



Suono e frequenza



Il suono - Ridefiniamo

Il suono è un insieme¹ di onde meccaniche² longitudinali³.

- [1] Consiste in una somma di più onde sinusoidali a diverse frequenze.
- [2] Onde che si propagano in un mezzo materiale.
- [3] Le particelle del mezzo si muovono in direzione parallela a quella di propagazione.



Il suono – Percezione umana

- Le onde sonore possono teoricamente avere qualunque frequenza.
- Tuttavia l'apparato uditivo umano reagisce solo a suoni che abbiano una frequenza **compresa tra 20 Hz e 20 KHz**.
- Suoni di frequenza inferiore a 20 Hz sono chiamati **infrasuoni**, mentre suoni di frequenza superiore a 20 KHz sono chiamati **ultrasuoni**.



Il suono – Percezione umana

In che modo le grandezze fisiche che caratterizzano le onde (frequenza, ampiezza o l'intero spettro), influiscono sulla percezione del suono?

Grandezza	Percezione
Frequenza	Suono acuto o grave
Ampiezza	Volume alto o basso
Spettro	Timbro o armonia del suono

In realtà ogni grandezza influenza in misura minore le percezioni legate alle altre due grandezze.



Frequenza dei suoni – Alti e bassi

La frequenza di un suono, al livello percettivo, determina la sensazione di acutezza o gravità dello stesso.

In particolare:

- un suono ad alta frequenza risulterà **acuto** o **alto**
- un suono a bassa frequenza risulterà **grave** o **basso**

La frequenza determina in minima parte anche la **percezione** del **volume** o **intensità** del suono. Vedremo più avanti questo fenomeno. Per ora diciamo solo che ad esempio, le basse frequenze necessitano di più energia per essere udite.



Frequenza dei suoni – Alti, medi, bassi

I suoni possono essere allora classificati come alti, medi o bassi. Tipicamente si considera lo schema:

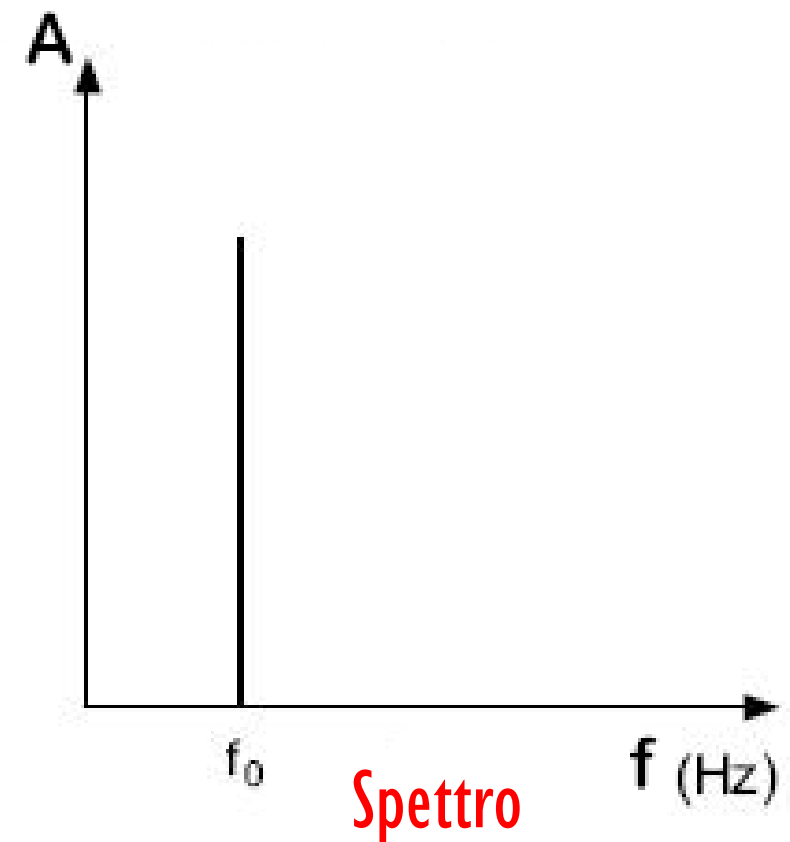
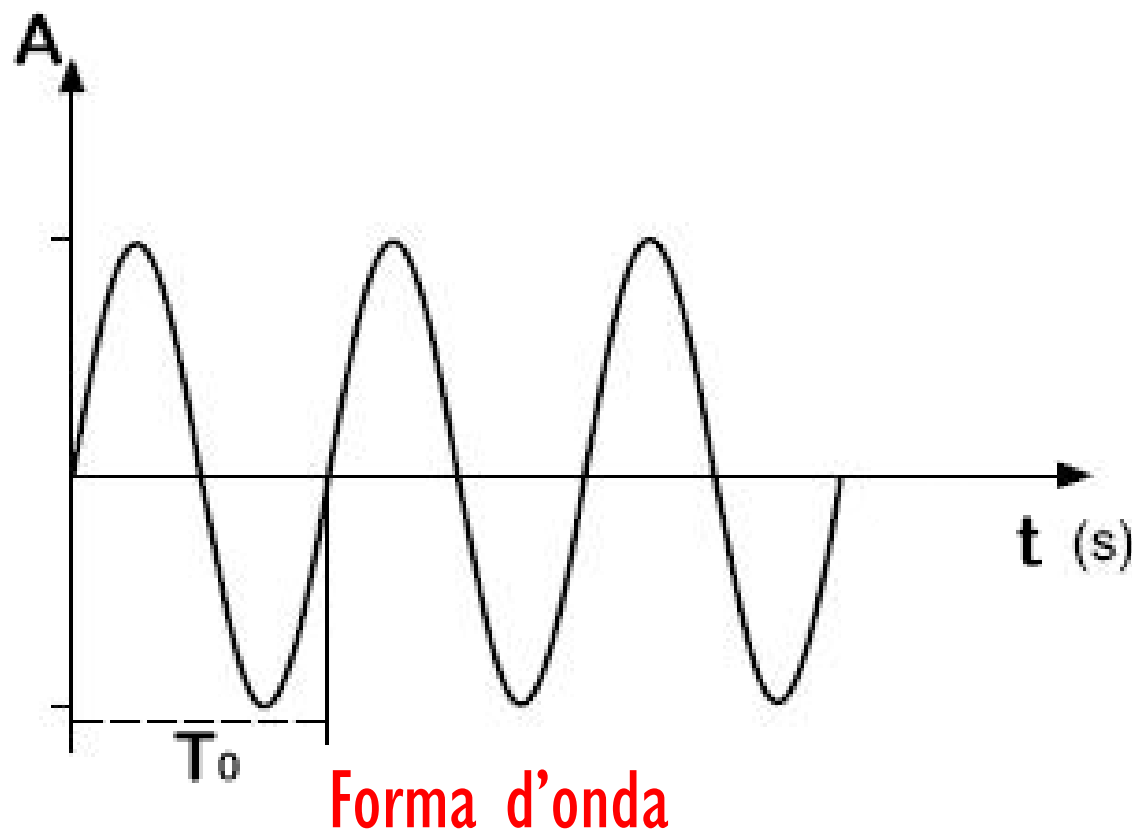
Intervallo frequenza	Tipo
20 – 500 Hz	Bassi
500 – 8000 Hz	Medi
8000 – 20000 Hz	Alti

La frequenza nella musica è strettamente legata alle **note musicali**. Infatti ad ogni nota corrisponde una precisa frequenza



Frequenza dei suoni – Tono puro

I suoni composti da una singola onda sinusoidale si chiamano **toni** (o suoni) **puri**. Il loro spettro contiene una sola frequenza. Le **armoniche** di un tono puro, sono i toni puri con frequenza multipla.

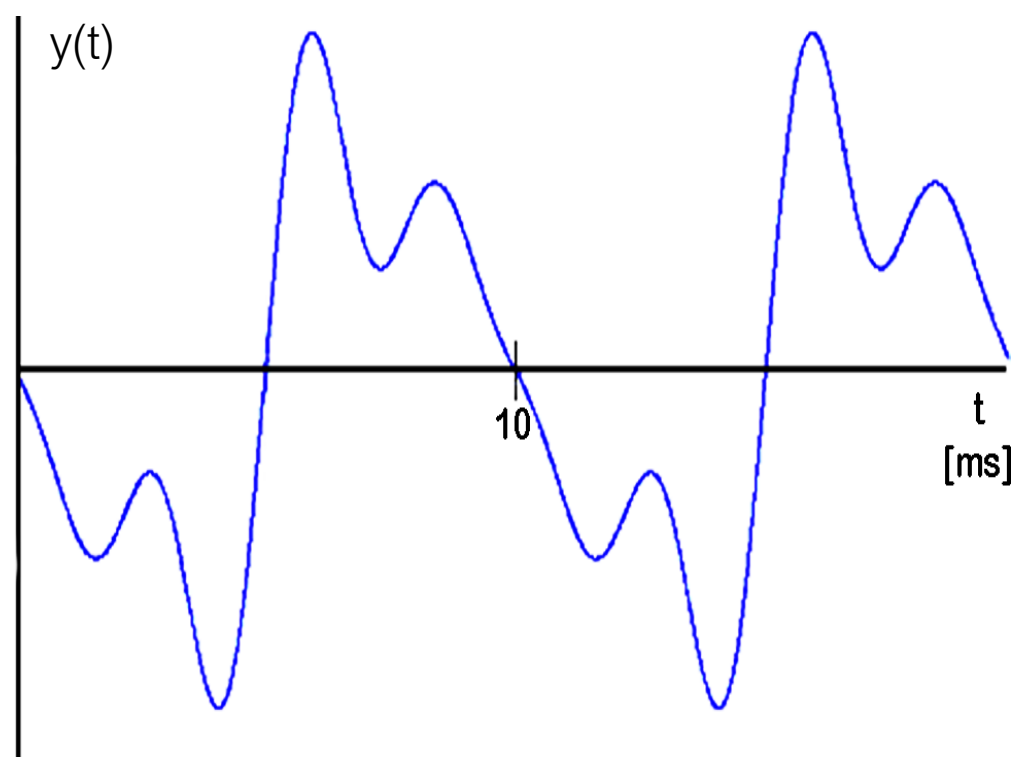


In natura i toni puri sono inesistenti. Possono essere prodotti in laboratorio o ottenuti in maniera abbastanza fedele con strumenti come il **diapason**. Ogni diapason viene costruito per emettere un solo tono puro!

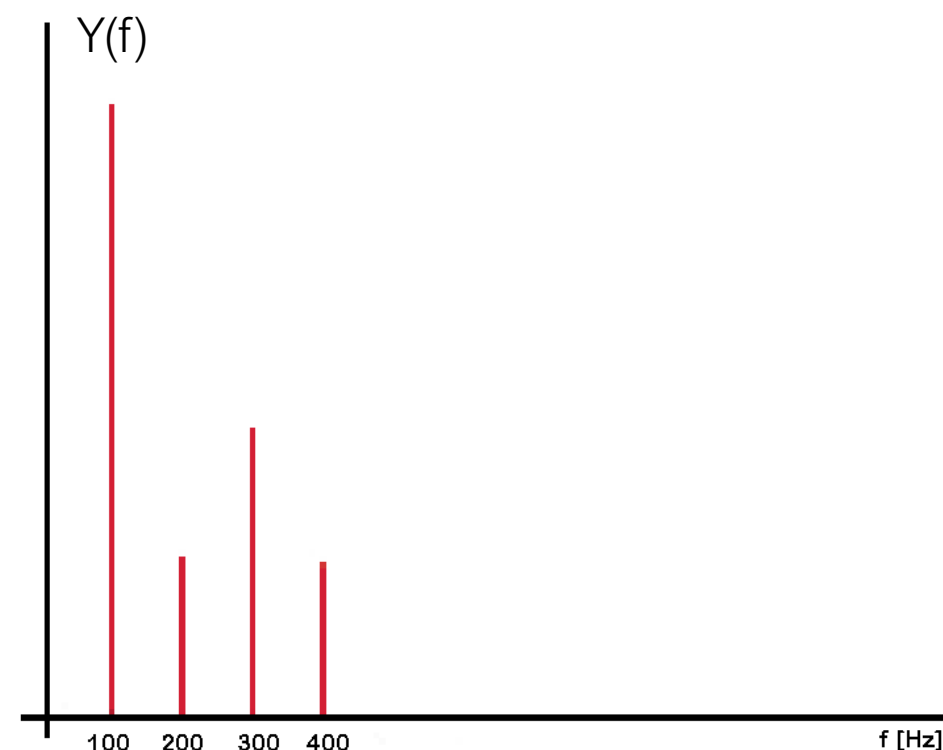


Frequenza dei suoni– Toni complessi

I suoni composti dalla somma di più toni puri (sinusoidi) prendono il nome di **toni (o suoni) complessi**. Il loro spettro contiene più di una frequenza.



