

Acustica

Lezione 2

La propagazione del suono: onde,
velocità ed eco

Luigi Manfrin

La propagazione del suono: analogia con le onde nell'acqua

Il suono musicale è prodotto da una vibrazione che, propagandosi nell'aria, assume la forma di onda periodica.

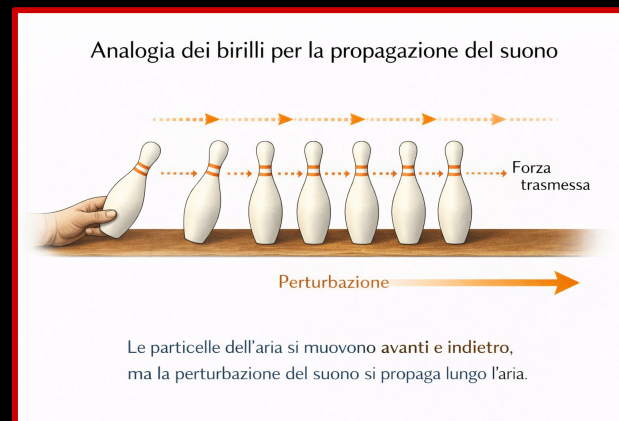
≈ l'acqua → quando una goccia cade nell'acqua, si formano onde circolari e la perturbazione si propaga. Allo stesso modo una sorgente sonora crea una perturbazione nell'aria. Quale è la differenza?

- Nell'acqua → onde si propagano sulla superficie.
- Nel suono → *le onde si propagano in tutte le direzioni.*

Come si muove l'aria? Non si sposta globalmente, non “viaggia” come un fluido che scorre; si muove solo localmente avanti e indietro.

Ogni particella spinge quella successiva trasmettendo il movimento.

≈ dei birilli → Una fila di birilli molto vicini: se uno cade urta il successivo e il movimento si trasmette lungo la fila. Ma ogni birillo si muove solo un poco, non percorre tutta la distanza.

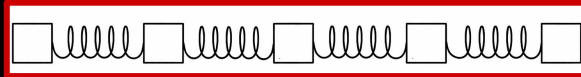


Il suono invisibile: come si propaga nell'aria

Non si vede il suono perché le onde sonore sono “invisibili” e vibrano troppo rapidamente per permetterci di distinguere le singole oscillazioni.

[Eccezione: le frequenze molto basse → si può intuire la pulsazione].

Un modello meccanico esemplare utile → una fila a catena di pesi-molle (massa-elasticità).



se si dà un impulso:

- i pesi oscillano avanti e indietro.
- l'onda si propaga lungo la fila.

Cosa rappresenta questo modello?

Il sistema molle–pesi mostra le due proprietà fondamentali dell'aria:

- *massa* → l'inerzia del movimento.
- *elasticità* → capacità di tornare alla posizione iniziale.

Queste due proprietà permettono alle onde sonore di propagarsi.

Il suono è una perturbazione che si propaga, non uno spostamento globale della materia.

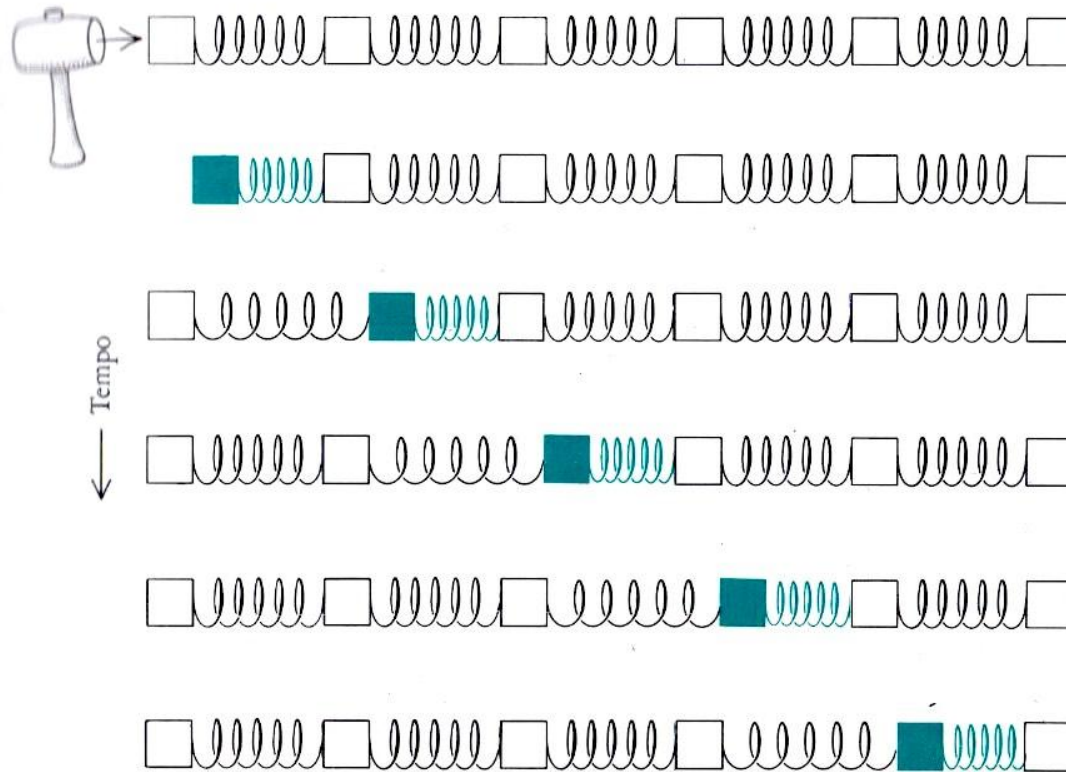
L'aria vibra localmente,

La perturbazione si trasmette, massa + elasticità → rendono possibile la propagazione.

Un'onda può propagarsi in un sistema di pesi e molle.
Allo stesso modo l'onda sonora si propaga nell'aria, perché ha massa ed elasticità.

Es., una fila di pesi collegati da molle. Se si dà un colpo a un'estremità:

- i pesi si muovono avanti e indietro;
- l'onda si propaga lungo la fila.



Le molle e i pesi
rappresentano le due
proprietà dell'aria che
consentono la
propagazione delle onde
sonore, cioè l'elasticità e
la massa.

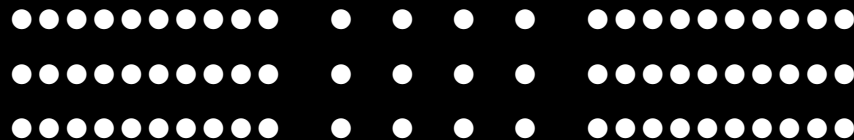
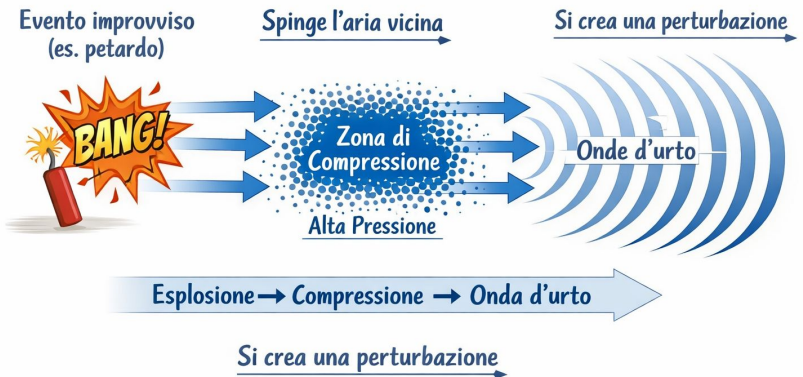
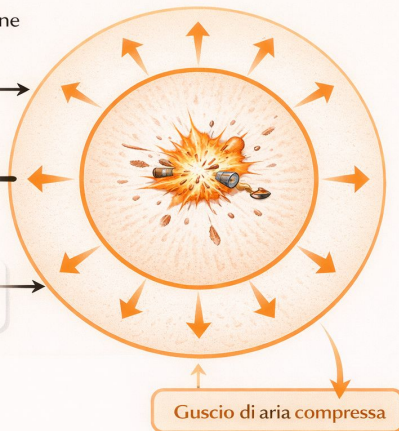
Propagazione del suono: compressione e rarefazione dell'aria.

