

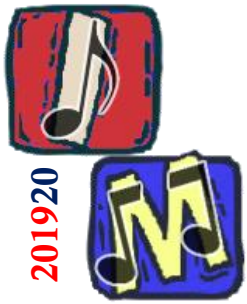


# Acustica

## Parte 4

---

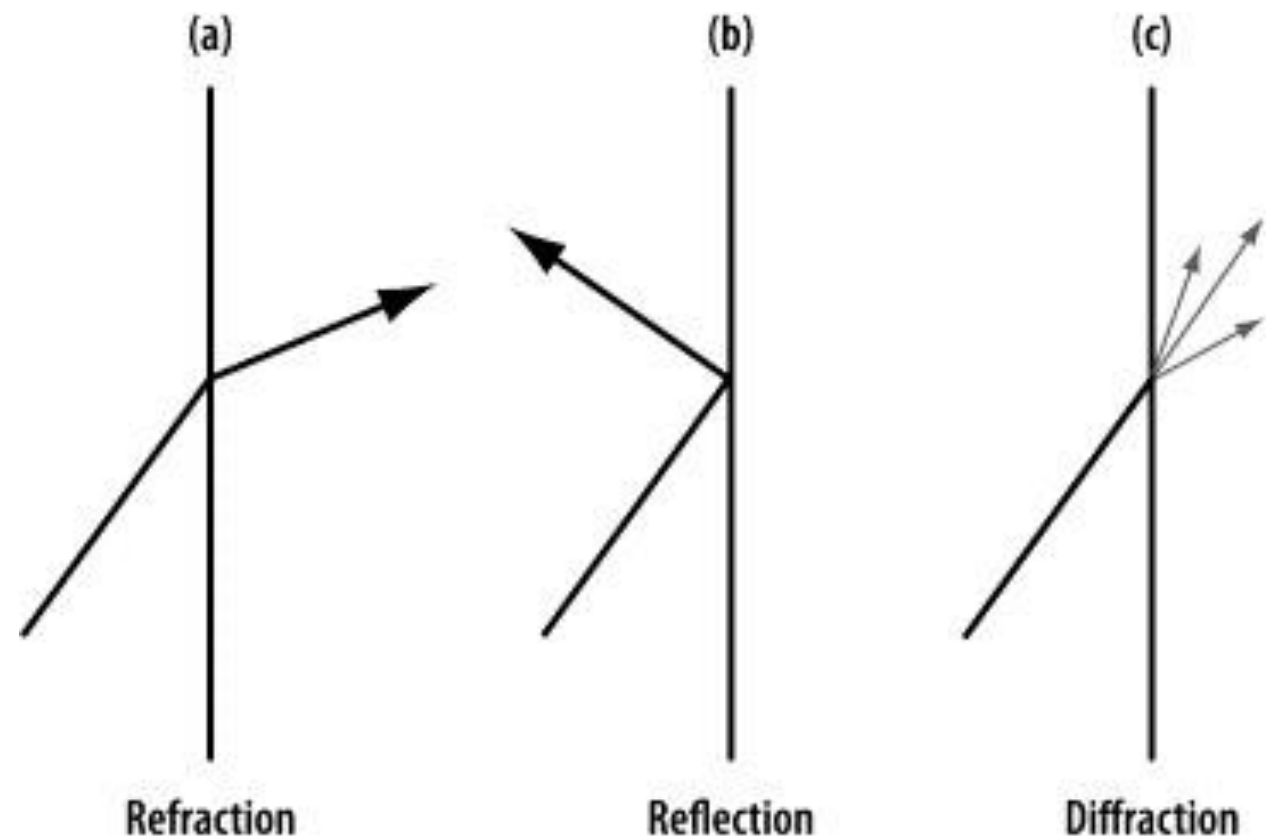
Prof. Filippo Milotta  
[milotta@dmi.unict.it](mailto:milotta@dmi.unict.it)

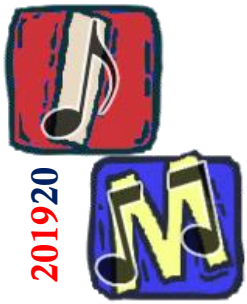


# Deviazione delle onde sonore

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

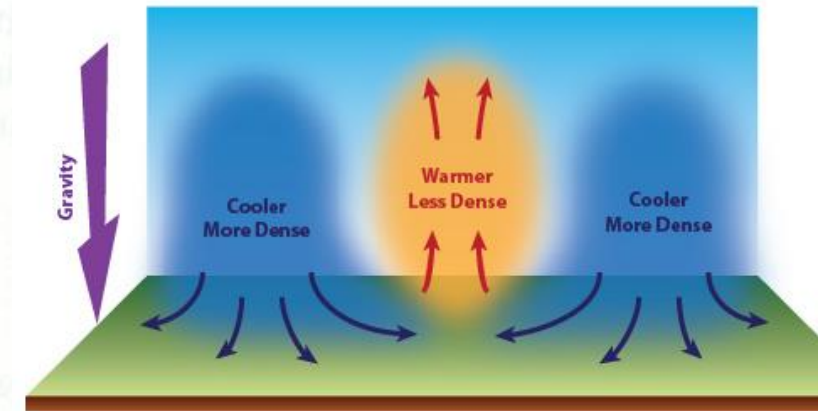
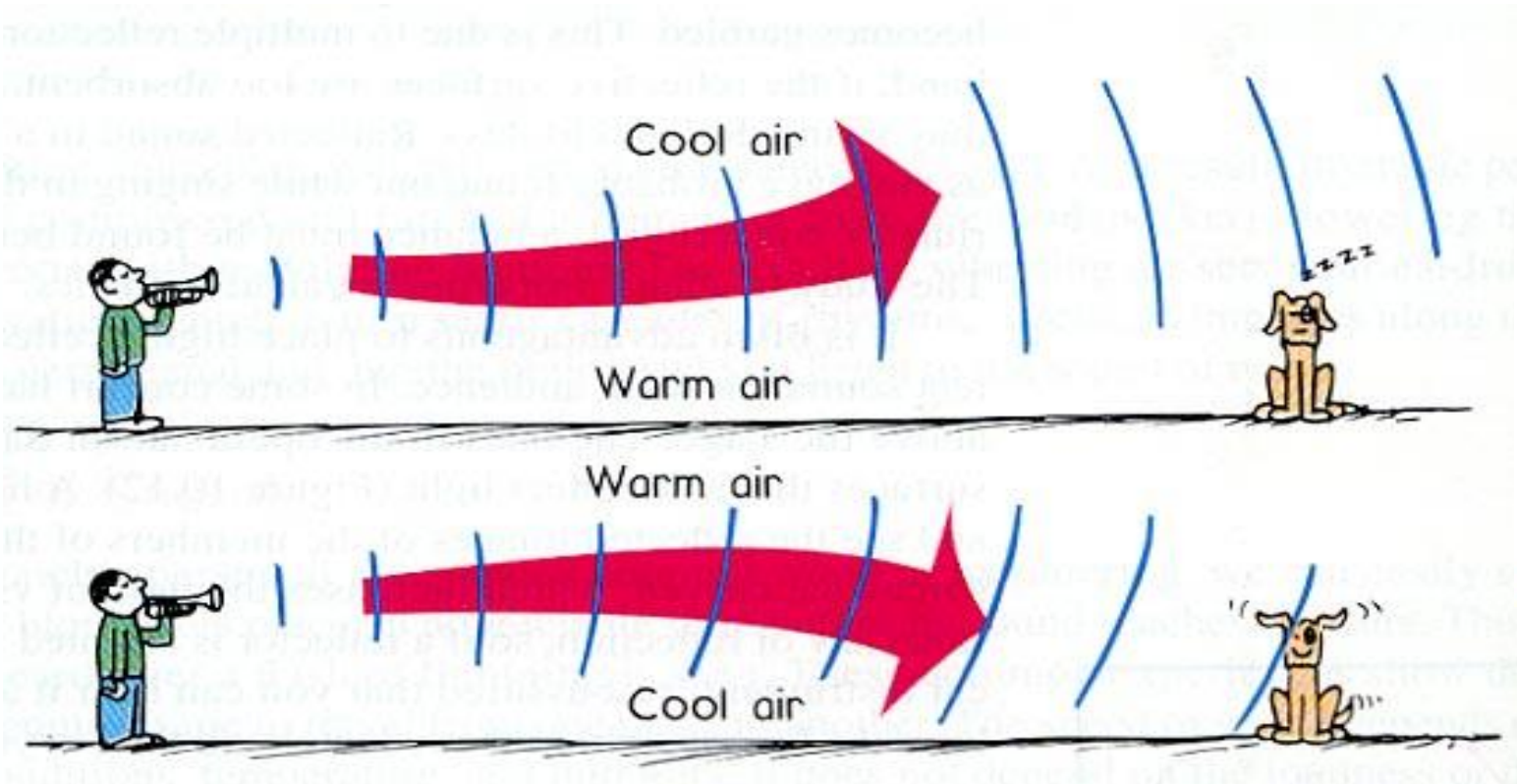
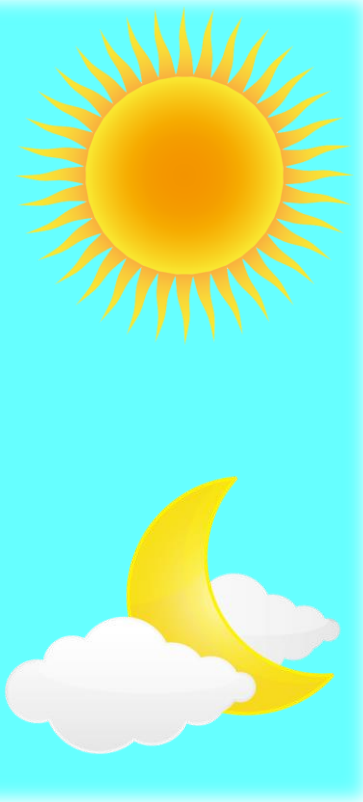
La **rifrazione** è un fenomeno fisico che consiste nella deviazione di un'onda causata da una variazione nella velocità di propagazione della stessa.