Forma d'onda

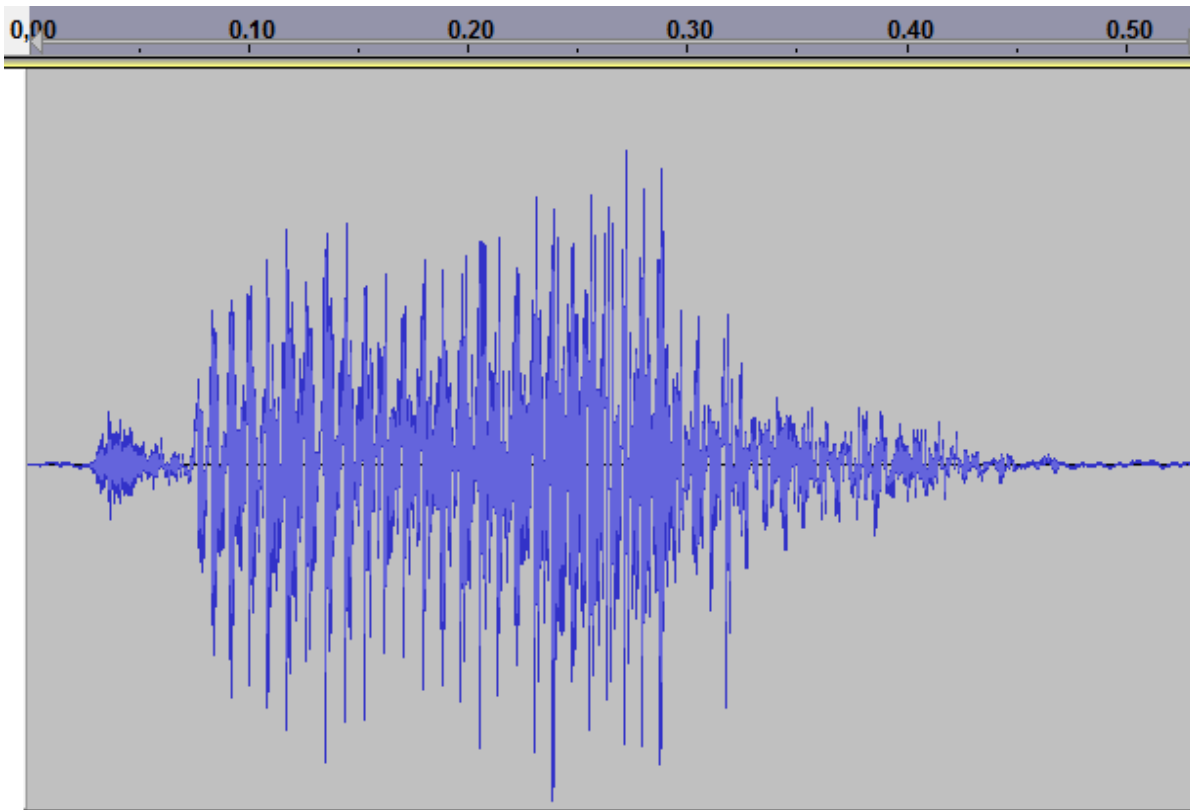


Spettro

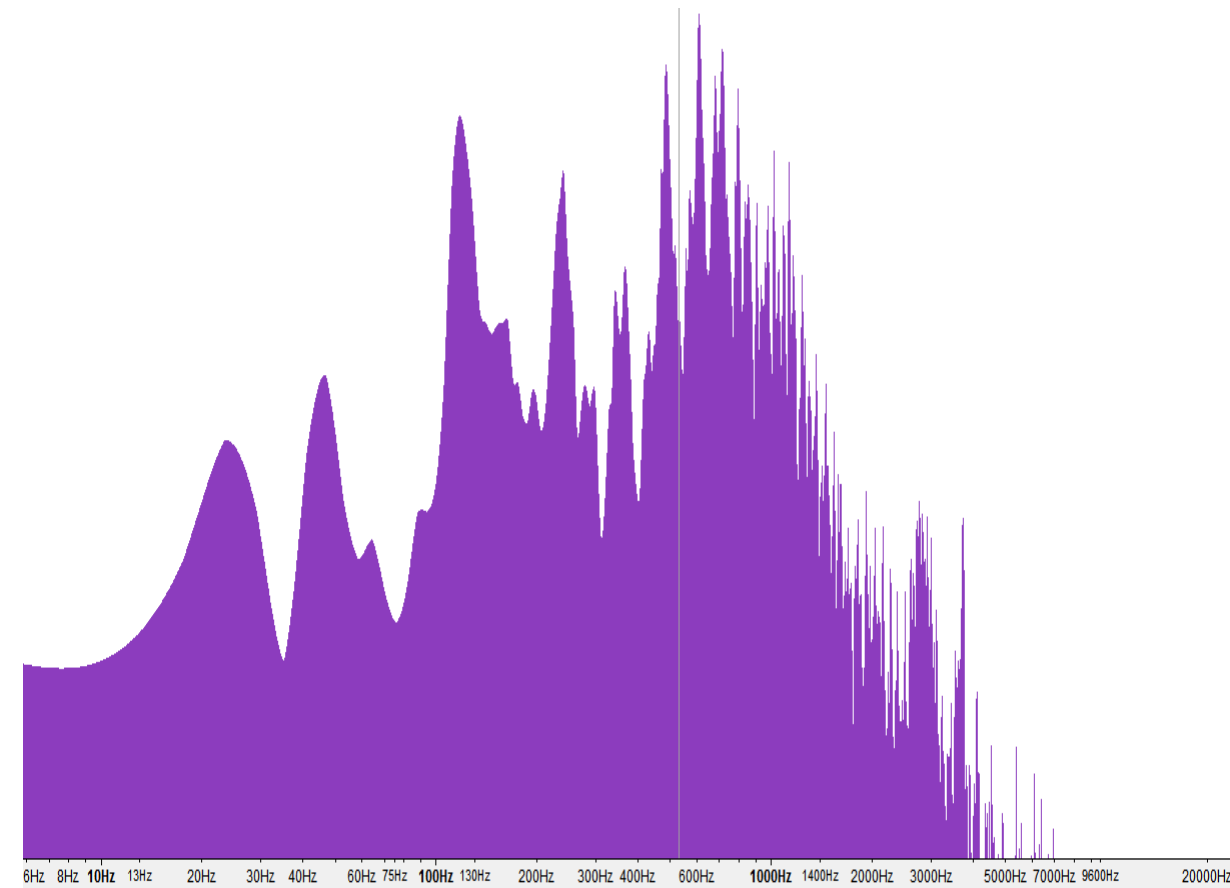
Praticamente tutti i suoni presenti in natura sono complessi.



Frequenza dei suoni– Toni Complessi (Es.)



Forma d'onda

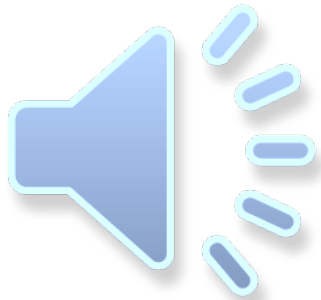


Spettro

A sinistra la forma d'onda associata alla parola «ciao» pronunciata da un essere umano. A destra lo spettro della dell'onda sonora. Si può notare l'enorme quantità di frequenze (sinusoidi) presenti.



Frequenza suoni – Esempi toni puri



200 Hz



440 Hz



1000 Hz



5000 Hz



17000 Hz



20000 Hz



Frequenza dei suoni - Note

- Nella musica la frequenza di un suono caratterizza le **note musicali**.
- Potremmo pensare che la **nota** corrisponda allora ad un tono puro, ma come sappiamo la stessa **nota** può essere prodotta da diversi strumenti musicali ed essere quindi percepita in maniera differente.
- In realtà la nota dipende dalla frequenza predominante nello **spettro** dell'onda sonora. Tutte le altre frequenze caratterizzano invece lo strumento.



Frequenza dei suoni - Note

Si definisce **nota musicale** ciascuno dei simboli utilizzati nella musica per descrivere un particolare suono.

Le note musicali più conosciute sono quelle della **scala diatonica**. Sono 7 e si ripetono a frequenze differenti.

Do Re Mi Fa Sol La Si

Esistono tuttavia altre scale, come la scala **temperata** o **cromatica**.



Frequenza dei suoni - Note

Per ragioni storiche e psicoacustiche, le note sono ripartite all'interno di intervalli denominati **ottave**.

L'**ottava** è l'intervallo che intercorre tra **note** uguali di cui una ha frequenza doppia dell'altra. Ogni ottava inizia con la stessa nota dell'ottava precedente (ma di frequenza doppia).



Frequenza dei suoni - Note

- Ogni **ottava** nella **scala diatonica** contiene 8 note della scala stessa. Es:

Do Re Mi Fa Sol La Si Do

- Nella **scala temperata (occidentale)** le ottave sono divise in 12 semitoni. Un semitono consiste in un aumento in frequenza di un fattore $2^{1/12}$ tra note adiacenti. Ciò significa che il rapporto tra la frequenza di una nota e quella che la precede, sarà uguale $2^{1/12}$. Ogni ottava contiene 13 note tra cui quelle della scala diatonica e 5 variazioni precedute dal simbolo #. Es:

Do #Do Re #Re Mi Fa #Fa Sol #Sol La #La Si Do



Frequenza dei suoni - Note

Di recente (1939) è stato deciso di utilizzare come nota di riferimento il **La**, fissato ad una frequenza di **440 Hz**. Un **diapason** opportunamente costruito può emettere esattamente un tono (quasi) puro a questa frequenza.



La frequenza di ogni nota può quindi essere definita in base alla distanza dal **La** fondamentale. Una nota distante n (intero relativo) semitoni da quella di riferimento nella scala occidentale avrà frequenza:

$$f_n = f_{ref} \times 2^{\frac{n}{12}} \quad \text{con} \quad f_{ref} = 440 \text{ Hz}$$



Legge n. 170 del 3 maggio 1989

■ Essere stonati è illegale!

□ Ref: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1989-05-12&atto.codiceRedazionale=089G0200

LEGGE 3 maggio 1989, n. 170

Normalizzazione dell'intonazione di base degli strumenti musicali. (GU Serie Generale n.109 del 12-05-1989)

note: Entrata in vigore della legge: 27/05/1989

Articoli

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

La Camera dei deputati ed il Senato della Repubblica hanno approvato;

IL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA

PROMULGA

la seguente legge:

Art. 1.

1. Il suono di riferimento per l'intonazione di base degli strumenti musicali e' la nota La3, la cui altezza deve corrispondere alla frequenza di 440 Hertz (Hz), misurata alla temperatura ambiente di 20 gradi centigradi.