- Una singola perturbazione (es. *l'esplosione di un petardo*) spinge l'aria vicina.
- L'aria, avendo massa ed elasticità, viene *compressa*.
- Subito dopo si *riespande* (*rarefazione*), spingendo l'aria circostante *in tutte le direzioni*.
- L'aria vicina viene a sua volta compressa.

Si forma così una successione di “gusci” concentrici di compressione e rarefazione che si propagano allontanandosi dalla sorgente.

Inizio della propagazione di un'onda sonora

- 1 Una singola perturbazione (es. l'esplosione di un petardo) **spinge** l'aria vicina.
- 2 L'aria, avendo **massa ed elasticità**, viene **compressa**.
- 3 Subito dopo si **espande**, spingendo l'aria circostante in tutte le direzioni.
- 4 L'aria vicina viene a sua volta **compressa**.
- 5 Si forma così un primo “**guscio**” di aria **compressa** attorno alla sorgente.



Compressione

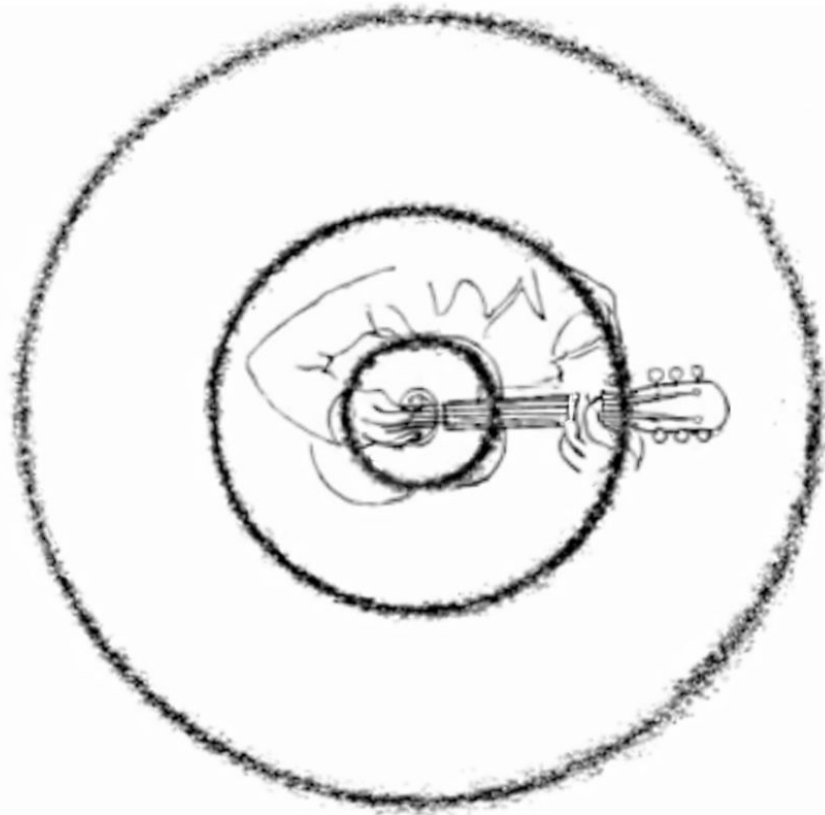
Rarefazione

Compressione



L'Aria compressa 🖐️ si formano gusci concentrici di aria compressa

Ogni guscio: si allontana dalla sorgente → genera il successivo



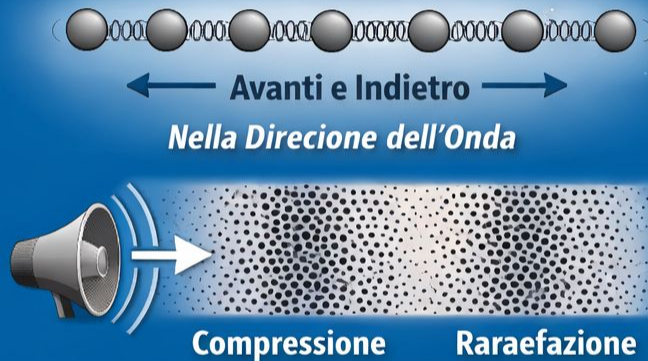
Un oggetto in vibrazione regolare, come una corda vibrante, emette una serie di gusci in espansione di aria compressa. Se l'oggetto vibra a una frequenza sufficientemente alta e con una certa forza, possiamo percepire la serie di gusci come un unico suono.

Onde sonore

Tipi di Onde

Onde Longitudinali

Nel Suono (Nell'Aria)



Onde Trasversali

Nell'Acqua



Su una Corda



Confronto

Longitudinali	Trasversali
+ Avanti e Indietro	+ Su e Giù
→ Direzione dell'Onda	↑ ↓ Perpendicolare all'Onda

La struttura della vibrazione della corda: il rapporto tensione e massa

Prima di affrontare il tema dell'*onda sonora*, torniamo alla vibrazione della corda.

Essa è determinata da due fattori fondamentali: la ***tensione***, che agisce come forza di richiamo riportando la corda verso l'equilibrio, e la ***massa*** (inerzia), che fa sì che il movimento non si arresti ma prosegua oltre. La corda supera così la posizione di equilibrio, viene nuovamente richiamata indietro e il processo si ripete nel tempo: da questa ripetizione nasce l'oscillazione.

La vibrazione, dunque, è data dall'*equilibrio dinamico* tra:

- la ***tensione*** → agisce localmente attraverso la curvatura della corda e riporta alla posizione iniziale.
- la ***massa*** (inerzia) → è la continuità del moto: fa superare la posizione iniziale.
- Tensione = forza di ritorno [quanto forte tira la corda].
- Massa = continuità del movimento [quanto è pesante la corda].
- Elasticità = quanto facilmente la corda torna alla posizione di equilibrio [è già incorporata nella tensione e si manifesta attraverso la tensione].

I rapporto tensione/massa non spiega l'onda sonora in sé, ma determina la velocità e la frequenza dell'onda che si propaga sulla corda; questa vibrazione viene poi trasmessa all'aria sotto forma di onda sonora.

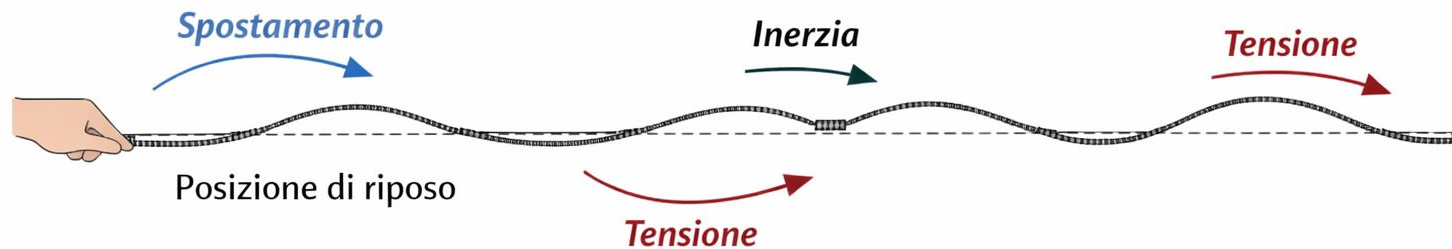
Contrasto ed equilibrio dinamico tra tensione e massa



La **vibrazione** nasce da un **contrasto** continuo: la **tensione** riporta la corda all'equilibrio, la **massa** (inerzia) la fa proseguire oltre. Questo **equilibrio dinamico** genera l'oscillazione continua.