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

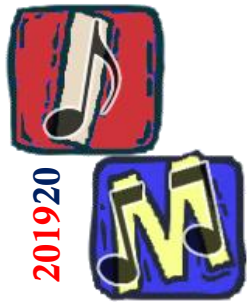




# Rifrazione del suono - Fenomeni



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.

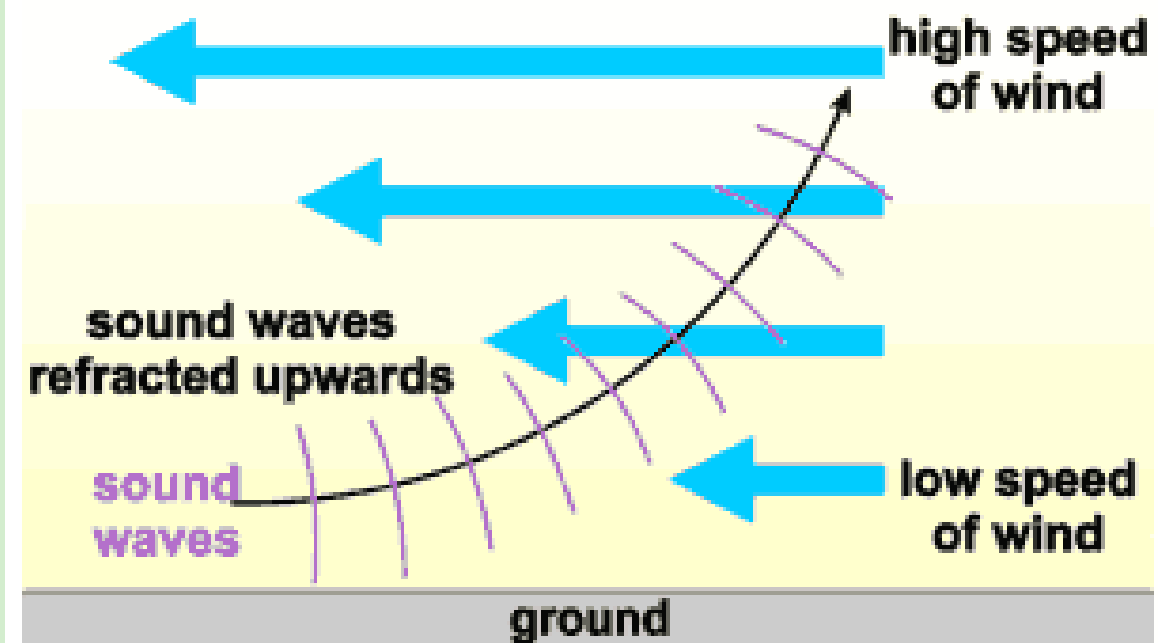
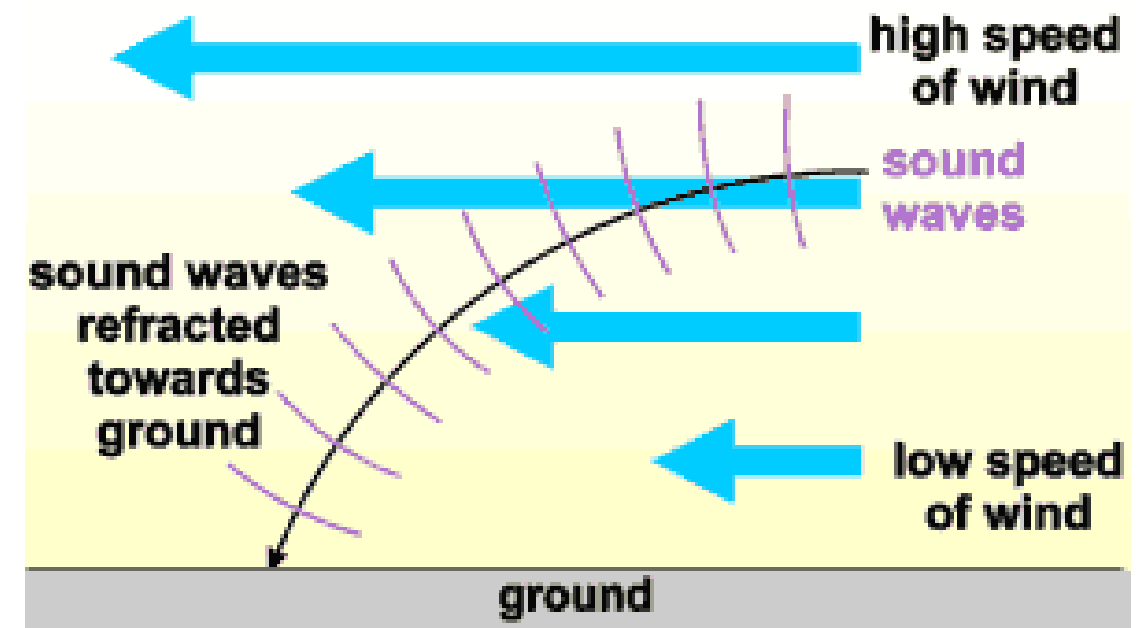


# Rifrazione del suono - Fenomeni

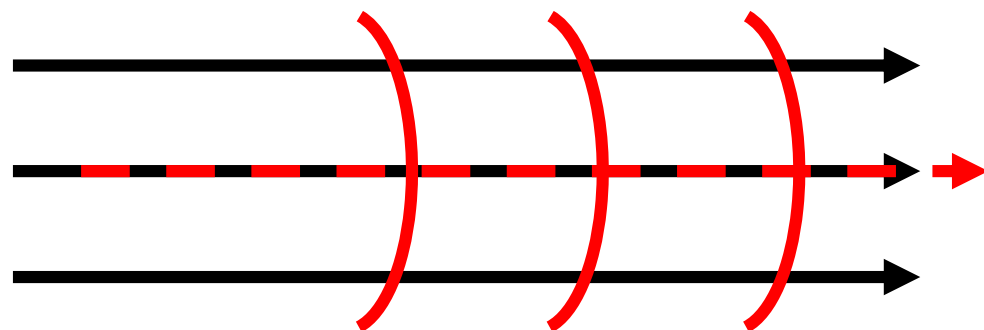
## Il vento trasporta le parole?

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.

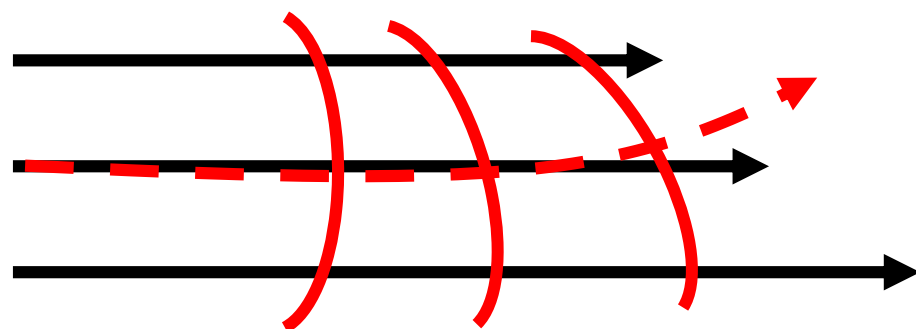
Per questo si ha l'impressione che il vento «trasporti» le parole. In realtà le onde vengono deviate e non trasportate.



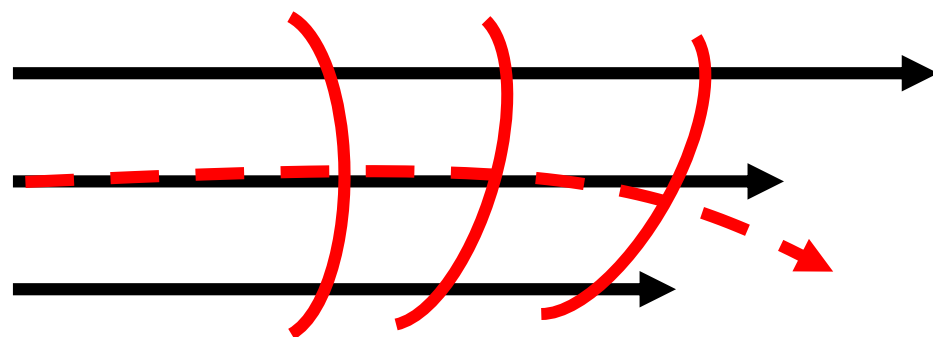
# Un altro modo per rappresentare quanto visto prima



- Condizione normale



- Onde più lente in alto e più veloci in basso
- → L'onda sonora tende a salire
- Sarà meno percepibile in basso



- Onde più lente in basso e più veloci in alto
- → L'onda sonora tende a scendere
- Sarà più percepibile in basso