Frequenza dei suoni - Note

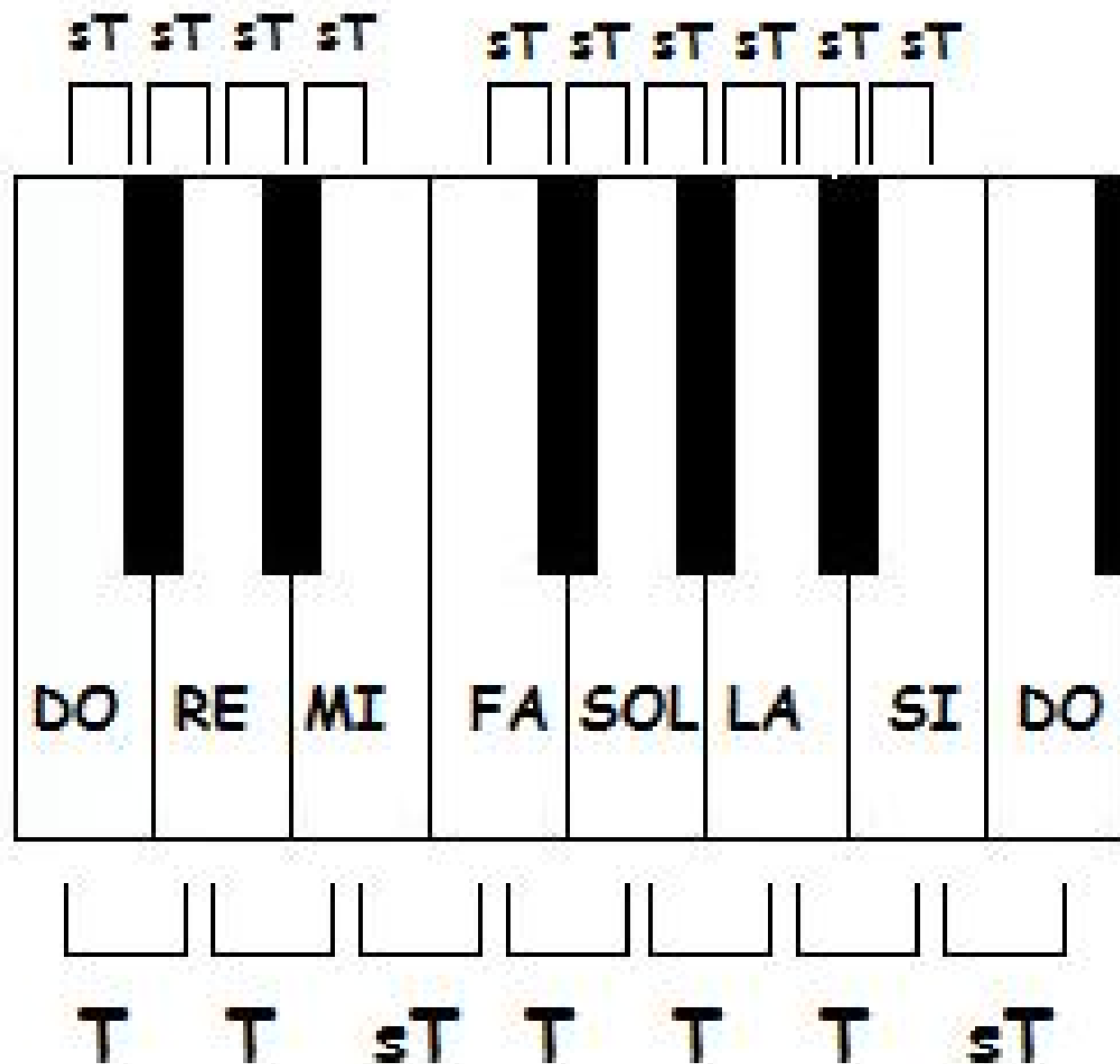
Note	Notazione Anglossassone	Frequenza (Hz)
la	A	$440.0 = 440 \times 2^{0/12}$
la#	A#	$466.2 = 440 \times 2^{1/12}$
si	B	$493.8 = 440 \times 2^{2/12}$
do	C	$523.2 = 440 \times 2^{3/12}$
do#	C#	$554.4 = 440 \times 2^{4/12}$
re	D	$587.3 = 440 \times 2^{5/12}$
re#	D#	$622.2 = 440 \times 2^{6/12}$
mi	E	$659.2 = 440 \times 2^{7/12}$
fa	F	$698.4 = 440 \times 2^{8/12}$
fa#	F#	$740.0 = 440 \times 2^{9/12}$
sol	G	$784.0 = 440 \times 2^{10/12}$
sol#	G#	$830.6 = 440 \times 2^{11/12}$
la	A	$880.0 = 440 \times 2^{12/12}$

Semitono

Ottava



Frequenza dei suoni – Ottava



sT = Semitono

T = Tono (2 semitoni)



Frequenza dei suoni – Tabella note

Note	ottave									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Do	16,35	32,70	65,41	130,8	261,6	523,3	1047	2093	4186	8372
Do#-Reb	17,32	34,65	69,30	138,6	277,2	554,4	1109	2217	4435	8870
Re	18,35	36,71	73,42	146,8	293,7	587,3	1175	2349	4699	9397
Re#-Mib	19,45	38,89	77,78	155,6	311,1	622,3	1245	2489	4978	9956
Mi	20,60	41,20	82,41	164,8	329,6	659,3	1319	2637	5274	10548
Fa	21,83	43,65	87,31	174,6	349,2	698,5	1397	2794	5588	11175
Fa#-Solb	23,12	46,25	92,50	185,0	370,0	740,0	1480	2960	5920	11840
Sol	24,50	49,00	98,00	196,0	392,0	784,0	1568	3136	6272	12544
Sol#-Lab	25,96	51,91	103,8	207,7	415,3	830,6	1661	3322	6645	13290
La	27,50	55,00	110,0	220,0	440,0	880,0	1760	3520	7040	14080
La#-Sib	29,14	58,27	116,5	233,1	466,2	932,3	1865	3729	7459	14917
Si	30,87	61,74	123,5	246,9	493,9	987,8	1976	3951	7902	15804

Nella musica si usano ottave che iniziano sempre con il **Do**, ma nulla vieta di iniziare con altre note. Come visto con il **La** fondamentale, è possibile ricavare le frequenze di tutte le note fissandone una di riferimento e conoscendo la «distanza» da questa.



Frequenza dei suoni – Esempio Pianoforte

Note	ottave									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Do	16,35	32,70	65,41	130,8	261,6	523,3	1047	2093	4186	8372
Do#-Reb	17,32	34,65	69,30	138,6	277,2	554,4	1109	2217	4435	8870
Re	18,35	36,71	73,42	146,8	293,7	587,3	1175	2349	4699	9397
Re#-Mib	19,45	38,89	77,78	155,6	311,1	622,3	1245	2489	4978	9956
Mi	20,60	41,20	82,41	164,8	329,6	659,3	1319	2637	5274	10548
Fa	21,83	43,65	87,31	174,6	349,2	698,5	1397	2794	5588	11175
Fa#-Solb	23,12	46,25	92,50	185,0	370,0	740,0	1480	2960	5920	11840
Sol	24,50	49,00	98,00	196,0	392,0	784,0	1568	3136	6272	12544
Sol#-Lab	25,96	51,91	103,8	207,7	415,3	830,6	1661	3322	6645	13290
La	27,50	55,00	110,0	220,0	440,0	880,0	1760	3520	7040	14080
La#-Sib	29,14	58,27	116,5	233,1	466,2	932,3	1865	3729	7459	14917
Si	30,87	61,74	123,5	246,9	493,9	987,8	1976	3951	7902	15804

Tipicamente il pianoforte conta 88 tasti.

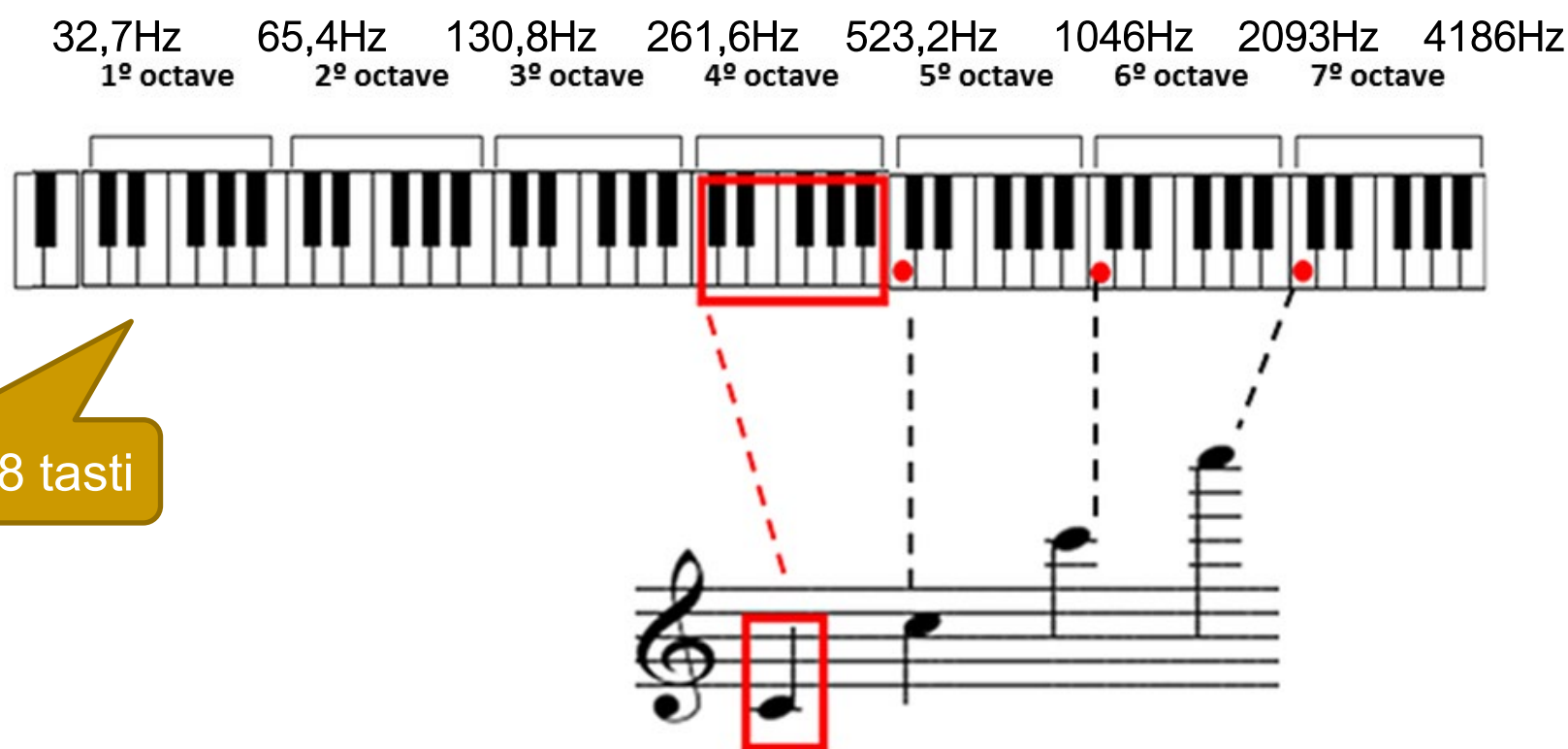
Talvolta è possibile avere pianoforti con 97 tasti, aventi cioè l'ottava 0 completa.

E' anche possibile trovare pianoforti elettronici con 76 tasti (6 ottave), e tastiere con 61 tasti (5 ottave) e 49 tasti (4 ottave)



Frequenza dei suoni – Esempio Pianoforte

Ricordiamo che l'**ottava** è l'intervallo che intercorre tra **note** uguali di cui una ha frequenza doppia dell'altra. Ogni ottava inizia con la stessa nota dell'ottava precedente (ma di frequenza doppia).



do ₄	do# ₄	re ₄	re# ₄	mi ₄	fa ₄	fa# ₄	sol ₄	sol# ₄	la ₄	la# ₄	si ₄
261,6Hz	277,2Hz	293,7Hz	311,1Hz	329,6Hz	349,2Hz	369,9Hz	392Hz	415,3Hz	440Hz	466,1Hz	493,9Hz



Frequenza dei suoni - Armoniche

- Per la Serie di Fourier abbiamo definito armoniche, tutte le componenti con frequenza multipla di quella fondamentale.
- In generale, fissato un tono puro (e quindi una frequenza), possiamo definire le sue armoniche come tutti i toni puri con frequenza multipla di quella fissata.
- Le armoniche di uno stesso tono puro, se suonate insieme o in sequenza producono di solito un suono gradevole.
- Un esempio è l'accordo di **Do maggiore**, che si ottiene suonando il Do il Mi e il Sol, tutti multipli di un Do di ottave precedenti (es: Do a 261,6 Hz).