Vibrazione di una corda

(Tensione e massa in azione)



1. Spostamento

*Corda spostata
da un lato*

2. Ritorno

*La tensione la
riporta indietro*

3. Superamento

*La corda supera la
posizione di riposo*

4. Ritorno

*La tensione la
riporta indietro ancora*

Oscillazione Continua



La vibrazione della corda può essere descritta come un'onda trasversale sulla corda che, trasmessa all'aria, genera un'onda sonora longitudinale.

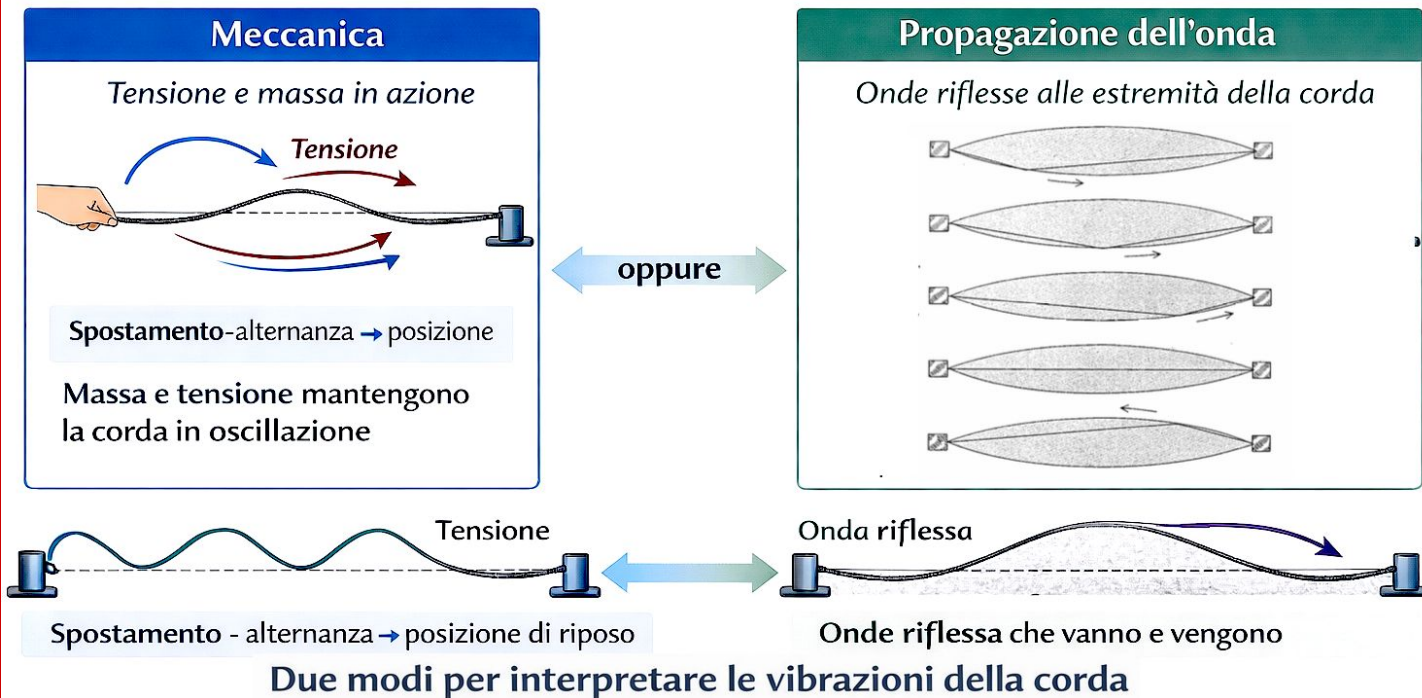


La vibrazione della corda vista come onda riflessa

- La vibrazione della corda può essere descritta come *un'onda che si propaga* lungo la corda e si riflette alle estremità.
- Se spostiamo la corda e la lasciamo libera, si genera un'onda che percorre la corda, si *riflette* all'estremità come un'eco e torna indietro in direzione opposta.

Vibrazione di una corda

Due modi di interpretare lo stesso fenomeno



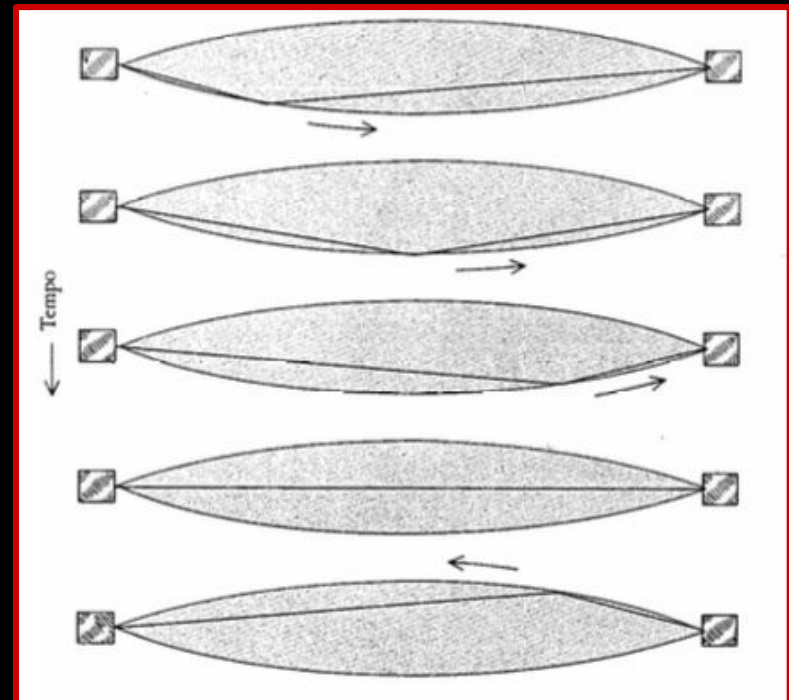
Vibrazione della corda (vista *come* la piega di *onda*)

La vibrazione della corda può così essere vista come una *piega* che viaggia avanti e indietro lungo la corda.

- Una corda pizzicata sembra formare una curva.
- In realtà, in ogni istante, la corda ha una *piega* netta in un punto.
- Il movimento della piega → si sposta lungo la corda come un' *onda trasversale*.

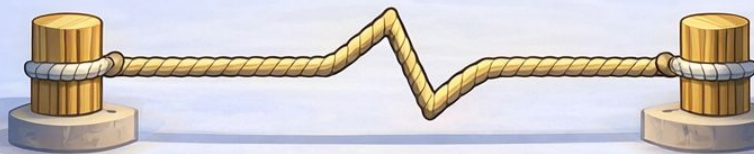
La *Riflessione* → quando la piega arriva all'estremità viene riflessa, torna indietro nella direzione opposta.

La “piega” non è una realtà fisica puntuale, ma un' *euristica*: una rappresentazione semplificata di una deformazione localizzata che si propaga lungo la corda secondo le leggi delle onde.