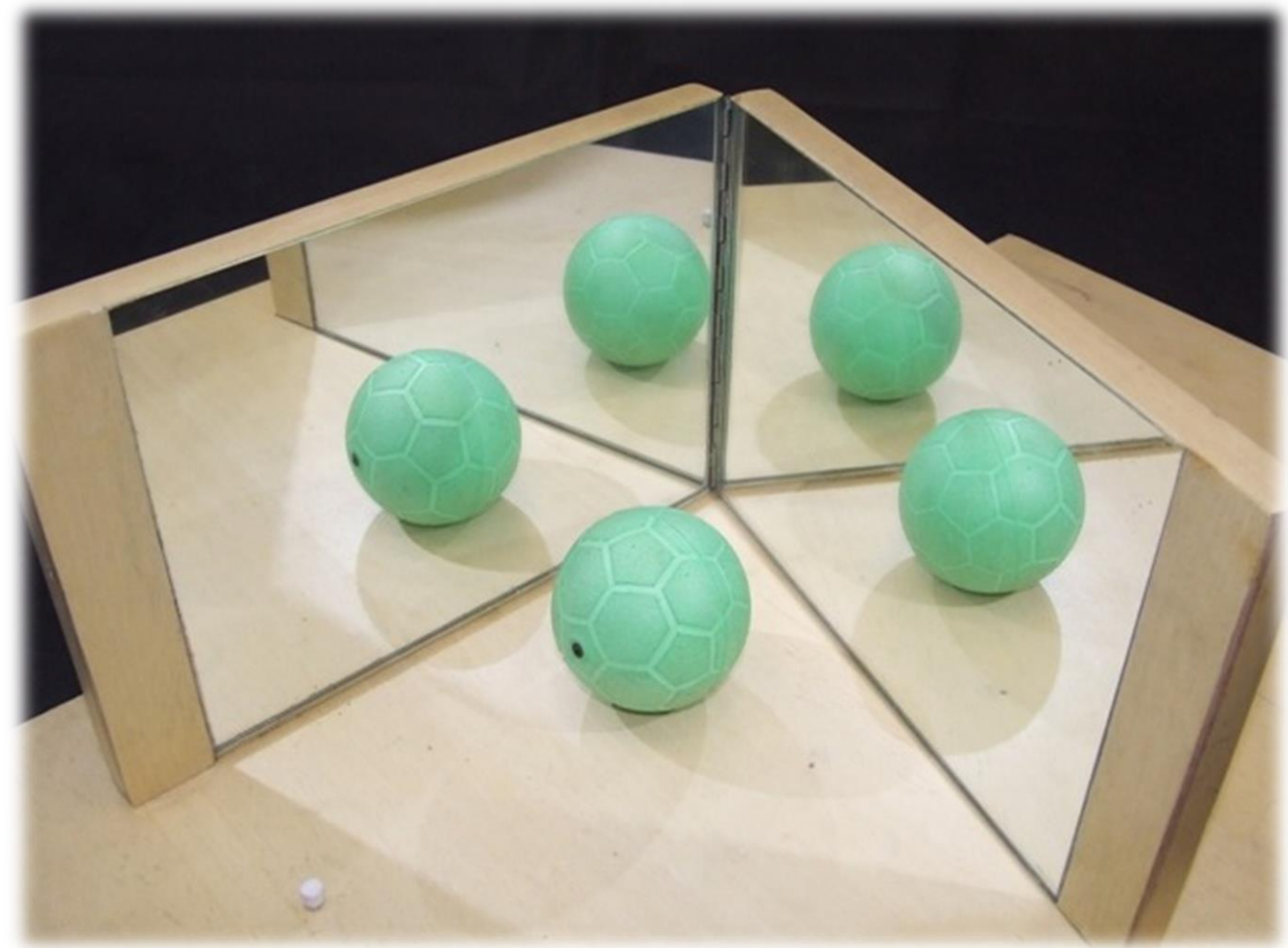




# Riflessione

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  $\Delta t$  che essa impiega per andare e tornare vale:

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

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



# 3D laser Scanner a tempo di volo

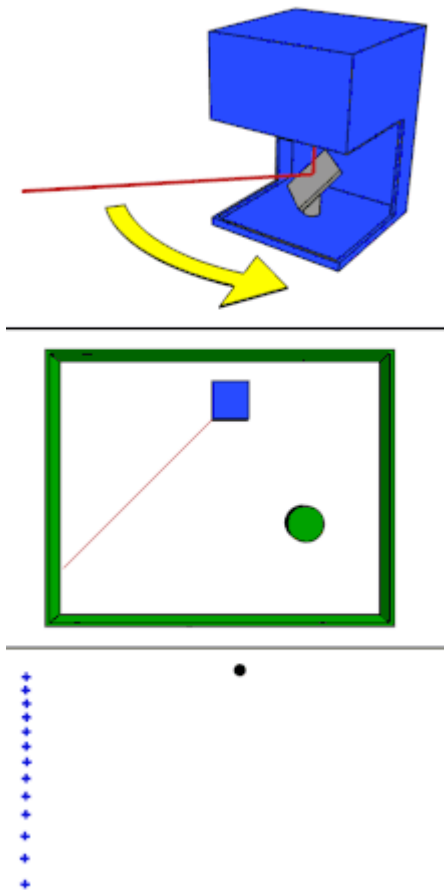
## Hardware

*Un approfondimento da Multimedia*

### LIDAR

Light Detection And Ranging

→ È un concetto simile al SONAR





# 3D laser Scanner a tempo di volo

## Metodo (1)

Si basa su un concetto molto semplice:

La velocità della luce è una grandezza scalare conosciuta; per questo motivo è possibile sapere quanto tempo impiega un fascio laser a raggiungere la superficie di un oggetto ed essere riflesso indietro verso il sensore.

Il tempo impiegato dal fascio di luce (solitamente un fascio laser) raggiungere il punto della superficie dell'oggetto ed essere riflesso prende il nome di ***RTT*** (acronimo di *Round Trip Time*)



# 3D laser Scanner a tempo di volo

## Metodo (2)

Il *RTT* considera due volte la distanza che separa lo scanner e la superficie dell'oggetto.

Dato  $t = RTT$  e  $c = 300000 \text{ km/s}$

è possibile misurare la distanza con la formula

$$d = \frac{(c * t)}{2}$$

A diagram showing a light pulse (represented by a horizontal line) traveling from a scanner (represented by a vertical line) to a surface (represented by a horizontal line) and reflecting back. The distance from the scanner to the surface is labeled 'D'. The total distance traveled by the light is labeled '2D'. The time taken for the light to travel this distance is labeled 'Δt'. The speed of light is labeled 'c'.

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

*L'accuratezza è data dalla precisione con cui si è in grado di misurare il tempo  $t$   
(es. 3.3 picosecondi è il tempo che impiega la luce a percorrere 1 millimetro).*

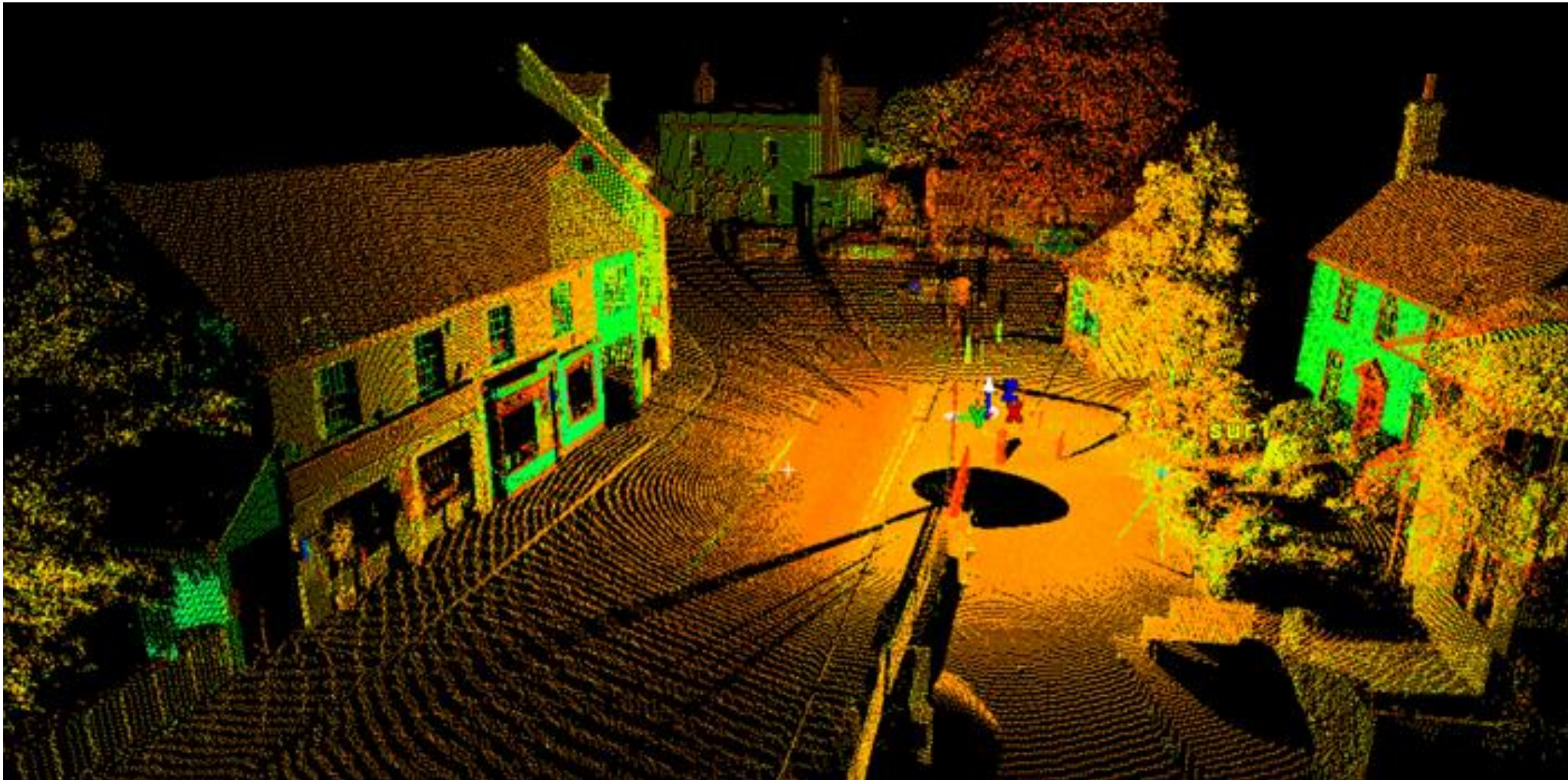
[Jim Morrison]