Frequenza dei suoni - Diapason



Tono puro a 440 Hz
generato tramite
software



Suono emesso da un
diapason da 440 Hz
e registrato



Velocità del suono

- Come detto in precedenza le onde si propagano, ma a che velocità?
- La velocità delle onde dipende dalle proprietà chimiche e fisiche del mezzo di propagazione.
- Le onde sonore si propagano **nell'aria** a temperatura **20 °C** ad una velocità di **343,85 $\frac{m}{s}$**



Velocità del suono

In generale la velocità del suono in un mezzo può essere ricavata dalla seguente formula:

$$v_{i,T} = v_{i,0} + \alpha_i(T)$$

Dove T è la temperatura in gradi celsius, $v_{i,0}$ è la velocità del suono nel mezzo i a temperatura $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\alpha_i(T)$ una funzione che pesa l'influenza della temperatura nella velocità finale.

Nell'aria $v_{aria,0} = 331,45 \frac{m}{s}$, e $\alpha_{aria}(T) = 0,62 T$ (approssimato).
Per questo per $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ si ottiene $v_{aria,20} = 343,85 \frac{m}{s}$.



Velocità del suono e comprimibilità del mezzo

Poiché l'acqua è 10 mila volte **meno** comprimibile dell'aria, nell'acqua il suono si propaga più velocemente che nell'aria

- La rapidità con la quale ogni strato si comprime e si espande, e quindi la velocità di trasmissione, dipende da una proprietà del fluido: la **comprimibilità**

La **comprimibilità** è la proprietà per cui un corpo subisce una diminuzione **di** volume in conseguenza **di** un incremento **della** pressione che agisce sulla sua superficie **di** contorno.



- *Meno lo strato è comprimibile, prima cederà l'energia al successivo -> Più velocità!*

Materiali	Velocità del suono [m/s]
Aria	343
Acqua	1484
Ghiaccio (a 0 °C)	3980
Vetro	5770
Acciaio	5900
Alluminio	6300
Piombo	2160
Titanio	6100
PVC (morbido)	80
PVC (duro)	1 700
Calcestruzzo	3 100
Faggio	3 300
Granito	6 200
Peridotite	7 700
Sabbia (asciutta)	10-300



Velocità del suono nell'acqua di mare

- Varia tra 1460 e 1560 m/s
- Alla superficie del mare (profondità 0 metri), a 21°C, con una salinità normale di 32 parti (su 1000), la velocità del suono è 1505 m/s

$$V = 1450 + 4.61 \cdot T - 0.045 \cdot T^2 + 0.0182 \cdot h + 1.3 \cdot (S - 34)$$

T

Temperatura

h

Profondità

S

Salinità



Lunghezza d'onda

Una volta fissata la velocità del suono e nota la frequenza, è possibile calcolare la **lunghezza d'onda**. Ricordiamo:

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

Quali sono le lunghezze d'onda udibili dagli esseri umani?

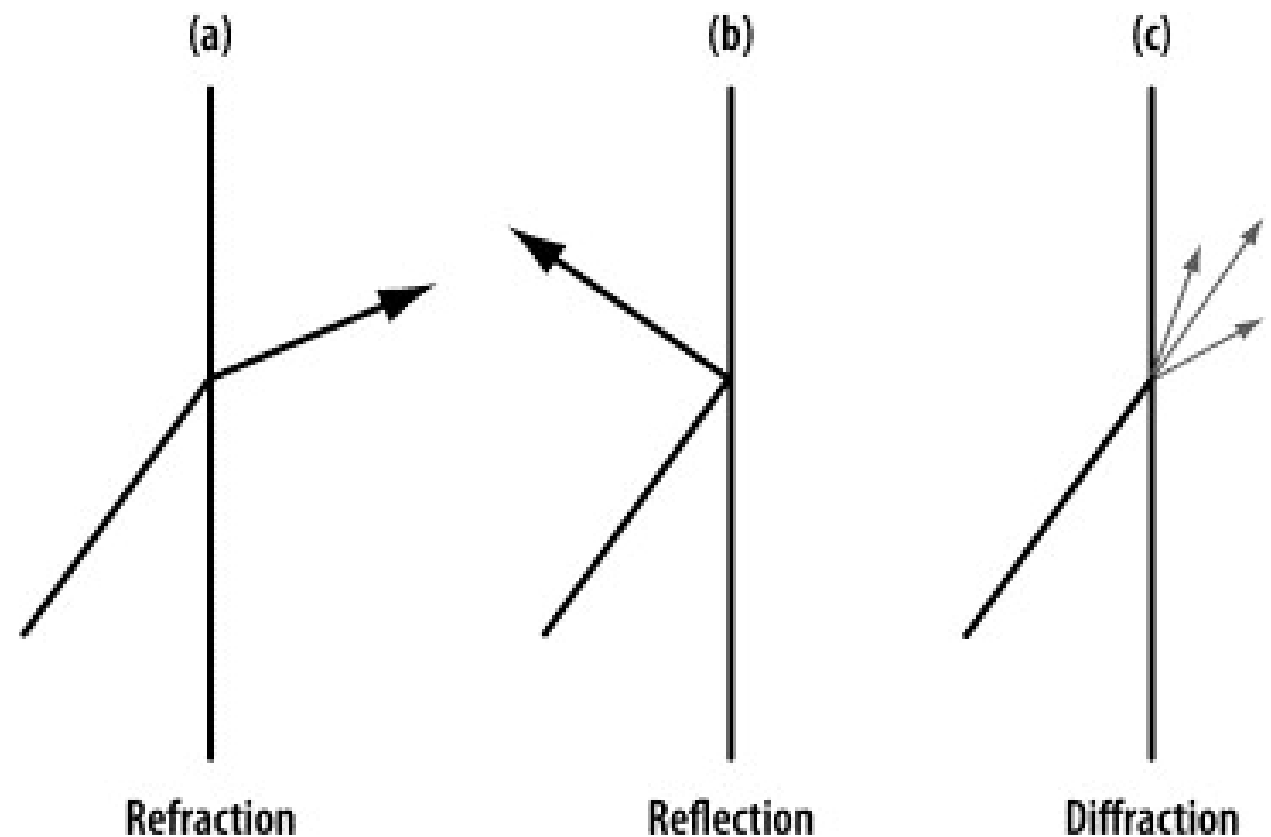
Sapendo che il range di frequenze udibili è $20\text{Hz} - 20\text{KHz}$, basta calcolare le lunghezze d'onda per gli estremi in frequenza. Nell'aria a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, il range delle lunghezze d'onda udibili va da **17 mm** a **17 m**.



Deviazione delle onde sonore

Le onde in generale possono subire delle alterazioni durante la propagazione. In particolare le onde sonore possono subire delle deviazioni, che si verificano sotto diverse condizioni fisiche. Abbiamo:

- Rifrazione
- Riflessione
- Diffrazione





Rifrazione

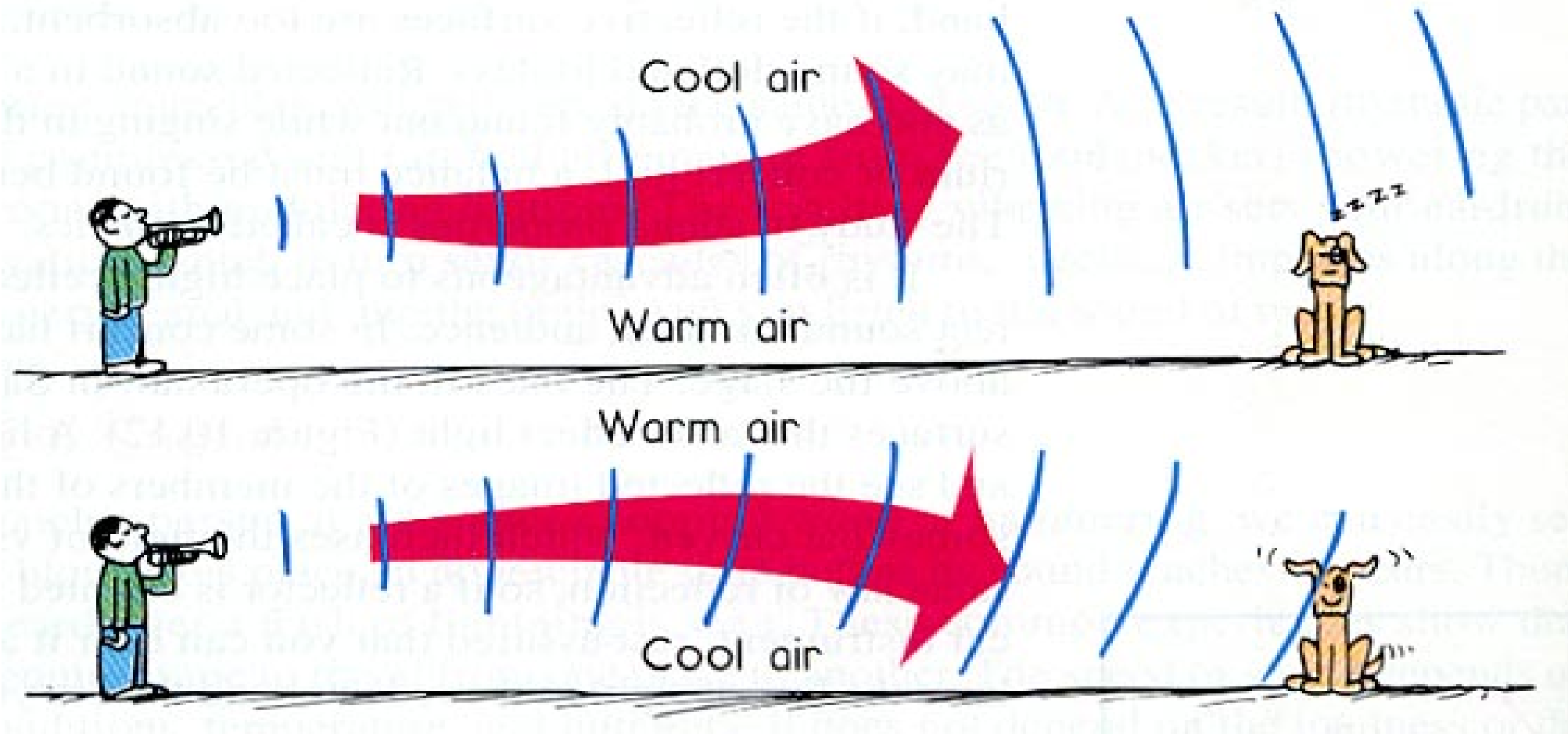
La **rifrazione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda causata da una variazione nella velocità di propagazione della stessa.

- La velocità varia se cambia la temperatura...
- ...oppure se cambia il mezzo di propagazione.





Rifrazione del suono - Fenomeni



Nell'aria fredda la velocità del suono è più bassa, mentre nell'aria calda è più alta. Quando l'aria vicino al suolo è calda (es: giorno) e sopra fredda, le onde vengono deviate verso l'alto. Viceversa vengono deviate verso il basso (es: notte). Per questo nelle serate fredde i suoni possono essere uditi più facilmente a parità di distanza dalla sorgente.