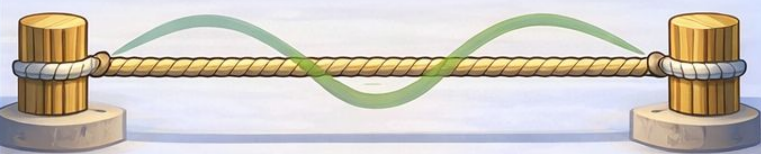
Vibrazione della corda: rappresentazione ideale e realtà

Modello didattico



“Piega” netta,
che viaggia avanti e indietro

Realtà continua



Onda **continua**
che si propaga lungo la corda

Una rappresentazione **semplificata** utile per comprendere il movimento.

Cosa è vero fisicamente

- ✓ La perturbazione si propaga lungo la corda → questo è reale
- ✓ Esiste davvero una forma d'onda che viaggia
- ✓ La riflessione alle estremità è un fenomeno reale

Cosa è idealizzato

- La “piega” netta in un punto non esiste davvero
- Nella realtà:
 - la corda ha sempre una forma **continua** e **distribuita**
 - non c'è mai un angolo “spigoloso”
- La piega è una costruzione limite, utile per capire il movimento

Onde e riflessione: *la velocità dell'onda.*

Le onde [longitudinali (aria) oppure trasversali (corde, acqua)], quando incontrano un ostacolo rigido → vengono riflesse. *Un'onda riflessa prende il nome di eco quando il suono riflesso torna con un ritardo percepibile rispetto al suono originale; altrimenti si parla semplicemente di riflessione.* Il tempo che l'eco impiega a tornare dipende da:

1) la **distanza**; 2) la **velocità (V)** dell'onda determinata dalla relazione tra la tensione T (quanto è tirata la corda) e la massa per unità di lunghezza μ (quanto è “pesante” la corda).

$\eta\chi\acute{o}$ (*ēchō*) → *risuonare*.

Tuttavia, in acustica la risonanza è l'amplificazione di alcune frequenze proprie di un sistema, mentre l'eco è la riflessione di un suono che torna indietro dopo aver incontrato una superficie

Cosa significa

$$V = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$


Tensione = Quanto è tesa la corda
(misurata in Newton)

μ = Massa per unità di lunghezza =
Quanto è “pesante” la corda

Risultato: Velocità dell'onda (in metri al secondo)

Più tensione e/o meno massa → onda più veloce

- più tensione ($T \uparrow$) → onda più veloce (aumenta con la tensione).
- più massa ($\mu \uparrow$) → onda più lenta (diminuisce con la massa).

Velocità del suono nell'aria

1. *Pressione dell'aria* → non modifica la velocità del suono. Infatti:

- aria più compressa → più densa → rallenta la velocità;
- ma anche → più elastica → accelera la velocità;
- i due effetti si compensano.

2. *Temperatura* → se più alta, la velocità del suono aumenta. Infatti:

- le molecole si muovono più velocemente → l'aria è più “reattiva” (elastica).
- [Più umidità → velocità del suono leggermente maggiore (effetto secondario)].

3. Valore di riferimento

- A 20°C → velocità del suono ≈ 344 m/s.

4. Misura storica → **Mersenne** (1636): prima osserva il lampo di un cannone, poi ascolta il suono e misura il ritardo. Misure più precise vennero fatte dall'Accademia delle Scienze di Parigi (~1750).

Es. classico: la distanza del suono del fulmine.

- luce → arriva prima; suono → arriva dopo;
- distanza $\approx 330 \times$ tempo in secondi (330 è una misura media che può variare).
- esempio: 3 secondi → circa 1 km (330 x 3).

Velocità del suono nell'aria



① Pressione dell'aria

- Aumenta la pressione non cambia la velocità
→ perché:
– Aria compressa → **più densa** (rallenta)
– Più elastica → **accelera**

✓ ① Temperatura

→ All'aumentare della temperatura il suono è più veloce!

L'aria è **più calda** → le molecole si muovono più velocemente



1636: Mersenne misura il ritardo
Accademia delle Scienze di Parigi (~1750):
misure più precise



Velocità del suono ≈ 344 m/s a 20°C



1636: Mersenne misura il ritardo

Accademia delle Scienze di Parigi (~1750):
misure più precise



④ Distanza del fulmine



Fulmine...

Idea chiave: ⚠ La velocità del suono dipende soprattutto dalla temperatura, non dalla pressione!

Cosa significa velocità dell'onda ?

la velocità dell'onda nella corda



Su una corda, dopo aver **pizzicato** in un punto, la piega si sposta lungo la **corda** con la velocità dell'onda

la velocità dell'onda nell'aria



Nell'aria, la perturbazione sonora si propaga dalla sorgente (megafono) all'orecchio con la velocità dell'onda

– nella corda → dipende da tensione e massa lineare – nell'aria → dipende dalla temperatura



Idea chiave: ⚠ La velocità dell'onda indica quanto velocemente si propaga un disturbo lungo un mezzo, non le particelle!

Velocità del suono nei gas: ruolo di temperatura, pressione ed elasticità.

La velocità del suono dipende dal *mezzo* in cui si propaga. Nei gas, il fattore più importante è la *temperatura*: se aumenta, le molecole del gas si muovono più velocemente e trasmettono più rapidamente le compressioni, quindi il suono si propaga più veloce.

L'*elasticità* del gas → è la capacità del gas di comprimersi e riespandersi: è ciò che permette al suono di propagarsi. Più il gas reagisce rapidamente alla compressione, più il suono viaggia veloce. Nei gas, l'elasticità è legata a quanto velocemente le molecole si muovono (quindi alla temperatura).

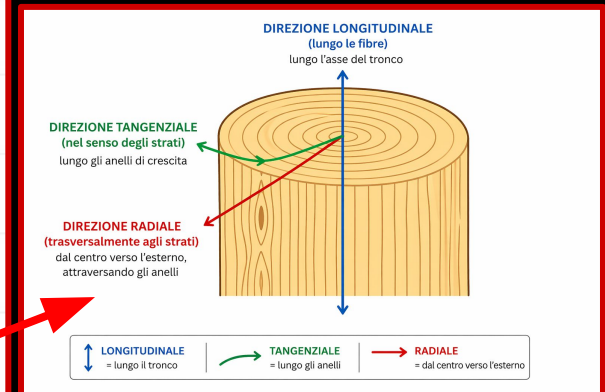
La *pressione* del gas → è l'effetto degli urti delle molecole; se aumenta con la temperatura, le molecole diventano più fitte (densità aumenta) e il gas oppone più resistenza, ma anche una maggiore reattività (elasticità) alla compressione, così i due effetti si compensano e la velocità del suono cambia poco.

Nei *gas ideali*, che si distinguono solo per il tipo di molecole (massa e struttura), la velocità del suono dipende soprattutto dalla temperatura e dal tipo di gas, mentre pressione, densità ed elasticità variano insieme compensandosi e quindi influenzano poco la propagazione. Nei gas reali (aria) → compensazione quasi perfetta.

Nell'aria: circa 340 m/s (a temperatura ambiente, circa 20°).

Velocità del suono in diversi materiali (m/s)

Materiale	Velocità (m/s)
Aria	340
Ossigeno	316
Idrogeno	1260
Acqua marina	1435
Ferro	5127
Vetro al sodio	5000
Legno di abete (lungo le fibre)	3322
Legno di abete (nel senso degli strati)	724
Legno di abete (trasversalmente agli strati)	1405



Il suono non è “legato ai gas”: è una *vibrazione meccanica* che si propaga in qualsiasi mezzo elastico.

→ es., nel ferro non sono le molecole a urtarsi come nei gas, ma gli atomi del reticolo che oscillano attorno alle loro posizioni e si trasmettono la deformazione, permettendo al suono di viaggiare.