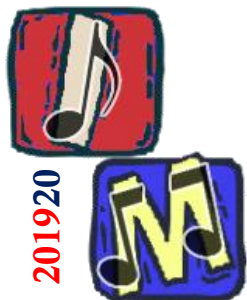


# 3D laser Scanner a tempo di volo

## Risultato



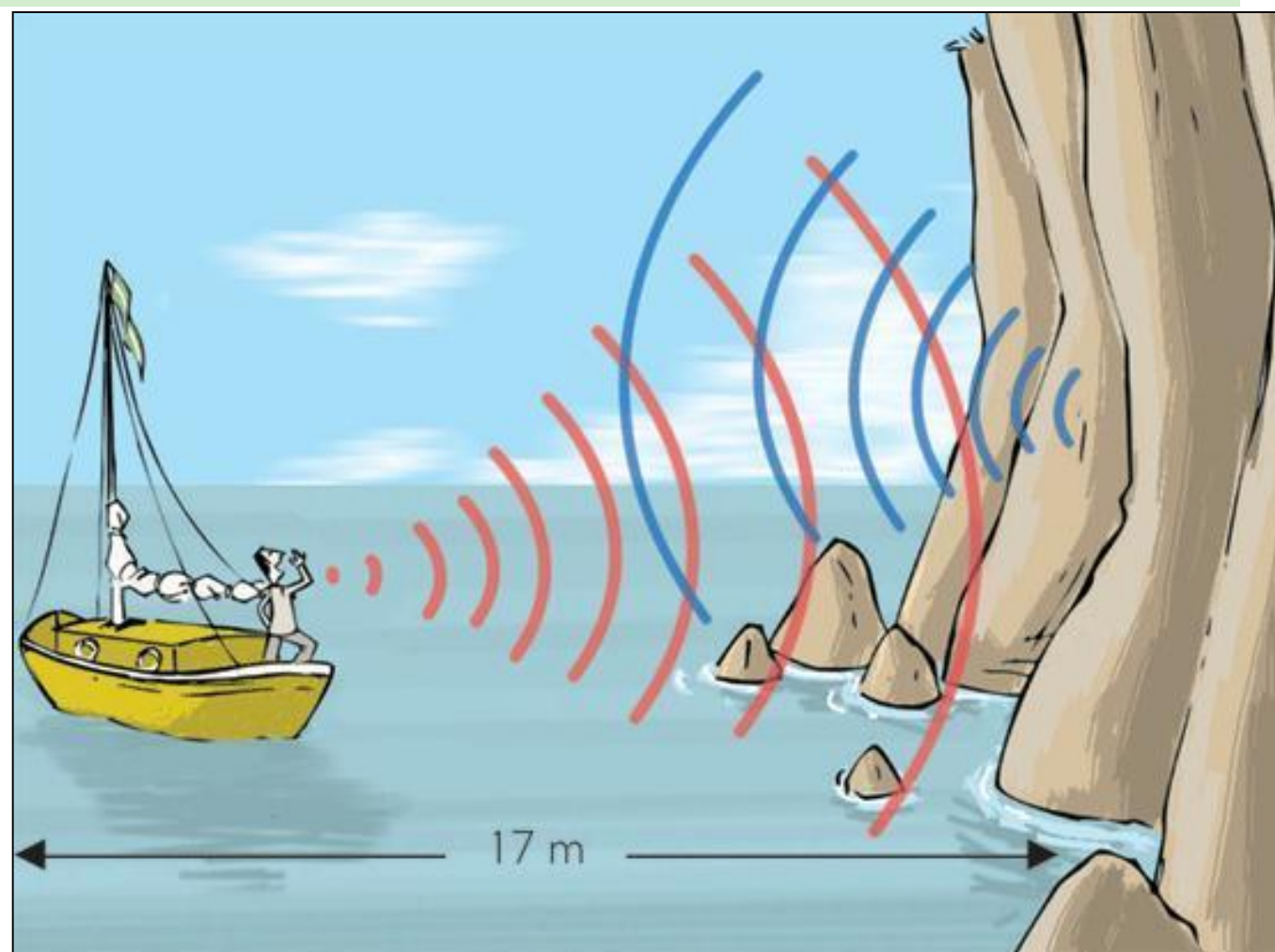


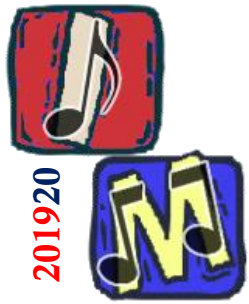


# Riflessione del suono – Eco

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:

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

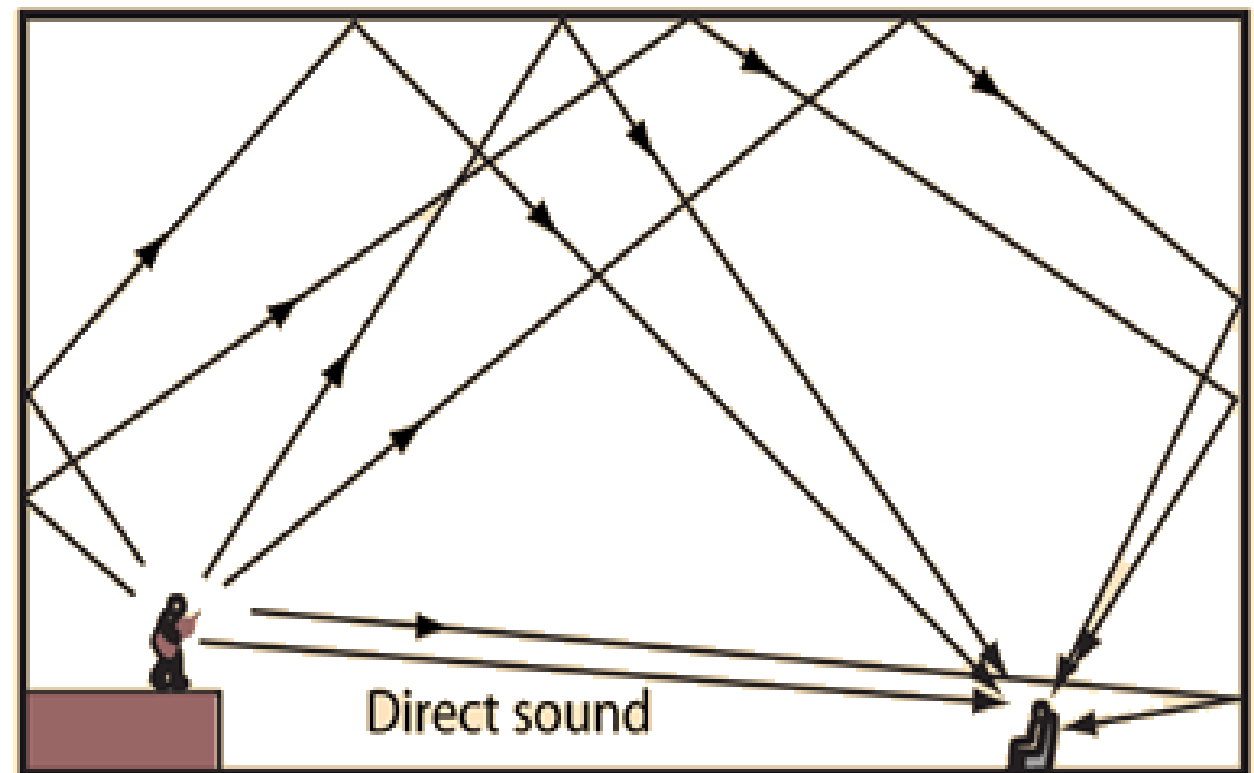
$$D \cong \frac{343 \times 0.1}{2} \cong 17 \text{ m}$$



# 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.

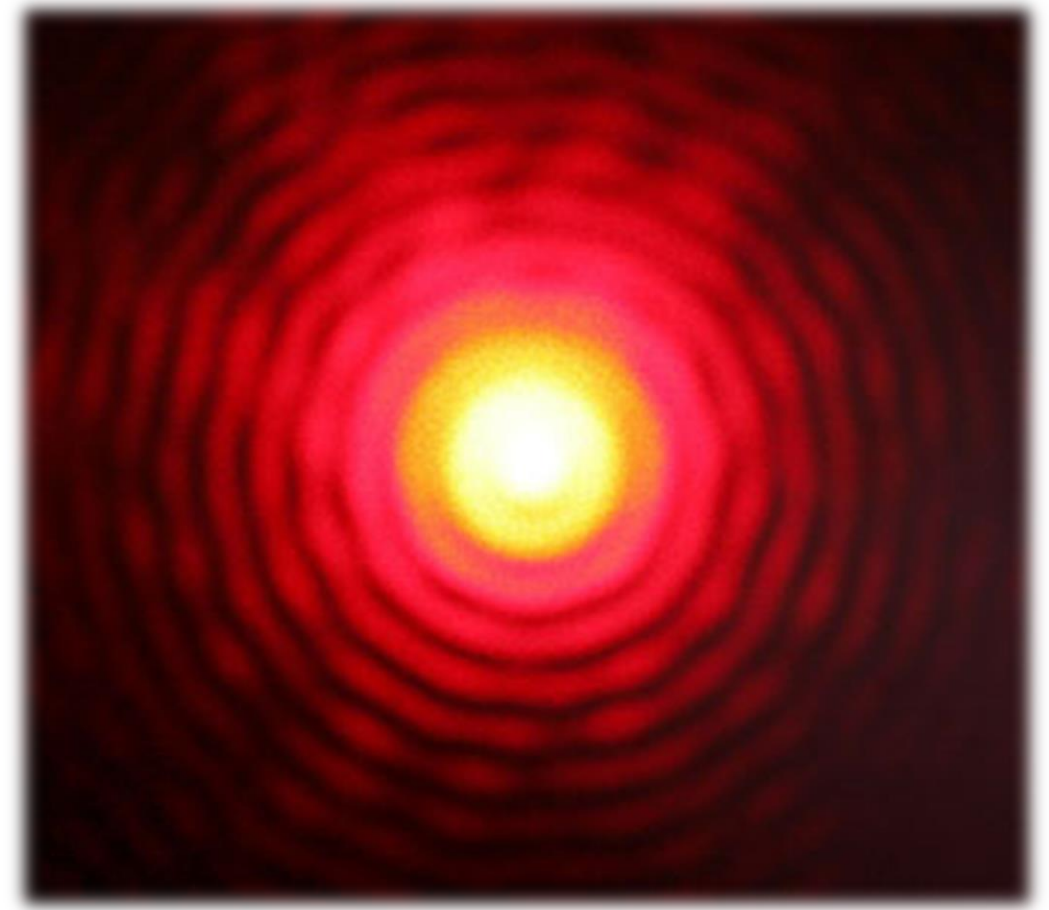




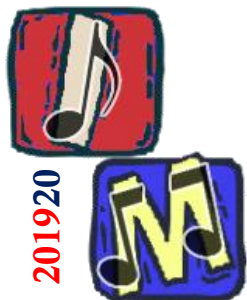
# Diffrazione

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.