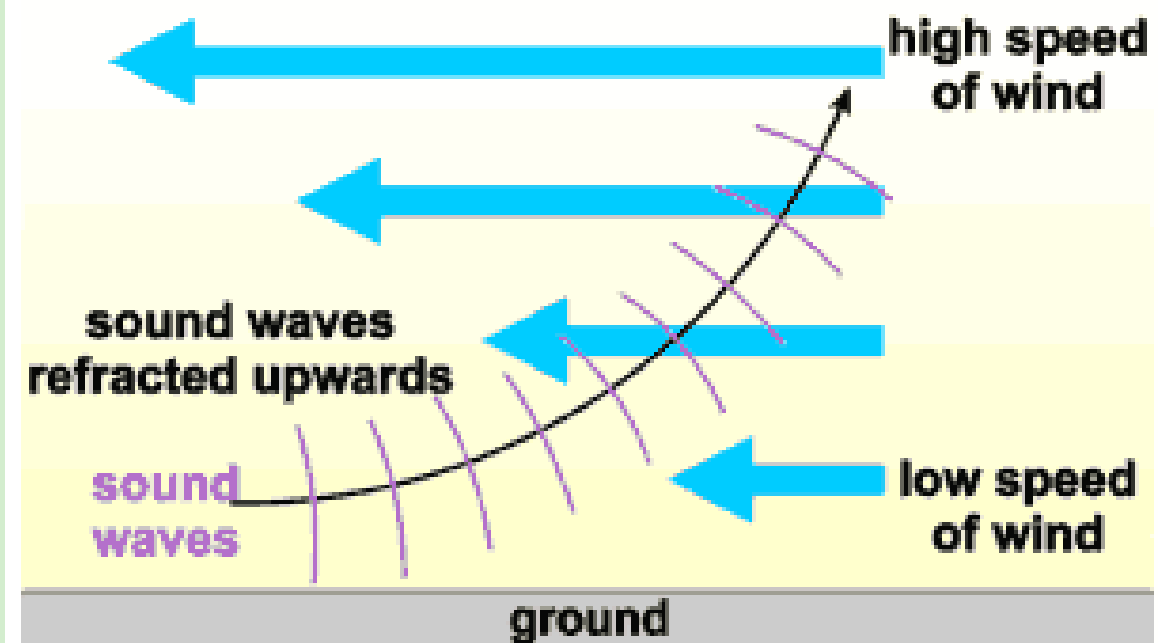
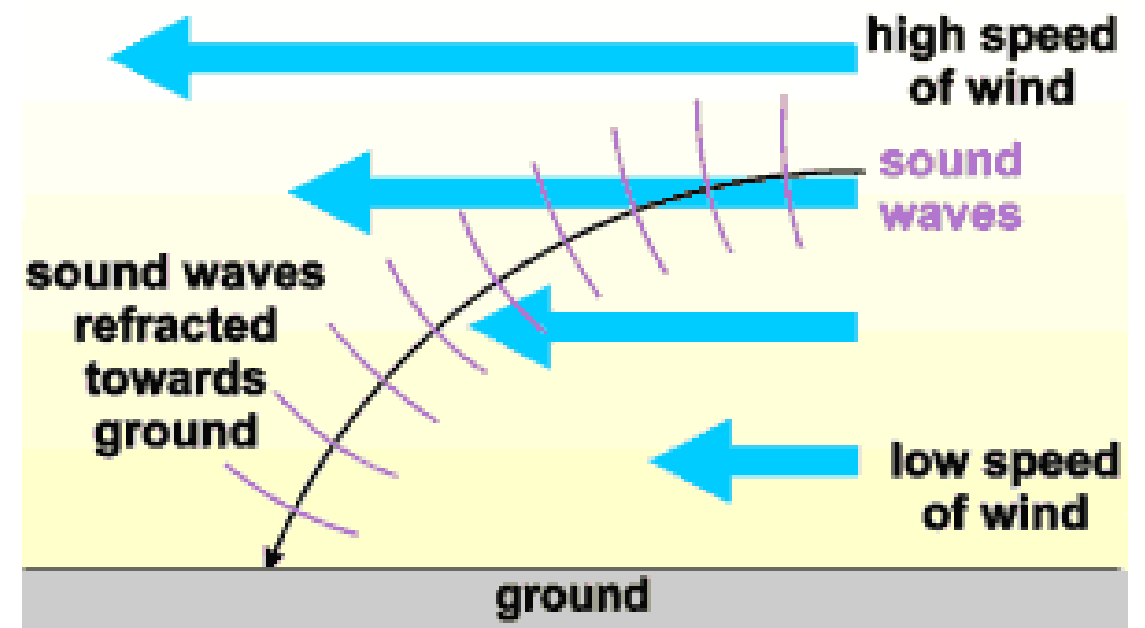


Rifrazione del suono - Fenomeni

Il vento trasporta le parole?

Solitamente il vento soffia ad una velocità più bassa vicino al suolo e più elevata ad alta quota. La differenza tra queste due velocità induce una rifrazione. Nel caso in cui la direzione delle onde sonore è uguale alla direzione in cui soffia il vento, queste verranno rifratte verso il basso. Se la direzione è opposta le onde saranno rifratte verso l'alto.

Per questo si ha l'impressione che il vento «trasporti» le parole. In realtà le onde vengono deviate e non trasportate.

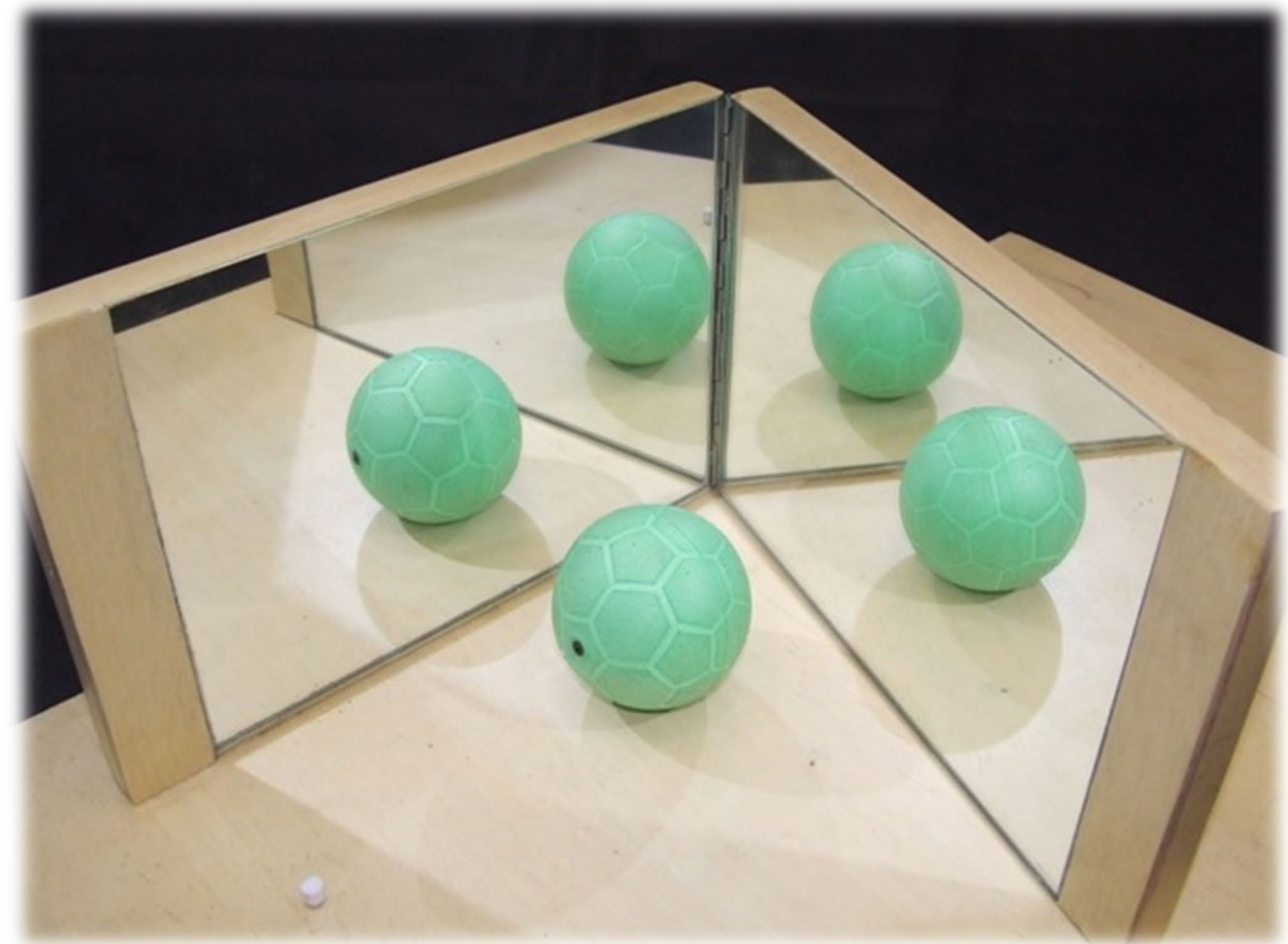




Riflessione

La **riflessione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda che colpisce la superficie di separazione tra due mezzi di propagazione differenti. Incapace di attraversare tale superficie, l'onda viene deviata.

- **ATTENZIONE!** La riflessione si verifica sotto determinate condizioni fisiche!
- Ci concentreremo sulla riflessione delle onde sonore.





Riflessione del suono

Affinché un suono che incontra un ostacolo sia riflesso, è necessario che la sua **lunghezza d'onda** sia molto più piccola dell'ostacolo.

- In ogni caso il suono riflesso perderà una parte della sua energia che dipende dal materiale della superficie con cui si scontra.
- Se in certi ambienti si vuole evitare la riflessione, si ricorre a materiali detti **fonoassorbenti**. Anche se le condizioni per la riflessione sono soddisfatte, la maggior parte dell'energia verrà comunque assorbita.



Riflessione del suono - Implicazioni

Poiché un'onda riflessa torna di norma alla sorgente, se si conosce la velocità v di propagazione è possibile calcolare la **distanza** D di un oggetto dalla sorgente. Infatti il tempo Δt che essa impiega per andare e tornare vale:

$$\Delta t = \frac{2 D}{v}$$

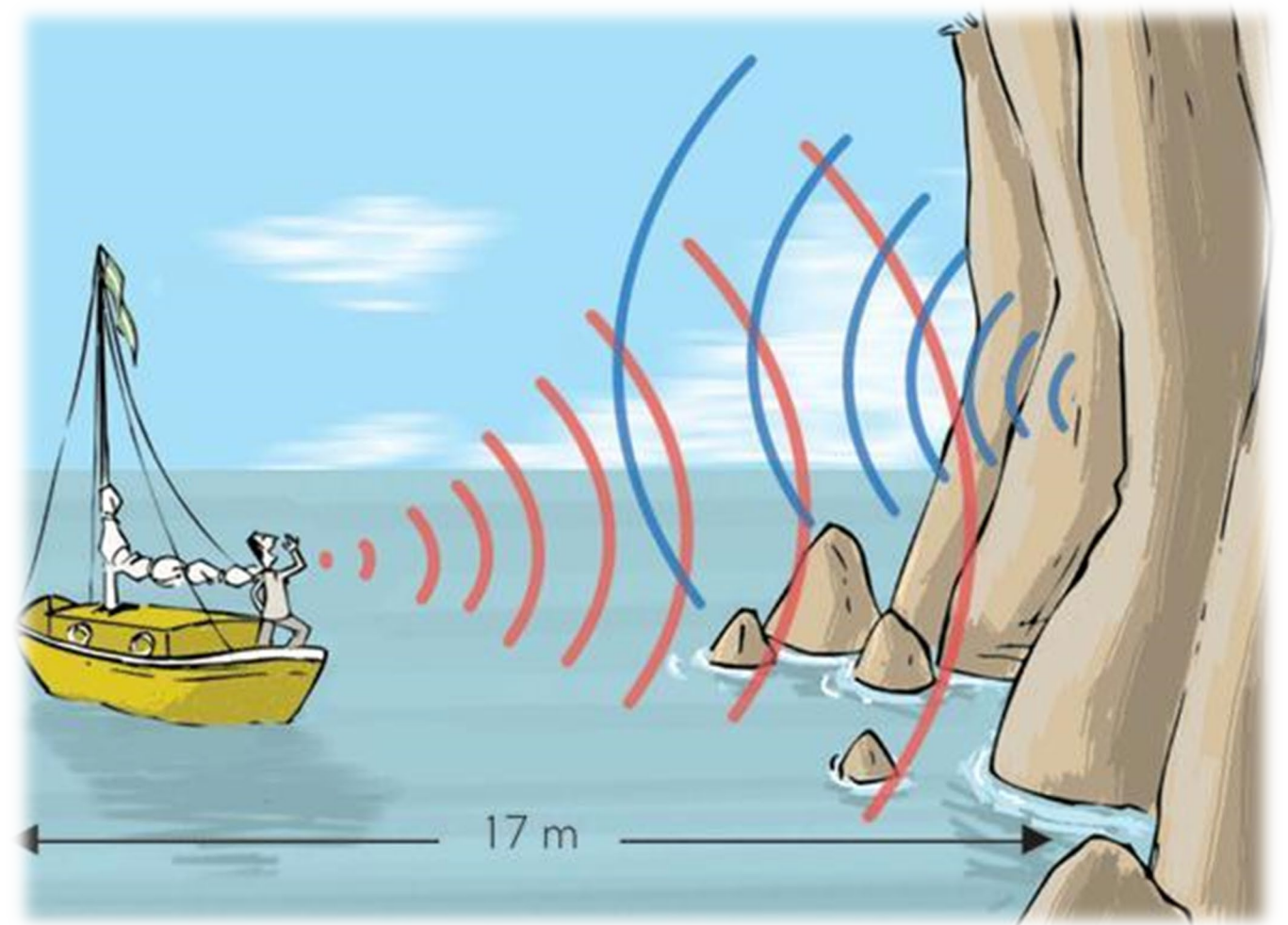
Il funzionamento dei **SONAR** si basa su quest'idea.