Si percepisce quando il ferro è in contatto con una sorgente vibrante e con il corpo/orecchio (direttamente o tramite un altro mezzo), così che le vibrazioni del metallo si trasmettano all'orecchio

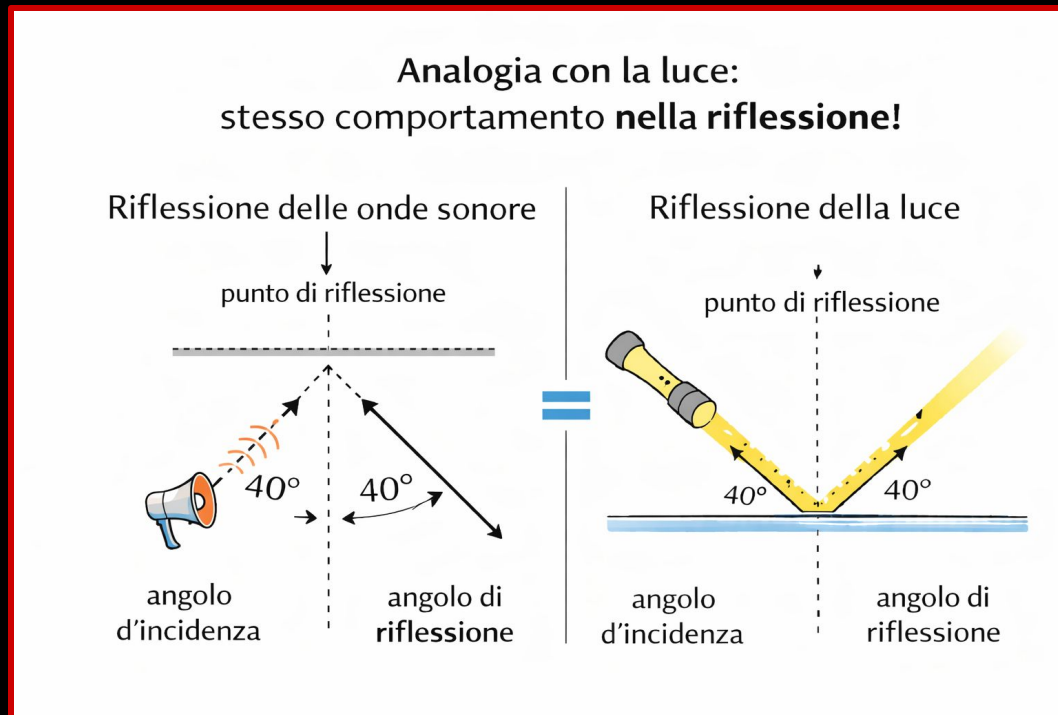
→ es., appoggiando l'orecchio a un tubo o a una struttura metallica.

Echo and Narcissus (1903) - John William Waterhouse (1849-1917)



La riflessione delle onde sonore

- Quando un'onda sonora incontra una superficie che non trasmette efficacemente le vibrazioni (cioè che le riflette più di quanto le assorba), una parte dell'onda viene riflessa.
- La riflessione avviene secondo una legge generale, comune a tutti i fenomeni ondulatori: l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.
- L'intensità della riflessione è determinata dalle proprietà della superficie; l'energia non riflessa viene invece assorbita o trasmessa nel mezzo (rifrazione).



Tempo di integrazione e persistenza della percezione uditiva

L'orecchio non percepisce istantaneamente un suono: ha bisogno di un breve *tempo di integrazione* per analizzarlo completamente. Solo dopo questo intervallo si raggiunge il regime stazionario per distinguere chiaramente l'*altezza* (legata alla frequenza); l'*intensità* (legata all'ampiezza dell'onda sonora); il *timbro* (legato alla composizione spettrale).

Un *regime stazionario* → la condizione in cui le caratteristiche di un fenomeno (come ampiezza, frequenza e forma d'onda) rimangono *costanti* nel tempo, senza variazioni transitorie.

Transitorio soggettivo.

- Se il suono è troppo breve → si percepisce in modo incompleto, perché l'orecchio non ha tempo sufficiente per stabilizzare il segnale e distinguere chiaramente l'altezza, l'intensità e il timbro.
- La durata minima dipende dalla frequenza e dall'intensità:
 - frequenze medie (500–2500 Hz) → almeno 0,05 s (1/200 di secondo);
 - frequenze basse → fino a 0,2 s (1/5 di secondo).

Persistenza del suono.

- Quando lo stimolo termina, la percezione non si interrompe subito. Rimane un'impressione uditiva residua di circa 0,1 s (1/10 di secondo).

→ L'ascolto è un processo temporale: il suono deve durare abbastanza per essere percepito completamente.

L'eco

L'eco è un fenomeno dovuto alla riflessione delle onde sonore.

Quando un suono incontra una superficie (parete, montagna, edificio), una parte dell'onda sonora torna indietro → questo ritorno può essere percepito come *una ripetizione distinta e chiaramente riconoscibile* del suono, ossia l'eco.

Non tutte le riflessioni producono un'eco distinguibile: affinché l'eco sia percepita chiaramente, deve esserci un ritardo minimo tra il suono diretto e il suono riflesso. Se il ritardo è troppo breve, il suono riflesso si sovrappone a quello diretto: in questo caso non si percepisce un'eco, ma un effetto di *riverbero*, in cui il suono risulta impastato e meno definito.

Il dato fondamentale è che l'orecchio umano “trattiene” il suono per circa 0,1 secondi (1/10). Se intervallo $< 0,1$ s → i suoni si sovrappongono (non si distingue l'eco); se intervallo $\geq 0,1$ s → i suoni si separano e si percepisce l'eco.

Occorre perciò considerare il tempo di andata e ritorno del suono.

- velocità del suono ≈ 340 m/s
- tempo minimo $\approx 0,1$ s
- in 0,1 secondi il suono percorre $\rightarrow 340 \times 0,1 = 34$ m

Ma l'onda sonora riflessa va alla superficie e poi torna indietro;
quindi $\rightarrow$ distanza reale $= 34 / 2 = 17$ m.

Serve una superficie ad almeno 17 metri per sentire l'eco distinta.

L'eco e la riflessione del suono

L'eco è un fenomeno dovuto alla riflessione delle onde sonore.

Quando un suono incontra una superficie (parete, montagna, edificio), una parte dell'onda sonora torna indietro.

→ Questo ritorno può essere percepito come una **ripetizione distinta e chiaramente riconoscibile del suono, ossia l'eco.**



Eco e frequenza

Esperimento.

Siamo dinanzi a superfici ripetute (gradinate, sedili, scalinate).

Produciamo un suono breve → un battito di mani.

Il suono viene riflesso da ogni superficie → si generano echi successivi, ciascuno con un piccolo ritardo.

Intervallo tra gli echi → Indichiamo con W la distanza tra due superfici. Il suono percorre W all'andata, W al ritorno → distanza totale = $2W$.

Gli echi arrivano a intervalli regolari, perché le superfici sono equidistanti (distanza costante W) e ogni eco percorre sempre la stessa distanza ($2W$) alla stessa velocità del suono.

Il tempo tra un eco e il successivo è sempre lo stesso: → $T = 2W / v$.

Stessa distanza → stessa velocità → stesso tempo di ritorno → intervalli regolari → sequenza periodica.

Conseguenza percettiva.