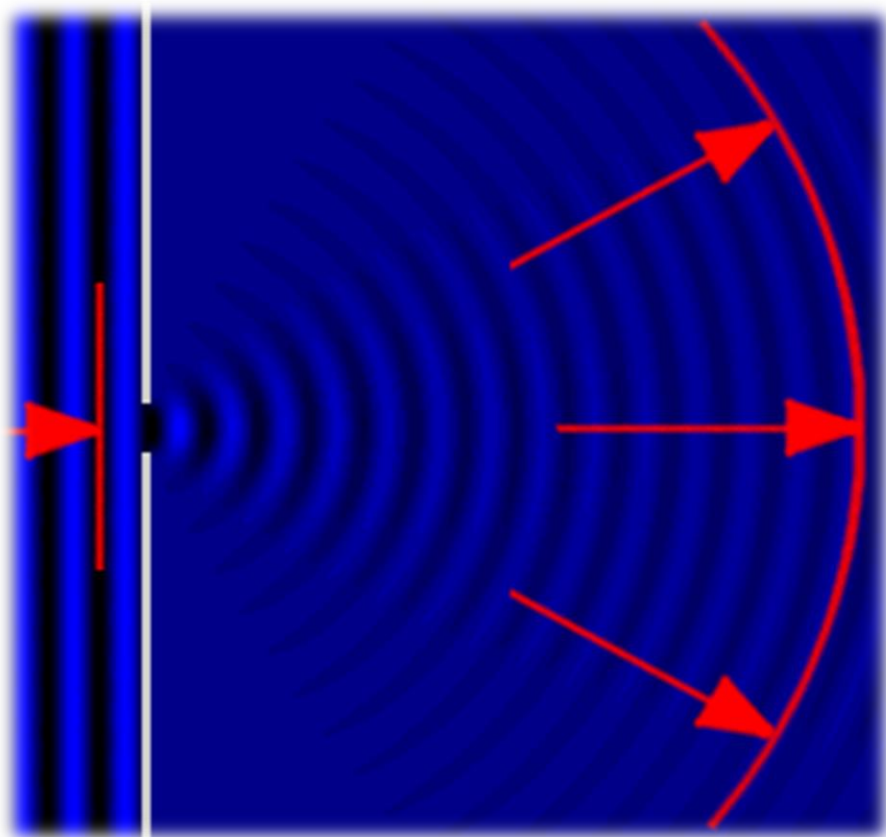




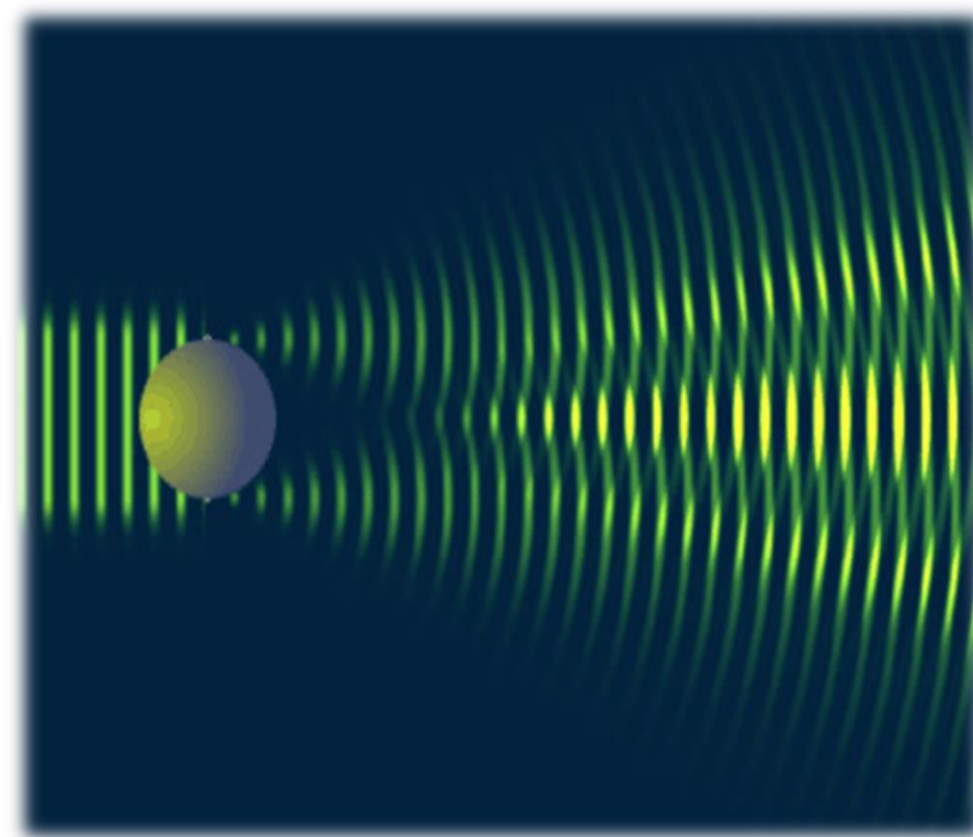


# Diffrazione del suono

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.



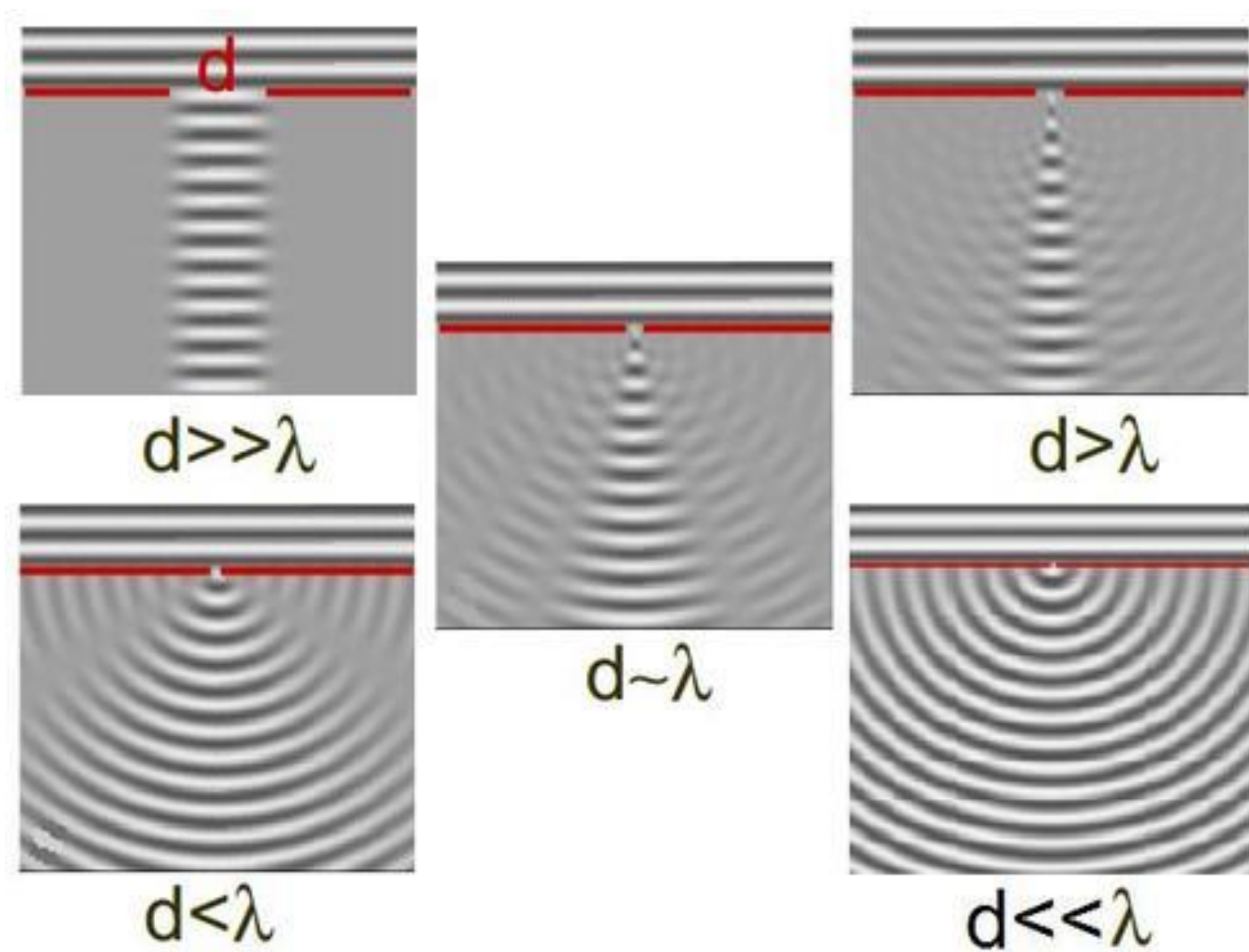
Fenditura



Ostacolo



# Diffrazione del suono – Esempio

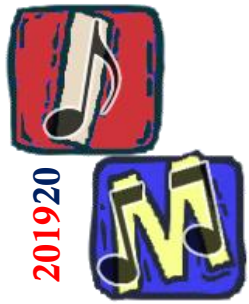




# Diffrazione del suono – Fenomeni

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 dovute al moto

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  $v$ !

