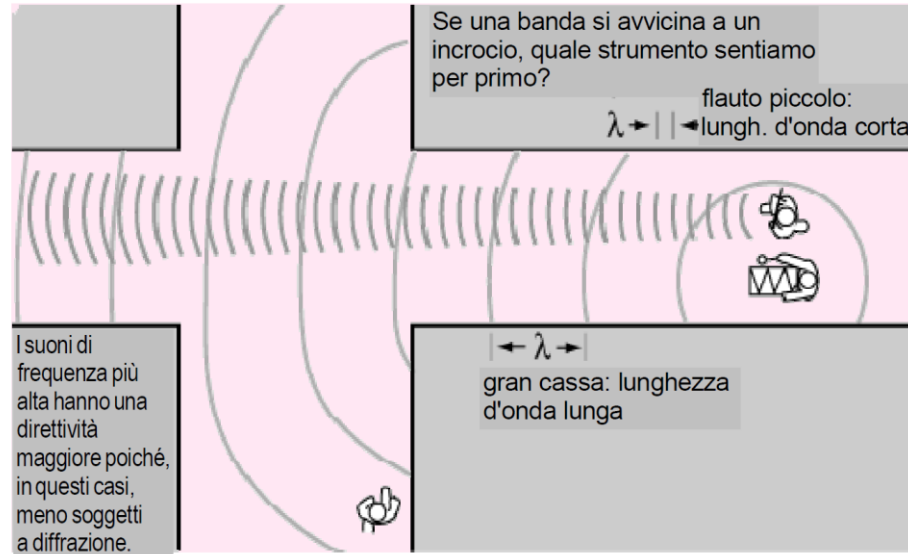
La perturbazione prodotta in un punto dello spazio si può sempre ottenere come sovrapposizione di tutte le onde sferiche secondarie che raggiungono quel punto.

Diffrazione



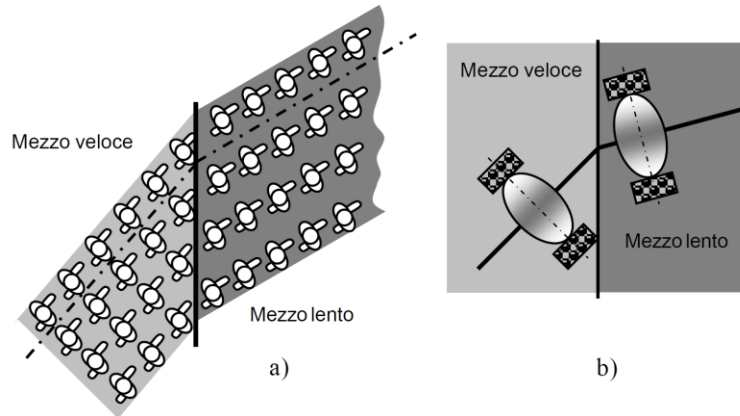
Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

Diffrazione



Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

Rifrazione



Legge di Snell:

$$\frac{\sin \theta_I}{c_1} = \frac{\sin \theta_T}{c_2}$$

Figura 2.42 Schematizzazione del fenomeno della rifrazione ottica: a) colonna di soldati marcianti: passando da un terreno liscio a uno più accidentato la truppa rallenta e cambia la direzione di marcia; b) automobile giocattolo: passando da un mezzo veloce a uno più lento l'automobilina rallenta e cambia direzione.

Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

Rifrazione

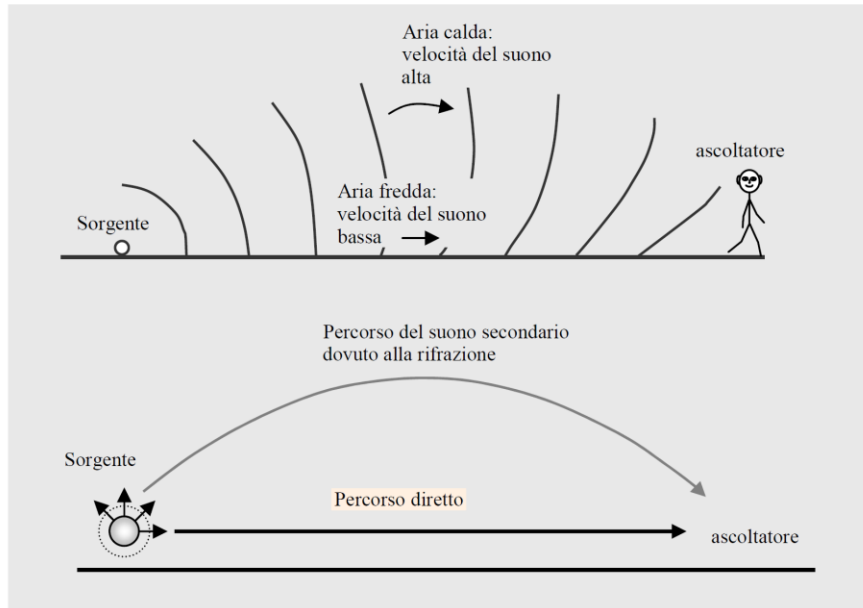


Figura 2.43 Fenomeno della rifrazione di un'onda acustica propagata in aria in cui è presente un gradiente termico.

Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

Riflessione

Un porzione dell'onda sonora che raggiunge la superficie di separazione tra due mezzi è in parte trasmessa e rifratta, in parte riflessa, e in parte dissipata.

Riflessione:

$$\sin \theta_I = \sin \theta_R.$$

Causa l'inversione della componente normale della velocità e della pressione (compressione riflessa come rarefazione – inverte la fase dell'onda).

Rapporto tra energia dell'onda riflessa e trasmessa dipende dal rapporto tra le impedenze acustiche dei mezzi:

$$\frac{E_r}{E_i} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Effetto Doppler

$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{|v_s - v_o|}{c} \cos \theta}$$

Θ angolo tra la direzione della velocità risultante e la linea tra sorgente e osservatore

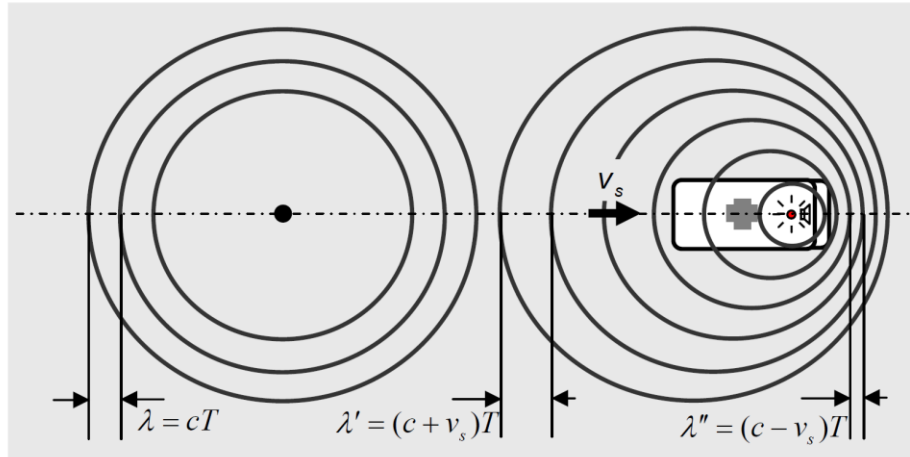
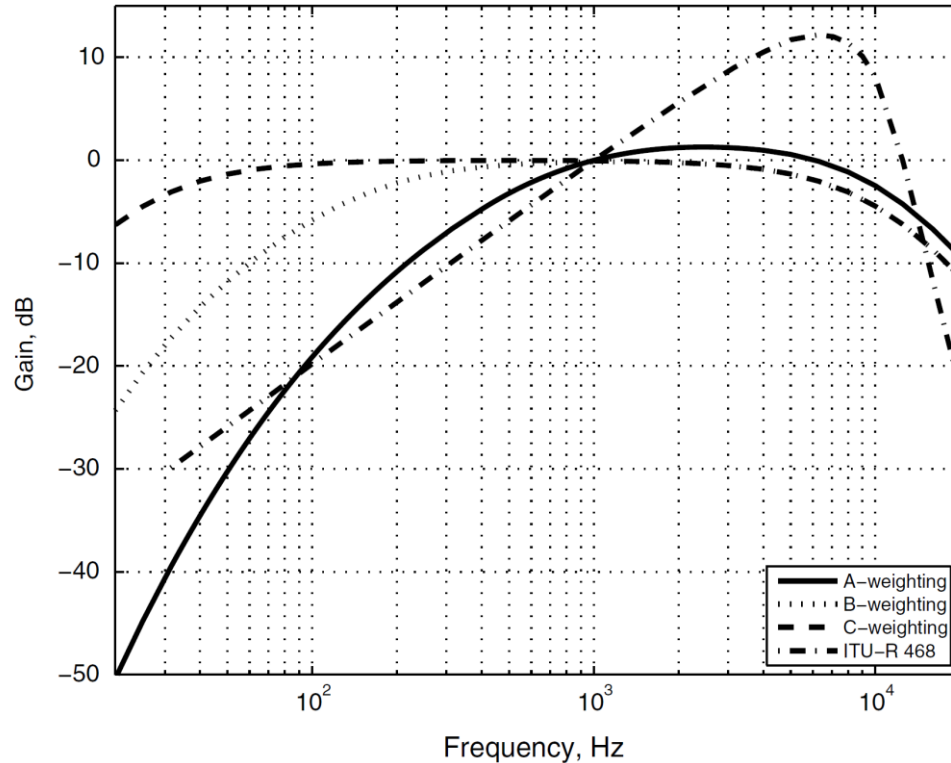