Riflessione del suono – Eco

Uno dei fenomeni più noti dovuti alla riflessione è quello **dell'eco**. Esso consiste nella sensazione che un suono emesso da una sorgente in una direzione, venga riemesso dopo un certo tempo da un'altra sorgente nella direzione opposta.

ATTENZIONE! Affinché l'essere umano possa apprezzare l'eco, non basta che l'onda venga riflessa. Serve che la superficie riflettente si trovi ad una certa distanza dalla sorgente!





Riflessione del suono – Eco

Gli esseri umani possono distinguere due suoni simili solo se questi arrivano all'apparato uditivo a distanza di tempo di almeno **0.1 s**

Ciò significa che:

- Se la superficie riflettente è troppo vicina alla sorgente, non si riuscirà a distinguere tra il suono originale e il suono riflesso.
- Per poter apprezzare l'eco nell'aria a 20 °C è necessario che la superficie riflettente sia ad una distanza D di almeno:

$$D = \frac{v \Delta t}{2}$$

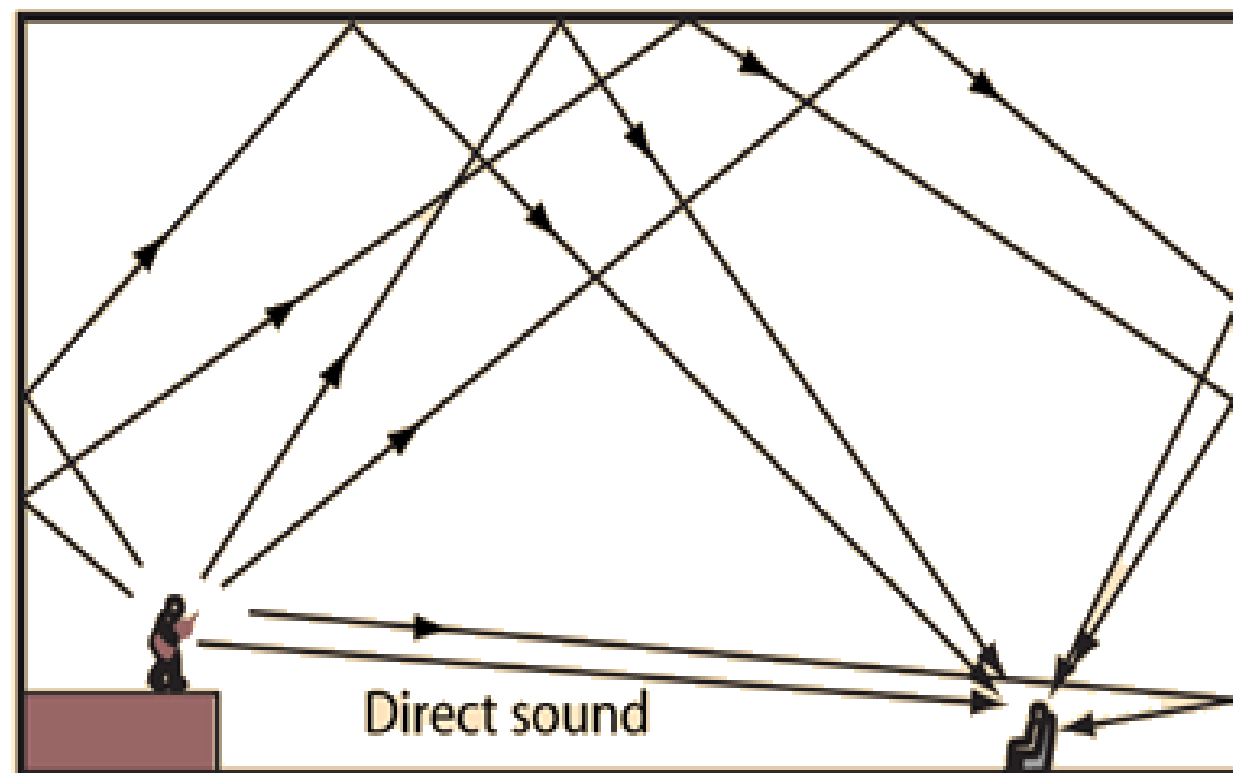
$$D \cong \frac{343 \times 0.1}{2} \cong 17 \text{ m}$$



Riflessione del suono – Riverbero

Se la superficie riflettente è a distanza **inferiore** di **17 m**, il suono originale e il suono riflesso si sovrapporranno. A livello percettivo si avvertirà un aumento di intensità e/o distorsione. Questo fenomeno prende il nome di **riverbero**.

- L'acustica delle sale si ottiene studiando e sfruttando il fenomeno del riverbero;
- In musica spesso si usa il riverbero per arricchire le melodie.

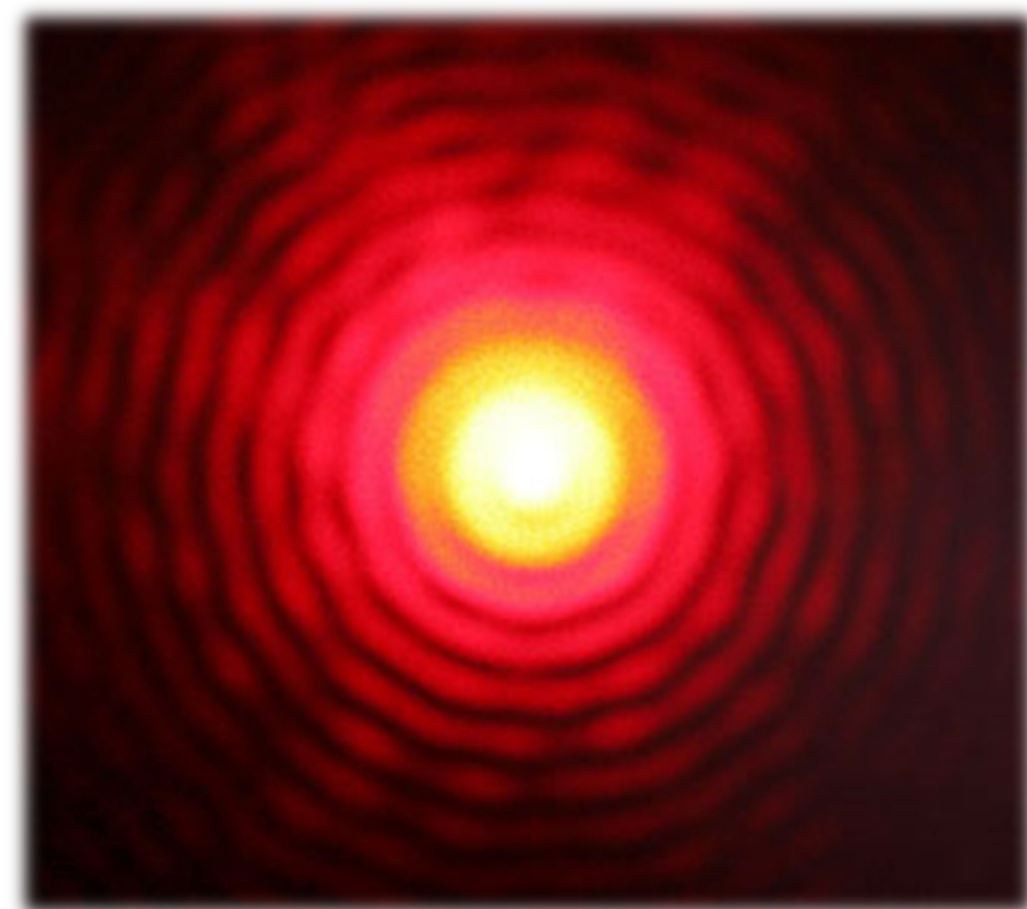




Diffrazione

La **diffrazione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda che incontra un ostacolo. Nel tentare di superarlo l'onda si allarga o si «spezza».

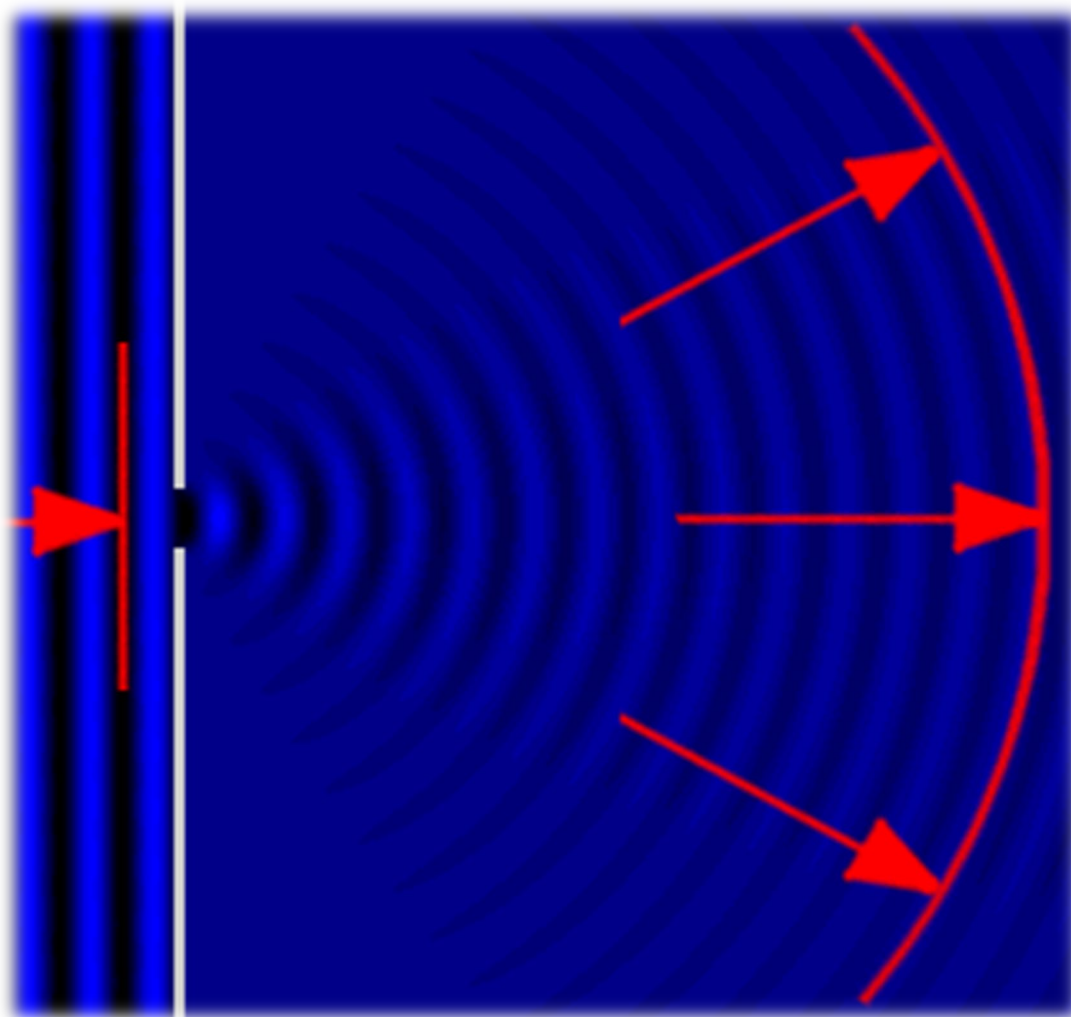
- **ATTENZIONE!** La diffrazione si verifica sotto determinate condizioni fisiche!
- Può essere vista come un tentativo da parte dell'onda di procedere nella direzione preclusa dall'ostacolo.