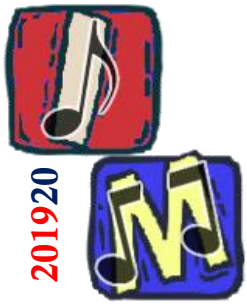


# Frequenza – Effetto Doppler

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:

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



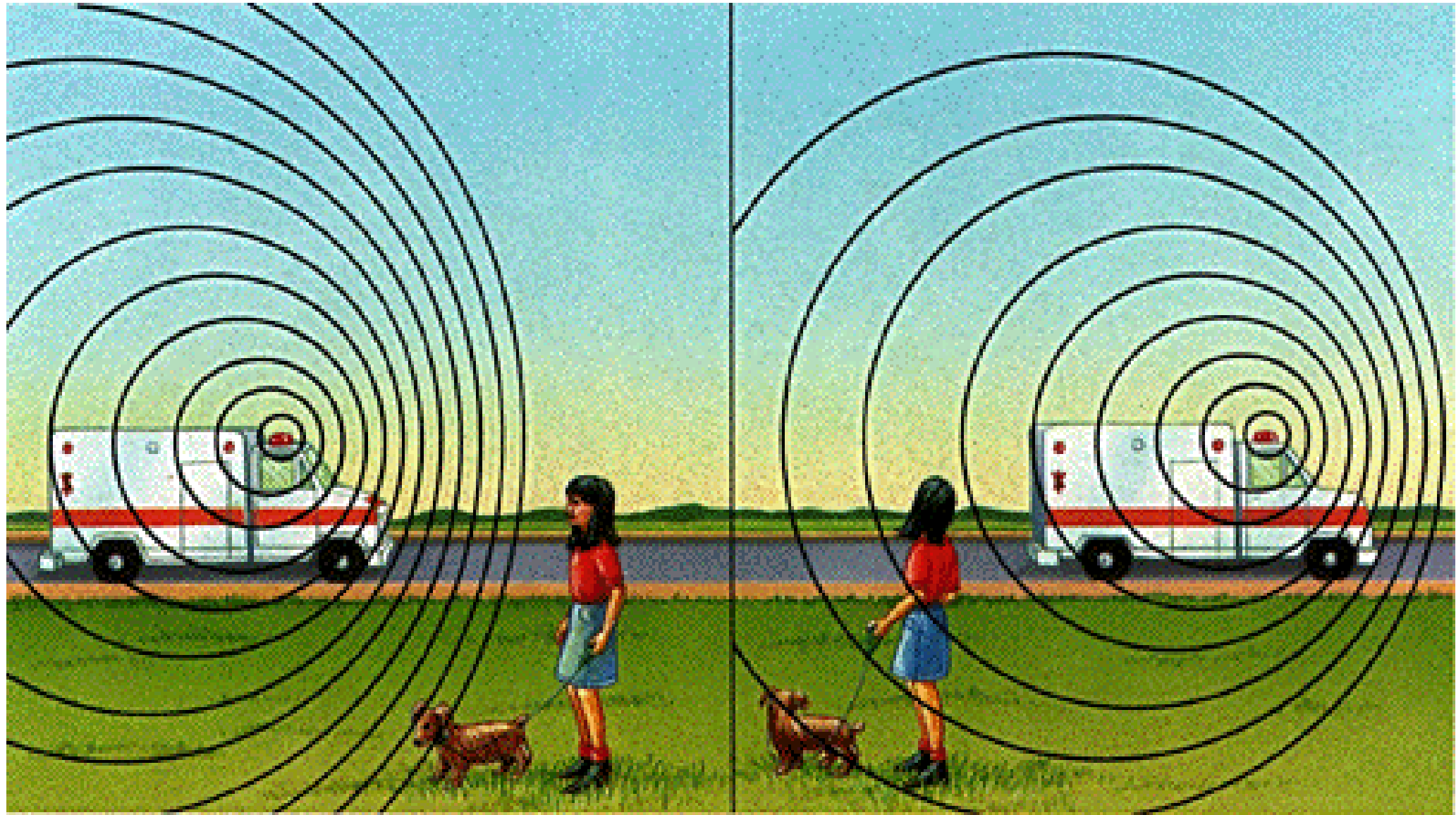
# Frequenza – Formula effetto doppler

## 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



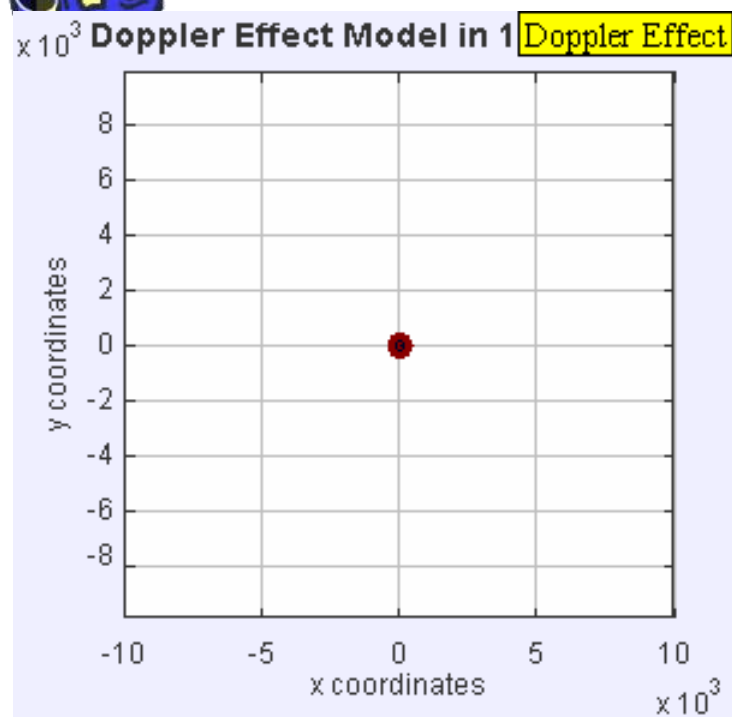
Le sirene vengono udite ad una frequenza più alta quando ci vengono incontro, e ad una frequenza più bassa quando si allontanano.



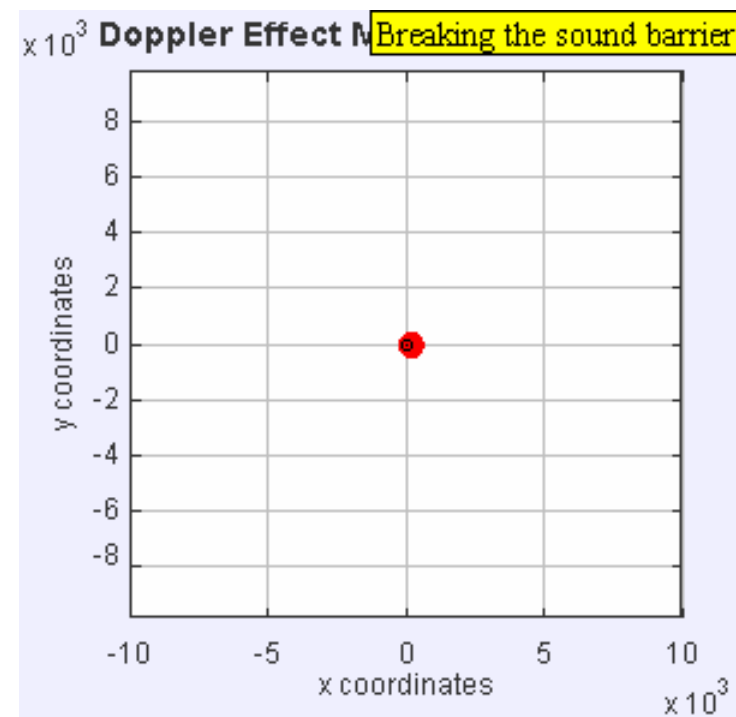
201920



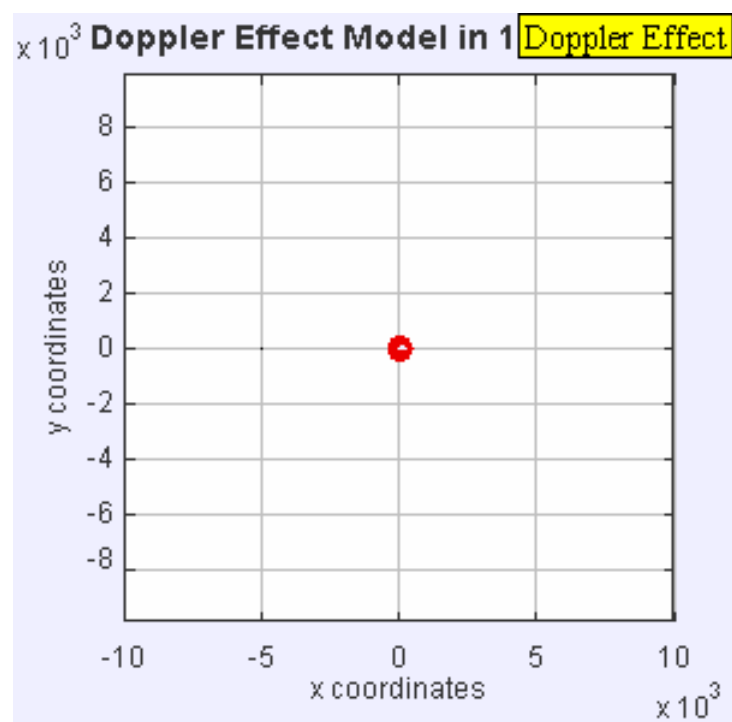
# Effetto Doppler – Esempi



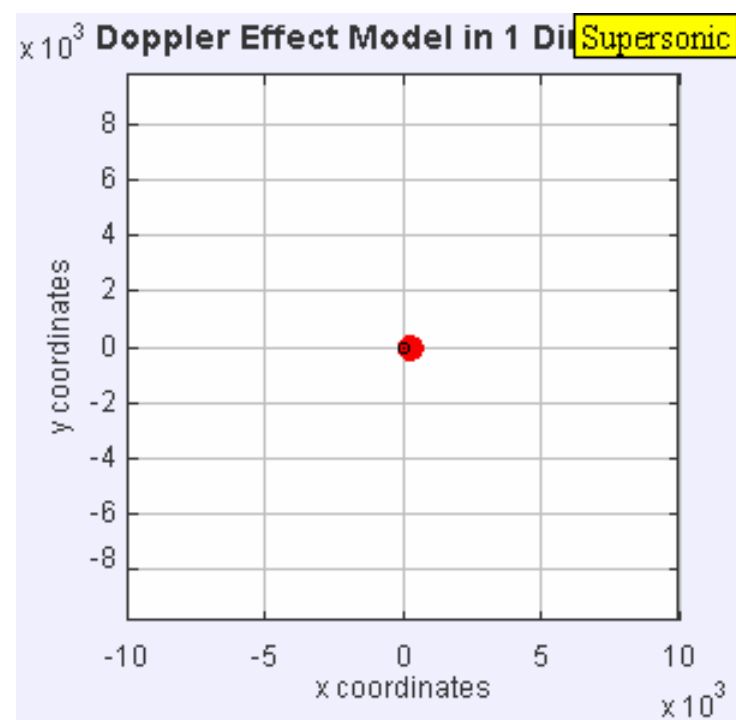
Sorgente  
Ferma



Sorgente a  
velocità del  
suono



Sorgente a  
velocità  
inferiore a  
quella del  
suono.