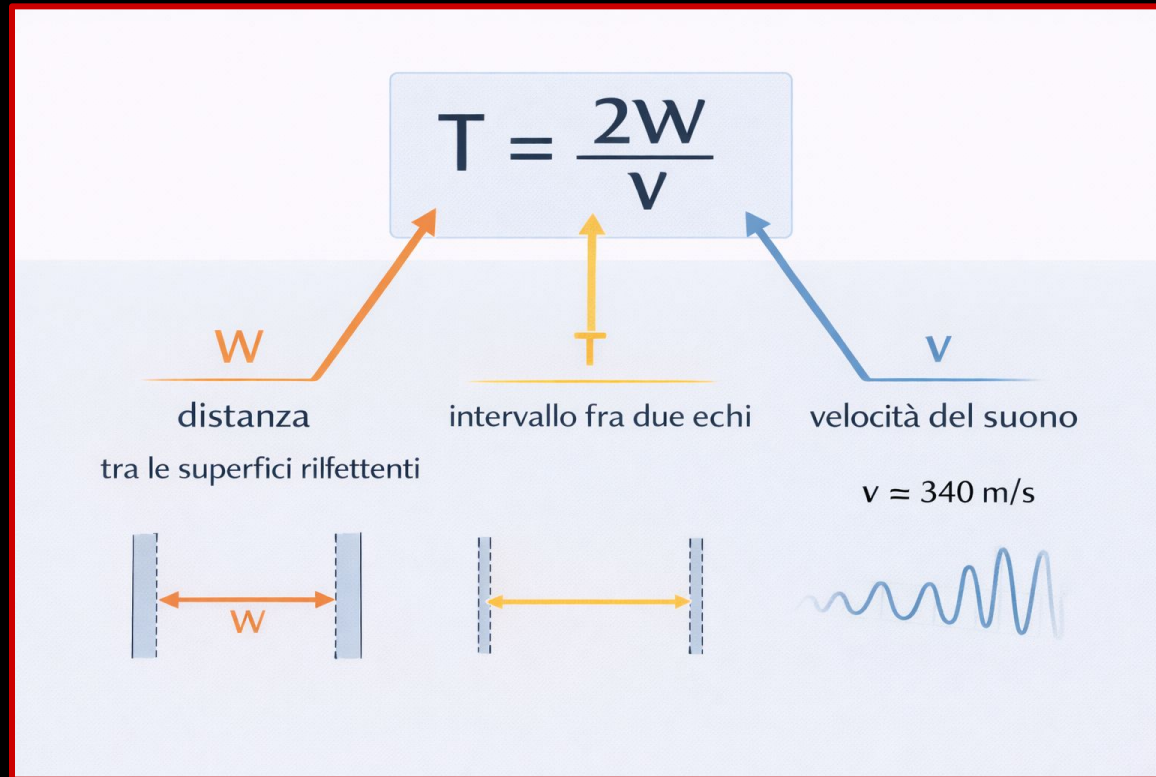
Echi ravvicinati → alta frequenza → suono più acuto.

Echi distanti → bassa frequenza → suono più grave.

La frequenza è il numero di ripetizioni nel tempo: qui ciò che si ripete sono gli echi.

Eco e frequenza.

La formula per calcolare il tempo tra due echi.



- T = tempo tra due echi $\rightarrow$ la periodicità dell'eco.
- W = distanza tra le superfici.
- v = velocità del suono.
- Tempo tra echi $= 2W/v$

Frequenza: la formula.

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow T = \frac{1}{f}$$

$$T = 0,5 \text{ s}$$



— 2 Hz —

2 oscillazioni al secondo

$$T = 0,25 \text{ s}$$



— 4 Hz —

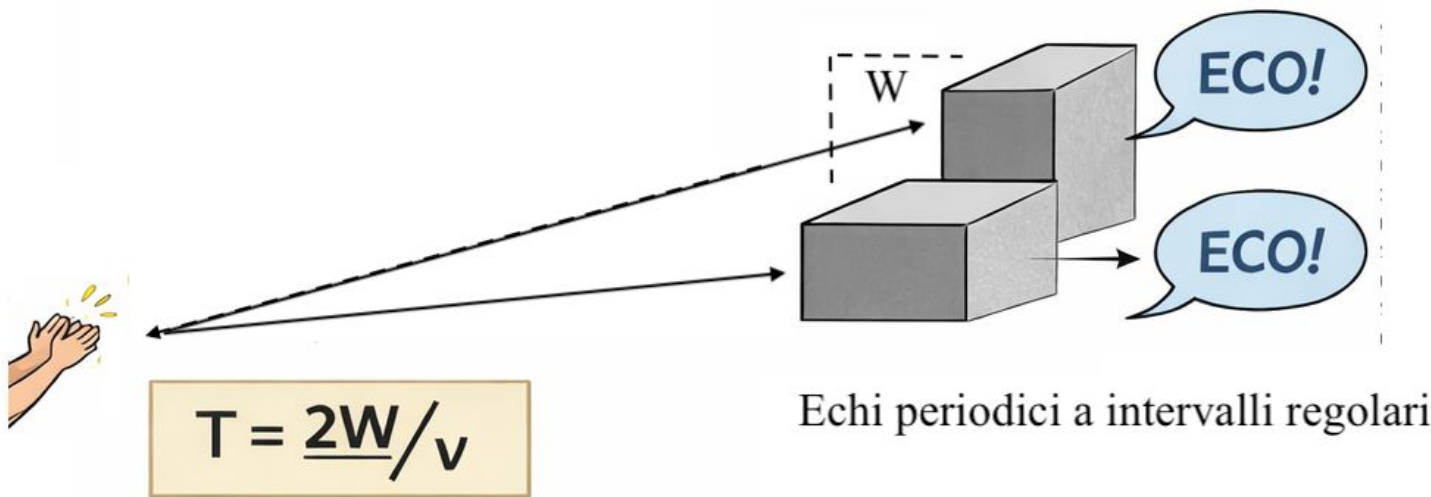
4 oscillazioni al secondo

$$f = 440 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{440} \approx 0,00227 \text{ s}$$



440 oscillazioni al secondo



BATTITO DI MANI

Intervallo tra gli echi

- La distanza tra due superfici è W .
- Ogni eco percorre $2W$ alla velocità v del suono.
 - Gli echi arrivano quindi:
 - **sempre alla stessa distanza**
 - **alla velocità v (costante)**

→ Tempo tra un eco e il successivo:

$$T = \frac{2W}{v}$$

Echi ravvicinati → suono periodico (altezza)

Se gli echi sono sufficientemente **ravvicinati** nel tempo, non li percepiamo separati ma come un **unico suono continuo**.



- Se gli echi successivi diventano molto brevi e regolari
→ percepiamo un suono periodico
- Periodicità regolare → Frequenza f

→ T = intervallo tra due echi → f → $f = 1/T$

Dalla distanza alla frequenza.

1. Punto di partenza (T tra due echi) $T = \frac{2W}{v}$

- T = intervallo tra due echi W (distanza tra le superfici) / v (velocità del suono).

2. Passaggio alla frequenza $f = \frac{1}{T}$ Sostituendo:

$$f = \frac{1}{\frac{2W}{v}} = \frac{v}{2W}$$

Più piccola è la distanza W, più alta è la frequenza.

Esempi concreti

Caso 1: W = 1 m

$$f = \frac{340}{2 \cdot 1} = 170 \text{ Hz } (\approx 172 \text{ Hz})$$

circa Fa2 sotto il Do3 centrale

Caso 2: W = 0,25 m

$$f = \frac{340}{2 \cdot 0,25} = 680 \text{ Hz } (\approx 688 \text{ Hz})$$

circa tra Mi4 e Fa4

- superfici lontane → echi lenti → suono grave.
- superfici vicine → echi rapidi → suono acuto.
- distanza ↓ → frequenza ↑ → suono più acuto.
- distanza ↑ → frequenza ↓ → suono più grave.