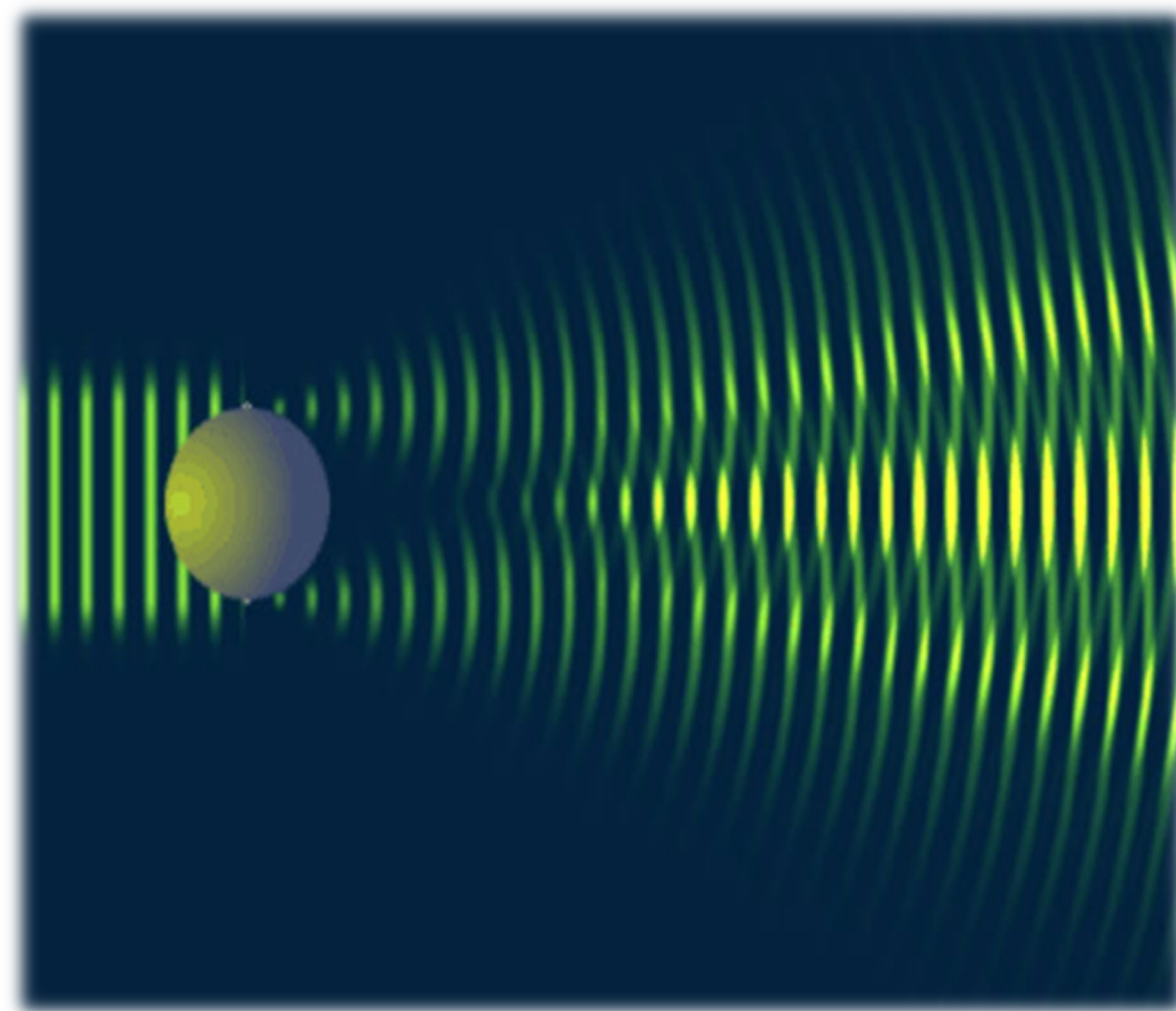


Diffrazione del suono

Affinché un'onda sonora che incontra un ostacolo o una fenditura sia diffratta, è necessario che la sua **lunghezza d'onda** sia molto più grande dell'ostacolo o fenditura.



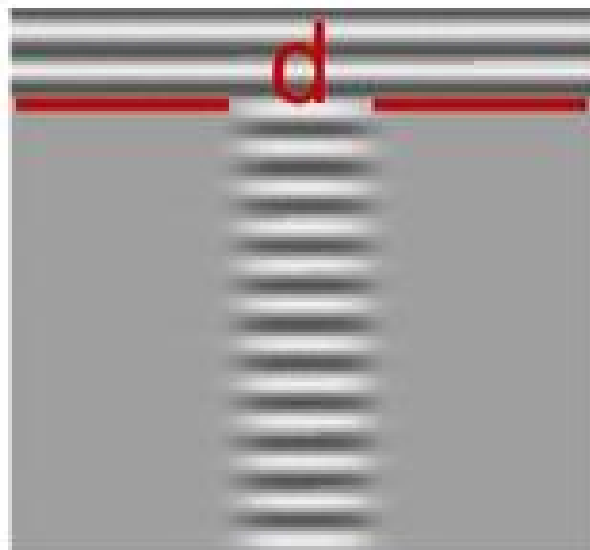
Fenditura



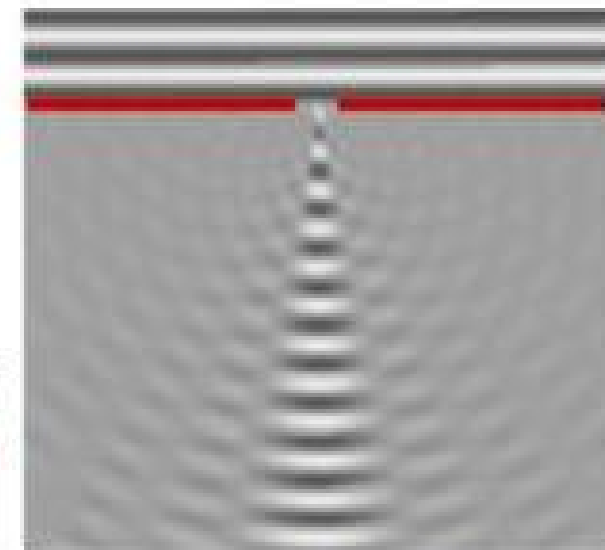
Ostacolo



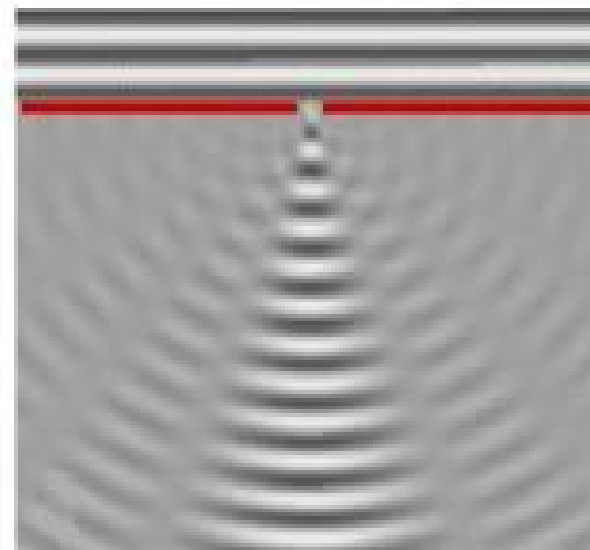
Diffrazione del suono – Esempio



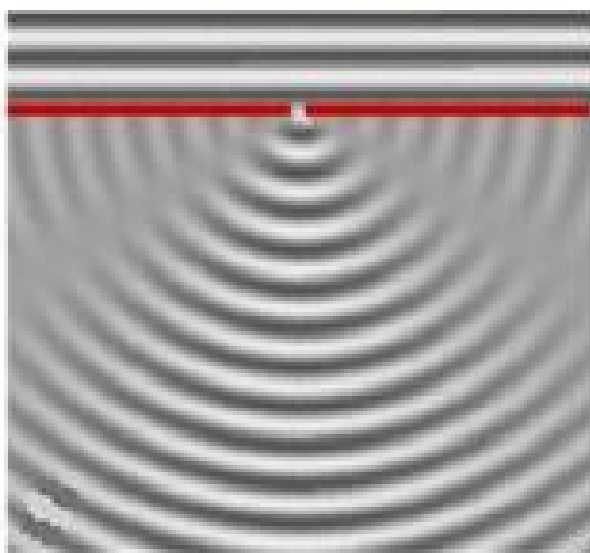
$$d \gg \lambda$$



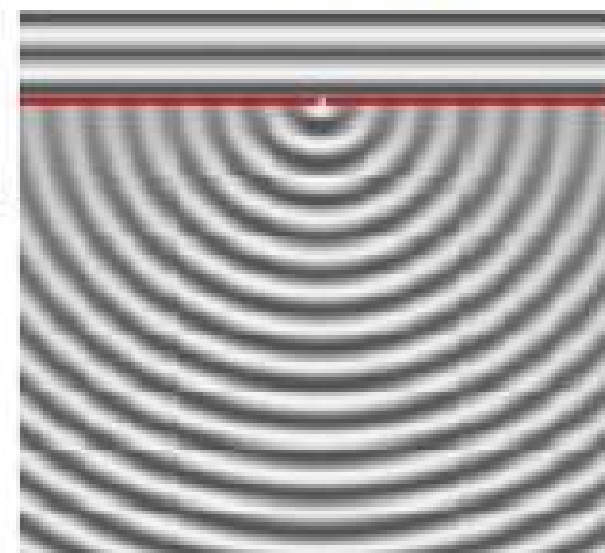
$$d > \lambda$$



$$d \sim \lambda$$



$$d < \lambda$$



$$d \ll \lambda$$



Diffrazione del suono – Fenomeni

I **suoni gravi** o a bassa frequenza aggirano più facilmente gli ostacoli rispetto a **suoni acuti** o alta frequenza. Il motivo è che a frequenze più basse corrispondono **lunghezze d'onda più grandi**, quindi anche con ostacoli non eccessivamente piccoli si può apprezzare la diffrazione. L'assenza di diffrazione sonora nel caso di lunghezze d'onda troppo piccole rispetto ad un ostacolo prende il nome di **ombra sonora**.

- Per gli esseri umani è quindi più difficile individuare la sorgente di un suono grave. Questo perché tendono ad aggirare la testa pervenendo ad entrambe le orecchie;
- La nostra bocca ha come scopo quello di migliorare la diffusione del suono sfruttando la diffrazione causata dal passaggio da una fenditura.



Frequenza – Variazione delle frequenza percepita

Ricordiamoci che:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{da cui segue} \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

Questo significa che variazioni della lunghezza d'onda o della velocità dell'onda, implicherebbero una variazione della frequenza.

Sappiamo dalla meccanica che se due corpi C_1 e C_2 si muovono ad una certa velocità v_1 e v_2 , la velocità di C_1 **percepita** da C_2 , in generale non sarà v_2 , ma dipenderà anche da v_1 . Possiamo concludere che se la sorgente o il ricevitore dell'onda sonora sono in movimento, allora la velocità da considerare nella relazione sopra non sarà più v !



Frequenza – Effetto Doppler

Attenzione! **Non** significa che la velocità nel mezzo di propagazione cambi ma che, dal punto di vista della sorgente o del ricevitore, bisogna considerare una componente **relativa**. Di conseguenza anche la **frequenza percepita** dal ricevitore sarà in generale diversa. Il fenomeno prende il nome di **Effetto Doppler**.