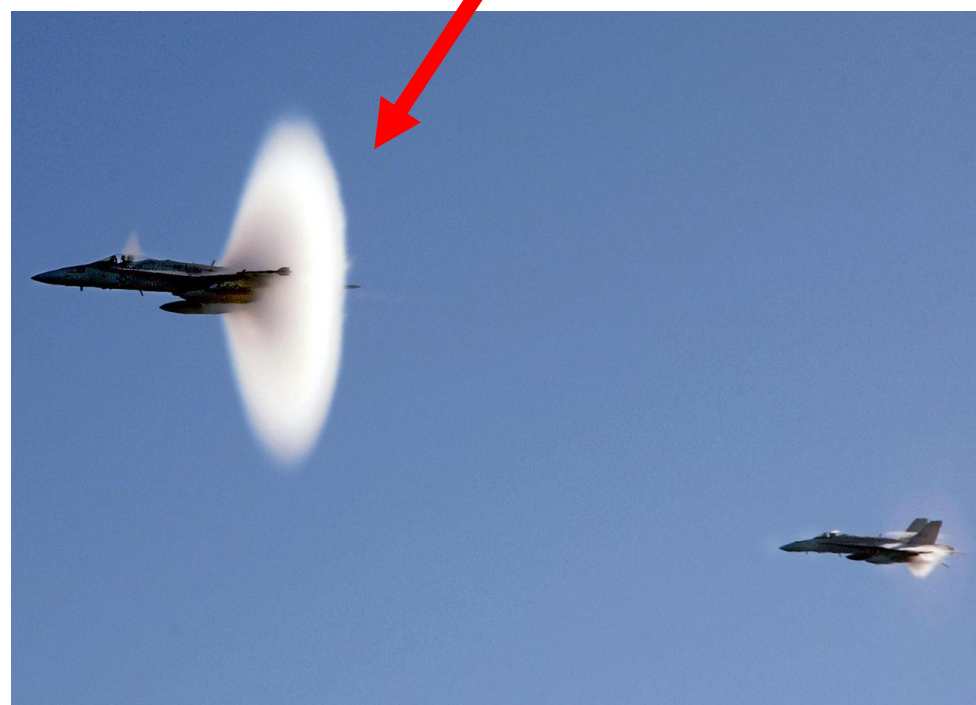
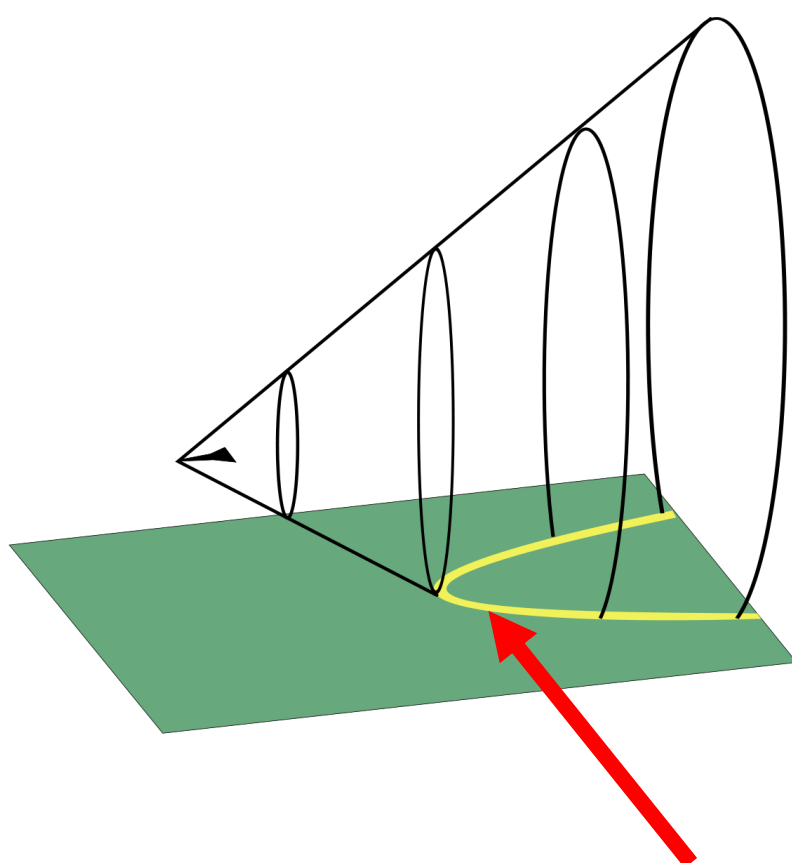


Sorgente a  
velocità  
superiore al  
suono

# Bang Supersonico e Mach

$$331,6 \frac{m}{s} = 331,6 * 60 * 60 \frac{m}{h} = 1.193.760 \frac{m}{h} = 1.193 \frac{km}{h}$$

Cono di Mach



Mach	Km/h
0	0
1	1226
2	2451,2
3	3675,4
4	4900,5
5	6125,3
6	7350,1
7	8575,4
8	9800,2
9	11.025,3
10	12.250,1

Zona di udibilità del Bang Supersonico



# 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**.



# Esercitazione Pratica

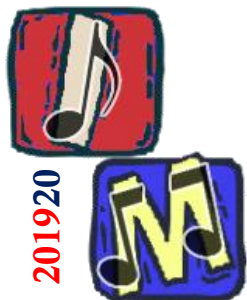
## (dal testo)

### ■ 1.8.1 – Toni puri

In un editor audio generare un'onda sinusoidale.

- Selezionare più valori di frequenza e ampiezza e creare più tracce
- Verificare frequenze interessanti, ad esempio:
  - 16 Hz
  - 20 Hz (soglia minima di udibilità)
  - 16 KHz
  - 20 KHz (soglia massima di udibilità)





# 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.



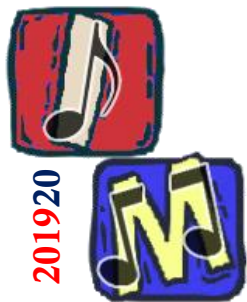
# Frequenza dei suoni – Alti e bassi

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.

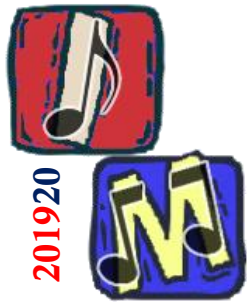


# Frequenza dei suoni – Alti, medi, bassi

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

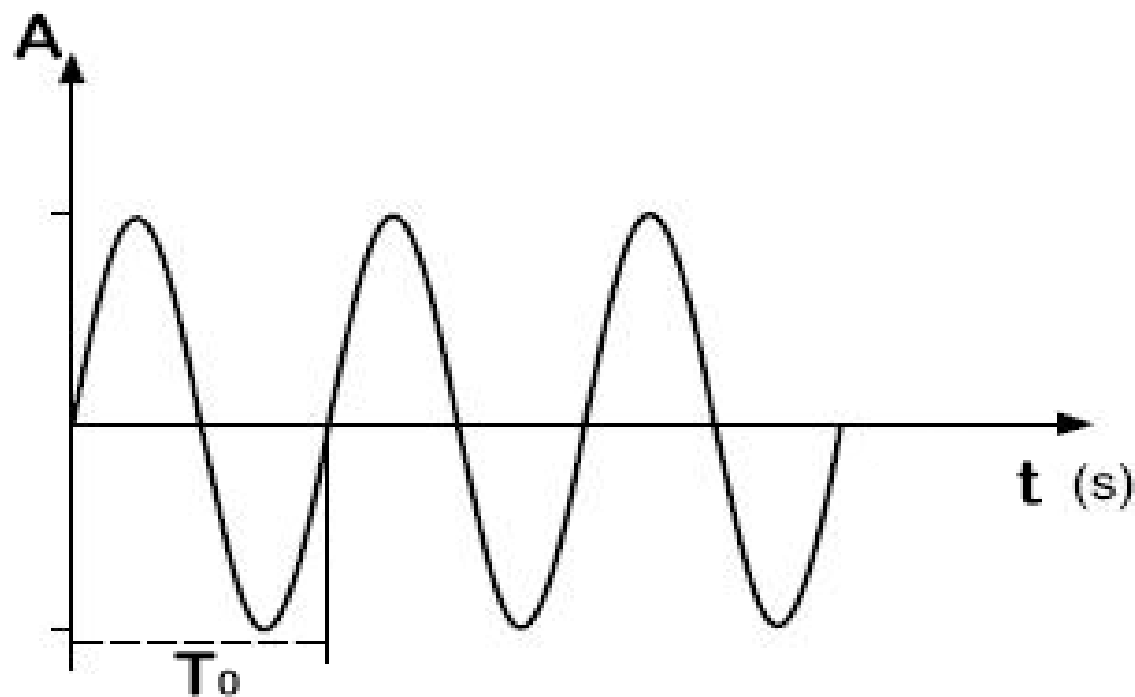
Intervallo frequenza	Tipo
20 – 500 Hz	Bassi
500 – 8000 Hz	Medi
8000 – 20000 Hz	Alti