Figura 2.45 Effetto Doppler: il movimento della sorgente acustica ne altera la lunghezza d'onda.

Da: A. Uncini «Audio digitale» McGraw-Hill, 2006

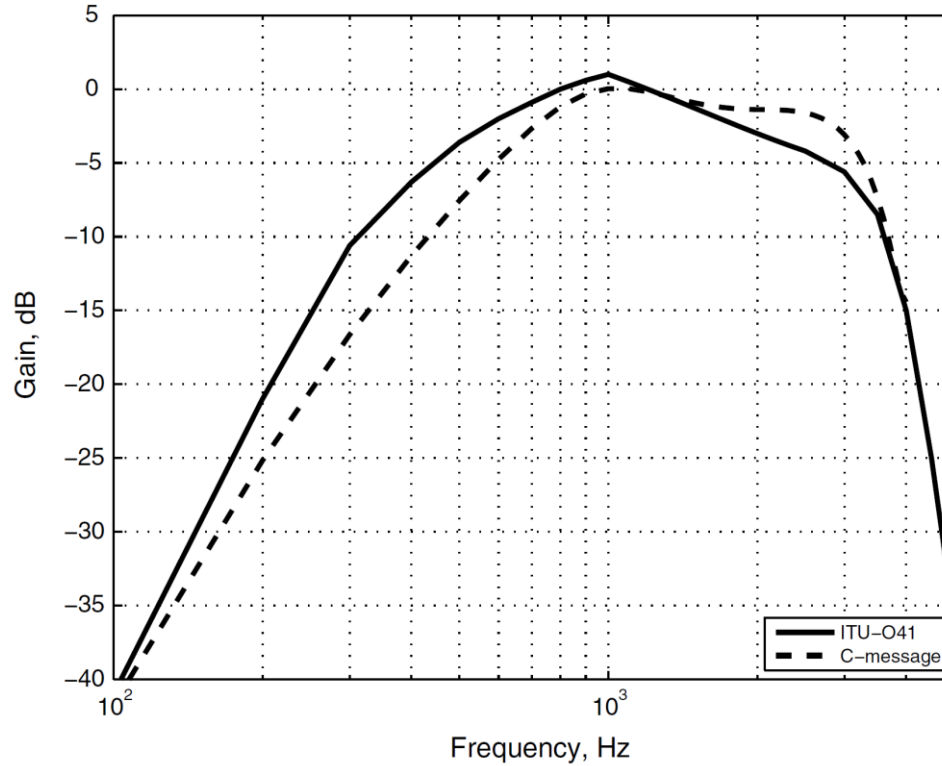
Curve di pesatura



dB(A) o dB(A)
dB(B) o dB(B)
dB(C) o dB(C)

Da: I. Tashev «Sound Capture and Processing» John Wiley & Sons, 2009

Curve di pesatura



Da: I. Tashev «Sound Capture and Processing» John Wiley & Sons, 2009

Vedere:

- Ivan Tashev “Sound Capture and Processing”, John Wiley & Sons, 2009
 - Cap. 3.1