Vibrazione della corda: una *variante della formula* per calcolare la frequenza.

- La corda ha lunghezza L
- Un'onda parte da un'estremità percorre tutta la corda $\rightarrow L$
- viene riflessa torna indietro $\rightarrow L$

Un ciclo o una vibrazione completa $\rightarrow$ andata + ritorno; quindi $\rightarrow$ un ciclo = $2L$

Tempo di un ciclo $\rightarrow$ Se la velocità dell'onda è v :

Frequenza

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2L} \implies T = \frac{2L}{v}$$

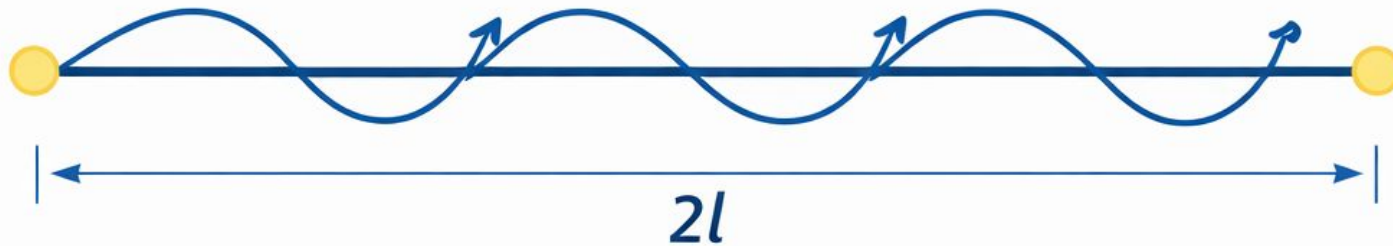
Più la corda è corta $\rightarrow$ più alta è la frequenza $\rightarrow$ suono più acuto.

- L piccolo $\rightarrow f$ alta $\rightarrow$ suono acuto.
- L grande $\rightarrow f$ bassa $\rightarrow$ suono grave.

Riepilogo: un'onda fa avanti e indietro, compiendo un ciclo $\rightarrow 2L$
quindi:

$$f = \frac{v}{2l}$$

$$f = \frac{v}{2l}$$



Esempio 1

$$l = 1 \text{ m}$$

$$v = 200 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{200}{2 \cdot 1} \cdot 1 = 100 \text{ Hz}$$

100 Hz (suono grave)

Esempio 2

$$l = 0,5 \text{ m}$$

$$v = 200 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{200}{2 \cdot 0,5} \cdot 1 = 200 \text{ Hz}$$

200 Hz (suono acuto)

Riflessione e *assorbimento* del suono

- Velocità del suono: ≈ 344 m/s.
- Quando un'onda sonora incontra un ostacolo:
 - → Riflessa (torna indietro).
 - → Assorbita (energia dissipata nel materiale).
 - → Trasmessa (in piccola parte oltre l'ostacolo).
- Il suono riflesso è:
 - più debole (minore ampiezza).
 - più povero di alte frequenze.

Perché si perdono gli acuti?

1. I materiali assorbono di più le alte frequenze.
2. Anche l'aria attenua le alte frequenze.

Conseguenza pratica

- Facile attenuare gli acuti.
- Difficile eliminare i bassi (meno assorbiti).

Intensità dell'eco: assorbimento e distanza.

Esempi (suono iniziale: 500 Hz, volume 100 dB)

- Marmo ($\alpha = 0.01$) $\rightarrow$ riflesso ≈ 99
- Velluto ($\alpha = 0.35$) $\rightarrow$ riflesso ≈ 65
- Truciolato assorbente ($\alpha = 0.64$) $\rightarrow$ riflesso ≈ 36
 $\rightarrow$ Più alto è α (assorbimento), più debole è l'eco.

Altri fattori che riducono l'eco

1. Aria $\rightarrow$ assorbe soprattutto alte frequenze
2. Distanza $\rightarrow$ intensità $\propto 1 / d^2$
 - distanza $\times 2 \rightarrow$ intensità $1/4$
 - distanza $\times 3 \rightarrow$ intensità $1/9$

Coefficienti di assorbimento acustico (α)			
Materiale	125 Hz	500 Hz	4000 Hz
Cemento a vista	0.01	0.02	0.04
Mattoni a vista	0.02	0.03	0.06
Marmo	0.01	0.01	0.01
Vetro	0.008	0.008	0.01
Legno a vista	0.01	0.04	0.04
Linoleum	0.02	0.03	0.05
Tappeto pesante	0.09	0.21	0.31
Tappezzeria in velluto	0.05	0.35	0.36
Truciolato assorbente	0.20	0.64	0.69
Pannello in fibra di vetro (max)	0.60	0.90	0.90

Eco e riverberazione

Quando un suono incontra una superficie, viene riflesso. A seconda del tempo di ritorno, la riflessione è percepita in modi diversi.

- **Eco** (*riflessione distinta*). Si ha quando il suono riflesso arriva con un ritardo sufficiente rispetto al suono diretto. L'orecchio percepisce due eventi separati: 1) suono diretto; 2) suono riflesso. Intervallo temporale $\geq$ circa 0,1 s.
- **Riverberazione** (*sovrapposizione continua*). Si ha quando il suono riflesso arriva troppo presto per essere distinto. I suoni si sovrappongono e non si percepiscono echi separati. Risultato: prolungamento smorzato del suono Intervallo temporale $< 0,1$ s.

Effetti acustici della riverberazione → Amplifica e arricchisce il suono, rendendolo più pieno e avvolgente. Dipende dall'ambiente (forme, materiali, dimensioni)

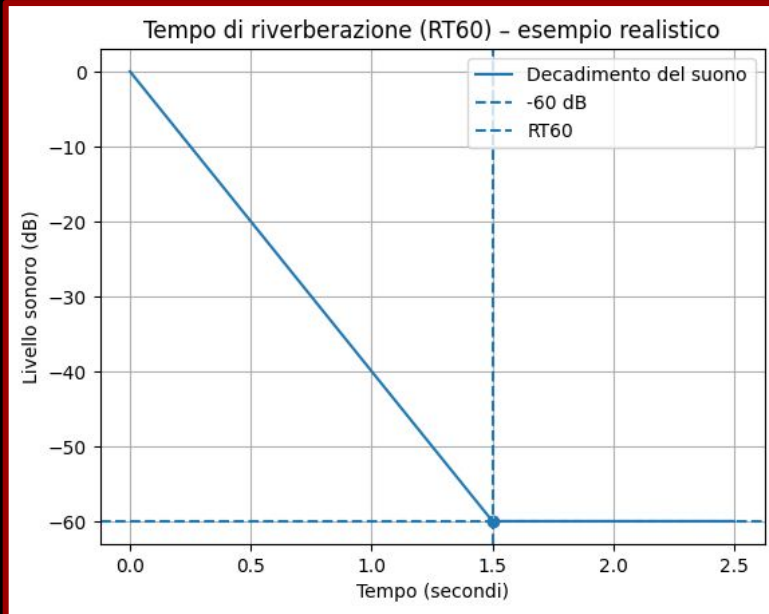
- Cattedrali → forte riverberazione per molte riflessioni (navate, superfici ampie).
- Orecchio di Dionisio (Siracusa) → cavità naturale che amplifica il suono (anche suoni deboli diventano molto intensi).
- Tuono → effetto amplificato e prolungato per riflessioni multiple nell'ambiente.

Eco → riflessione percepita come suono separato.

Riverberazione → riflessioni fuse in un unico suono continuo.