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

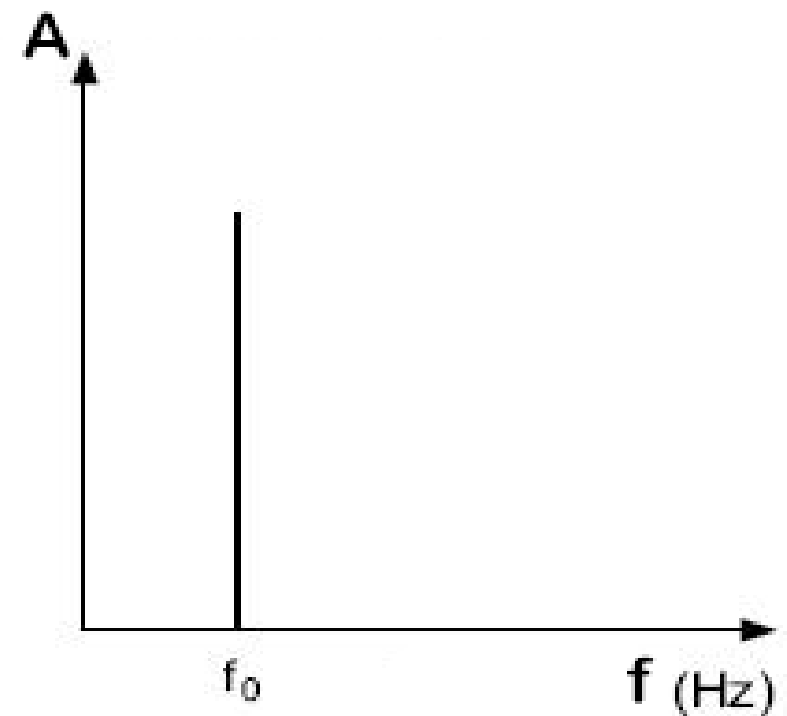


# Frequenza dei suoni – Tono puro

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.

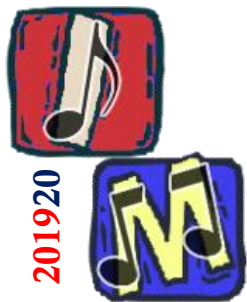


Forma d'onda



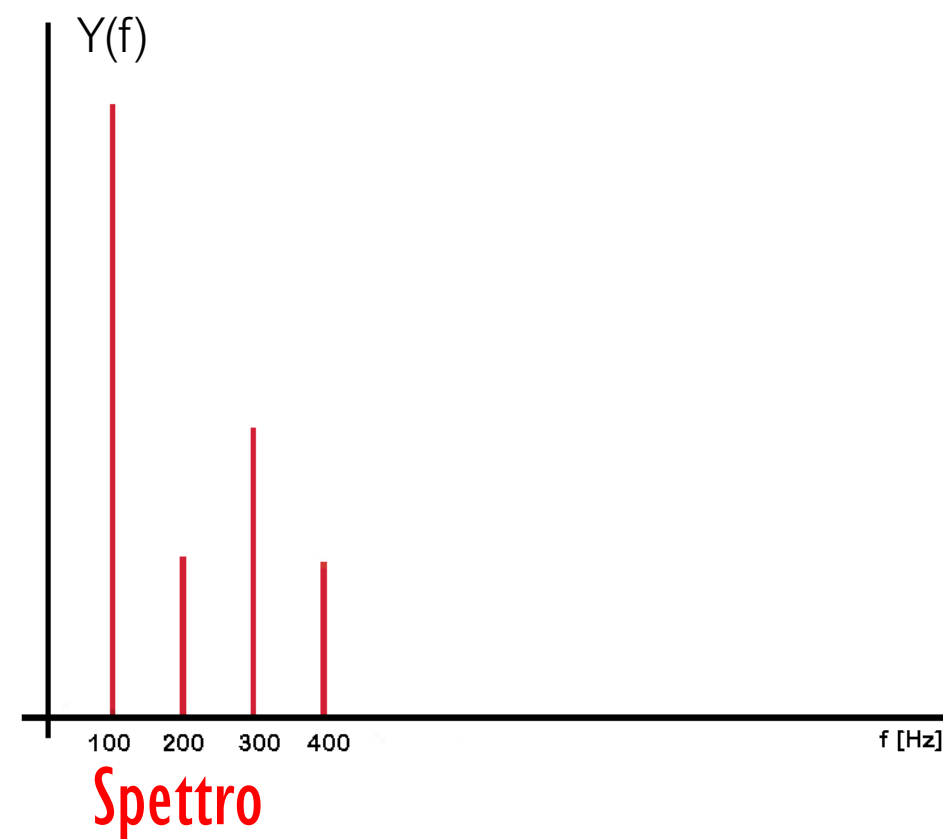
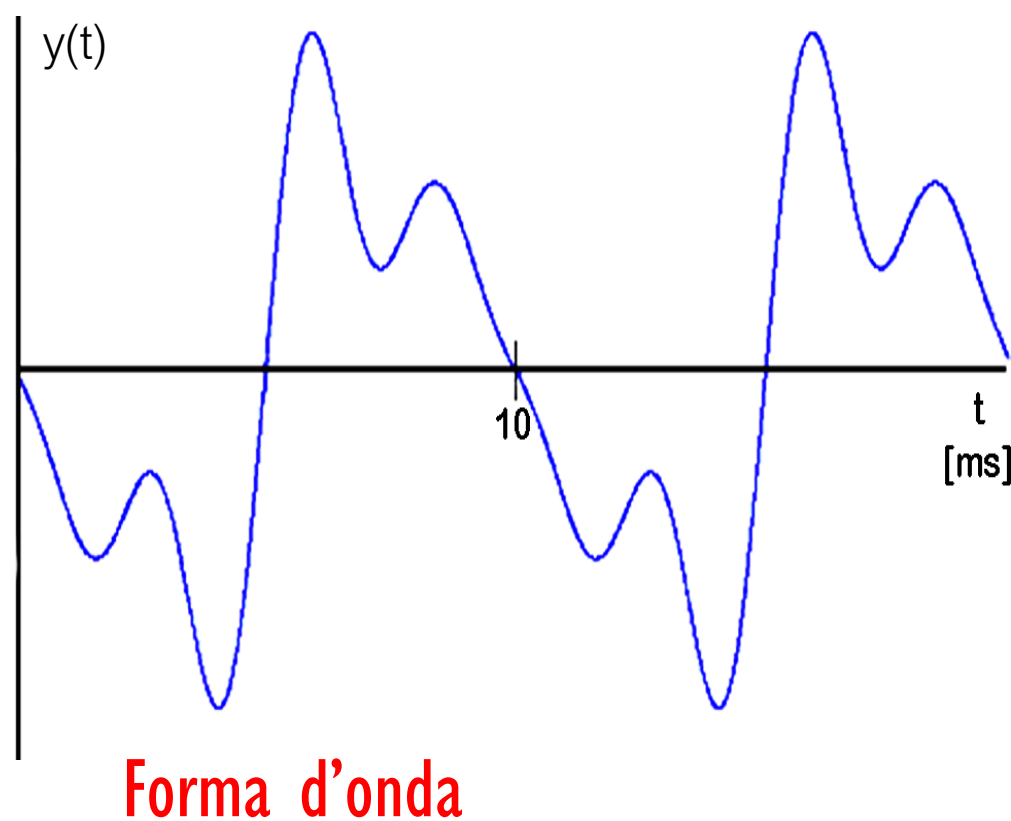
Spettro

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.



Praticamente tutti i suoni presenti in natura sono complessi.

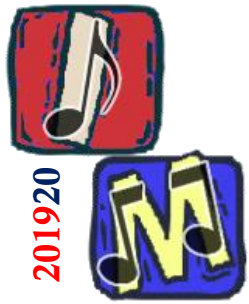




# Esercitazione Pratica

## (dal testo)

- 1.8.3 – Teorema di Fourier: sintesi additiva  
In un editor audio generare tre onde sinusoidali
  - 110 Hz, 220 Hz, 330 Hz, con ampiezza 0,3
  - Mixare le tre tracce
  - Verificare che la frequenza del segnale mixato coincida con quella del segnale a 110 Hz



# Esercitazione Pratica

## (dal testo)

- 1.8.4 – Teorema di Fourier: analisi spettro  
In un editor audio utilizzare l'analisi dello spettro tramite l'analizzatore FFT (Fast Fourier Transform) sulla traccia ottenuta al termine dell'esercizio 1.8.3
  - Prestare attenzione a settare un valore ottimale per la dimensione della FFT (circa 16384)
  - Verificare i tre picchi in prossimità delle frequenze 110, 220 e 330 Hz



# Esercitazione Pratica

## (dal testo)

- 1.8.5 – Teorema di Fourier: spettro di fase  
Ripetere l'esercizio 1.8.4 introducendo i seguenti cambi di fase
  - Per l'onda da 110 Hz :  $+90^\circ$
  - Per l'onda da 220 Hz :  $+180^\circ$
  - Per l'onda da 330 Hz :  $+270^\circ$
  - Nonostante il cambio di fase, calcolare FFT e verificare i tre picchi in prossimità delle frequenze 110, 220 e 330 Hz



# Approfondimenti

- *[EN] Does sound travel with the wind?*

[http://www.hk-phy.org/iq/sound\\_wind/sound\\_wind\\_e.html](http://www.hk-phy.org/iq/sound_wind/sound_wind_e.html)

- *[EN] Can wind bring sound?*

<https://physics.stackexchange.com/questions/299422/can-wind-bring-sounds-sooner-towards-me/299429#299429>