In particolare, sia f_0 la frequenza reale, v la velocità dell'onda nel mezzo, v_s la velocità della sorgente e v_r la velocità del ricevitore, allora la frequenza f effettivamente percepita sarà:

$$f = \left(\frac{v - v_r}{v - v_s} \right) f_0$$



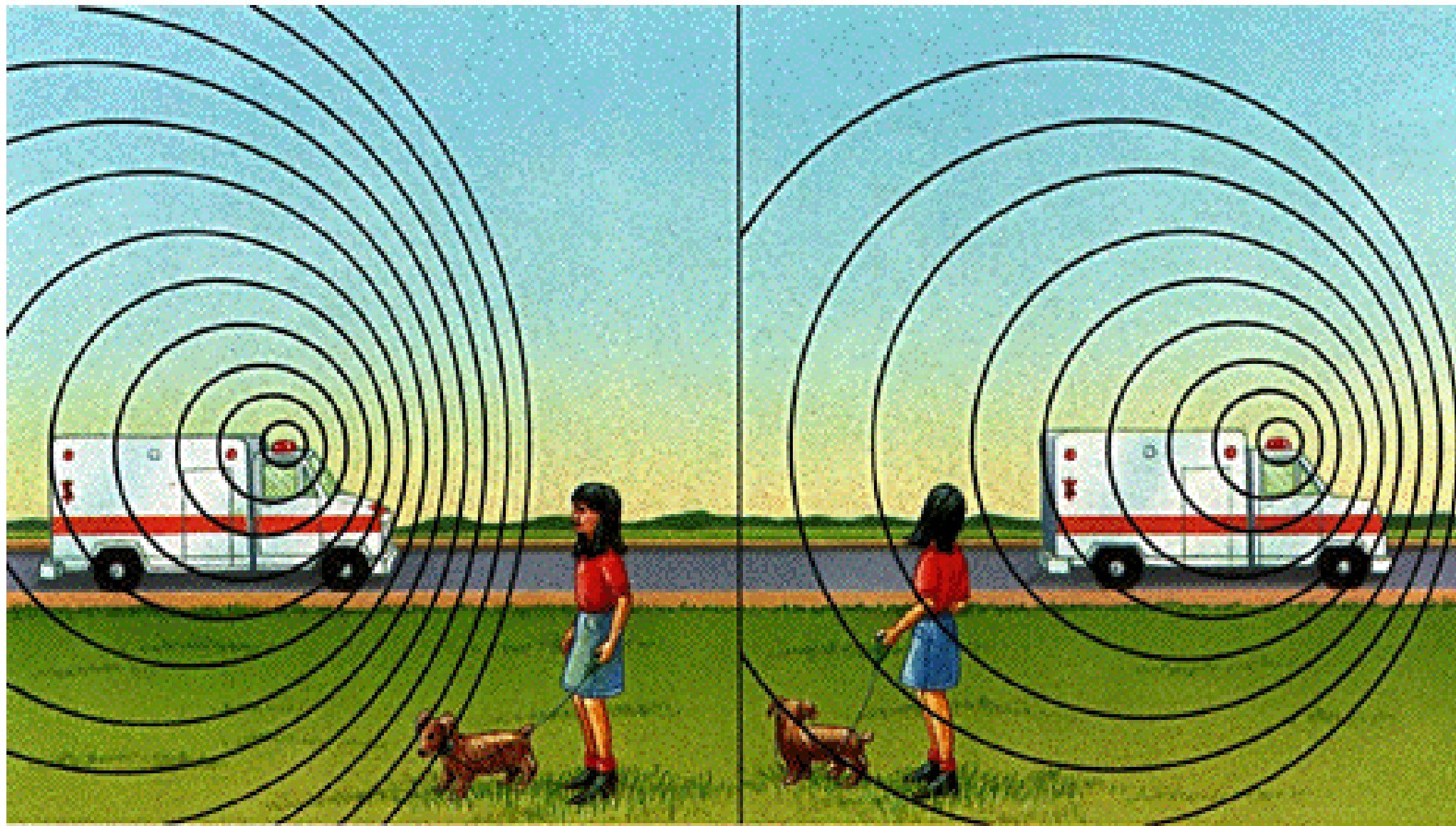
Frequenza – Formula effetto doppler

Nota bene:

- Nella formula vista, il segno di v_s e v_r sarà positivo se il verso sarà lo stesso di v , negativo altrimenti;
- La formula vale solo per valori di v_s e v_r che non azzerino il denominatore e non diano luogo a frequenze negative.
- Se il denominatore si azzerava, cioè $v = v_s$, la sorgente segue l'onda sonora emettendo oscillazioni sovrapposte che giungeranno tutte in una volta al ricevitore (Bang supersonico).
- Se v_s supera v , allora le oscillazioni emesse dalla sorgente arriveranno all'ascoltatore in ordine inverso. Questo accade perché le oscillazioni emesse saranno superate dalla sorgente stessa.



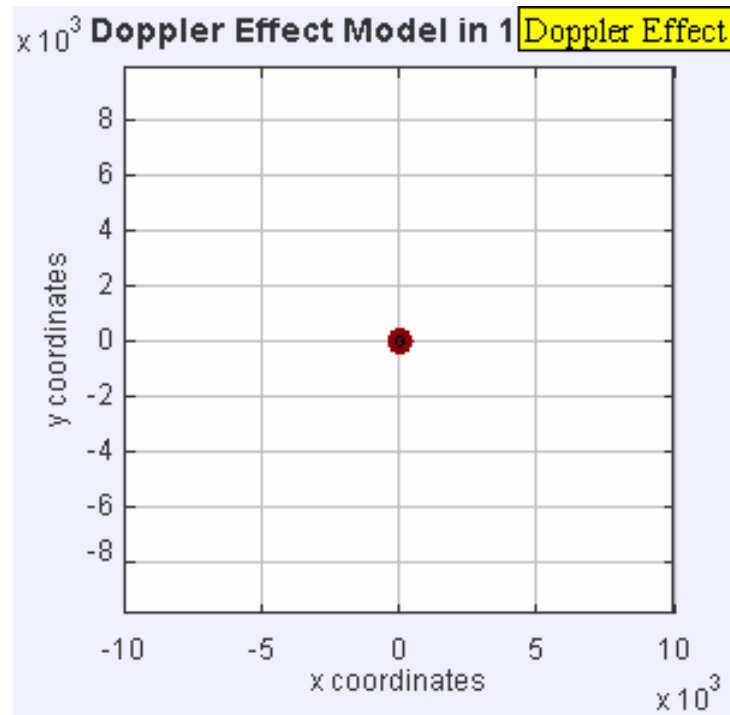
Effetto Doppler – Esempi



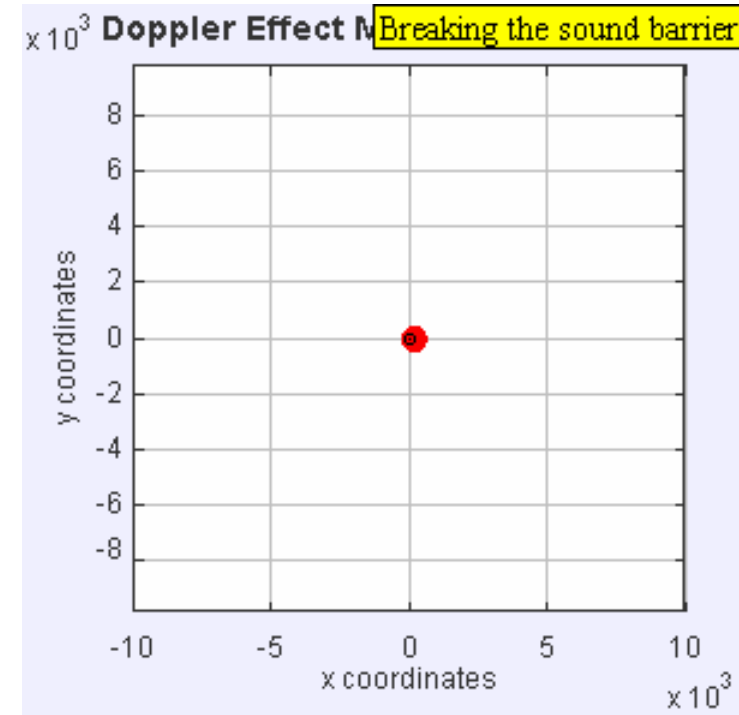
Le sirene vengono udite ad una frequenza più alta quando ci vengono incontro, e ad una frequenza più bassa quando si allontanano.



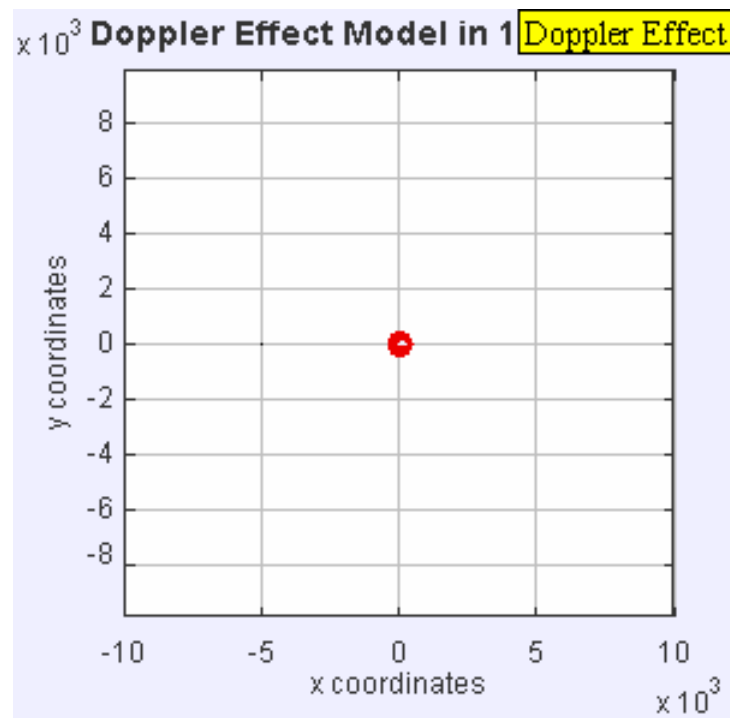
Effetto Doppler – Esempi



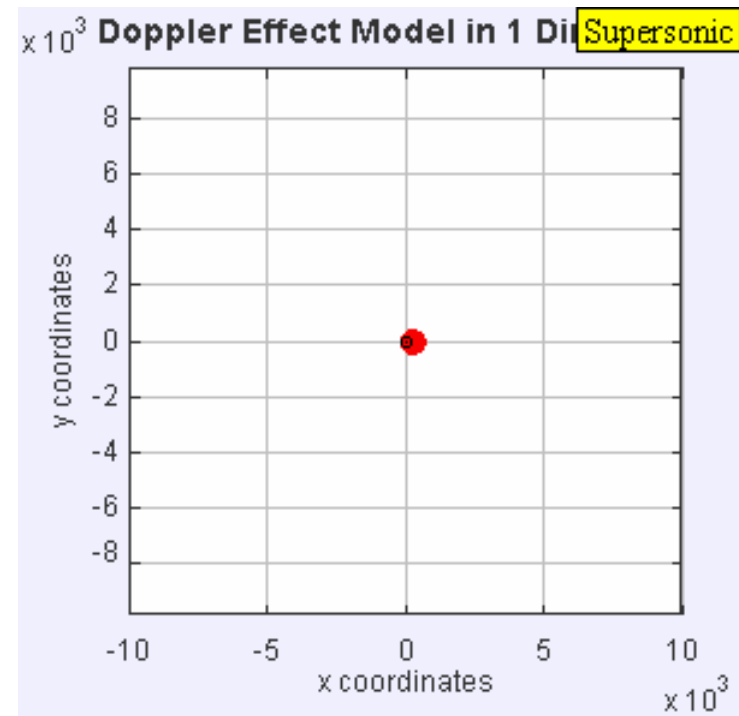
Sorgente
Ferma



Sorgente a
velocità del
suono



Sorgente a
velocità
inferiore a
quella del
suono.



Sorgente a
velocità
superiore al
suono