La differenza dipende dal tempo tra suono diretto e suono riflesso

Tempo di riverberazione (RT60): decadimento del suono nel tempo



Cos'è RT60

Il tempo di riverberazione (RT60) è il tempo necessario affinché il livello sonoro diminuisca di 60 dB dopo che la sorgente ha smesso di emettere.

Questo corrisponde a una riduzione dell'energia sonora a 1/1.000.000 del valore iniziale (un milionesimo dell'energia del suono).

Immagina che il suono all'inizio valga 1.000.000 dopo il decadimento → vale 1
cioè è diventato un milione di volte più debole

- Questo grafico inizia quando il suono si è già fermato: quello che vediamo è solo il suono che “rimane” (riflesso) nell'ambiente.
- L'asse verticale rappresenta il livello sonoro (dB).
- La linea inclinata mostra come il suono riverberato decresce nel tempo.
- La linea orizzontale a -60 dB indica tempo necessario affinché il suono diminuisca di 60 dB rispetto al livello iniziale (60 dB non sono un valore assoluto ma relativo).
- Il punto di intersezione indica il tempo di riverberazione (RT60).

Il grafico mostra il decadimento del suono nel tempo dopo l'interruzione della sorgente. In questo esempio, il livello sonoro diminuisce di 60 dB rispetto al valore iniziale in circa 1,5 secondi (RT60), diventando percettivamente trascurabile.

Esempio. Se inizialmente è 80 dB → 20 dB (diminuzione di 60 dB).

Decibel e percezione: due problemi diversi

1. Soglia di udibilità $\rightarrow$ 0 dB.

- Problema: quando un suono diventa percepibile.
- Misura: confronto con un valore fisso (20 μ Pa).
- Riferimento: soglia media a 1 kHz ($\approx$ 20 μ Pa).

Criterio di misura: confronto con
0 dB $\rightarrow$ limite medio della percezione (non silenzio fisico).

20 μ Pa (**20 micropascal**) è una
pressione sonora estremamente
piccola

1 Pa = unità di pressione (come
la pressione dell'aria)

1 μ Pa = un milionesimo di pascal
20 μ Pa = 0,000020 Pa
(venti milionesimi di pascal)

2. Decadimento del suono riverberato $\rightarrow$ RT60 (-60 dB rispetto al livello iniziale).

- Problema: quando un suono diventa non più percettivamente rilevante.
- Misura: variazione relativa nel tempo.
- Definizione: diminuzione di 60 dB rispetto al livello iniziale.

Criterio di misura: confronto con il livello di partenza $\rightarrow$ non è “fine fisica del suono”, ma l'estinzione percettiva.

Differenza strutturale.

I° caso: 0 dB $\rightarrow$ riferimento assoluto (inizio della percezione).

II° caso: -60 dB $\rightarrow$ variazione relativa (decadimento del suono).

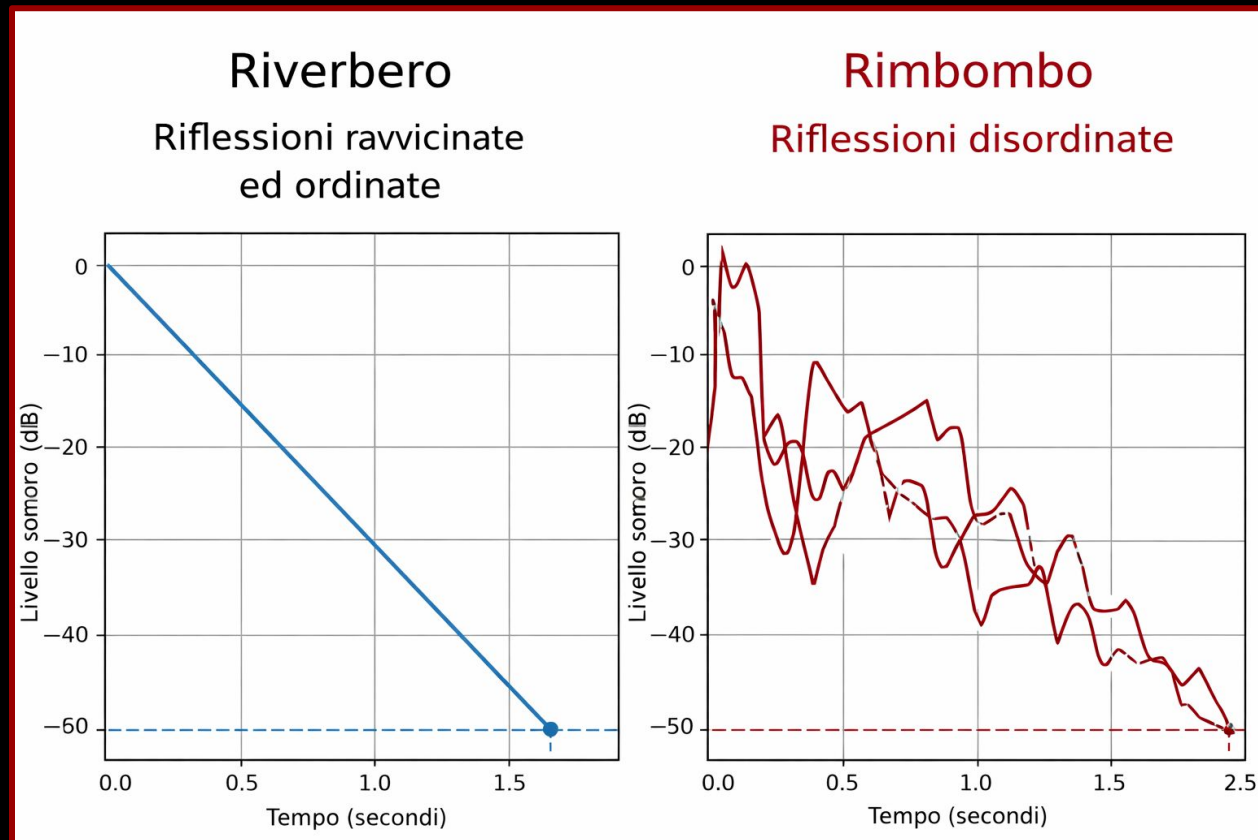
Nel I° caso misuriamo se sentiamo un suono;
nel II° quanto tempo impiega a scomparire all'ascolto.

Alcuni animali hanno
una soglia di udibilità
più bassa della nostra:
riescono a sentire suoni
che per noi sono troppo
deboli (ad esempio il
gatto e il gufo)

Riverbero e *rimbombo*

→ confronto tra *decadimento ordinato* e *disordinato* del suono

- Il **riverbero** è un insieme di riflessioni ravvicinate e ordinate che si fondono in un unico suono, rendendolo più pieno e avvolgente.
- Il **rimbombo** è un insieme di riflessioni disordinate che confondono il suono, rendendolo poco chiaro e difficile da capire.



Riflessione e risonanza: due fenomeni acustici distinti

Eco, riverbero e rimbombo → fenomeni di riflessione del suono.

La risonanza → un fenomeno di vibrazione propria di un sistema.

Eco - Riverbero - Rimbombo → dipendono dalla propagazione del suono nello spazio, che si riflette sulle superfici, torna indietro o si sovrappone. L'ambiente non genera nuove frequenze, ma “rimanda” quelle esistenti → fenomeni geometrici di percorso del suono.

Risonanza → dipende dalle proprietà interne di un sistema fisico (corda, cassa, aria, oggetto): vibra a certe frequenze proprie e può amplificare selettivamente alcune frequenze → è un fenomeno dinamico e selettivo.

La riflessione rimanda il suono; la risonanza lo trasforma e lo amplifica.

Esempi.

- Eco → urli in montagna → senti la tua voce tornare.
- Riverbero → suoni in chiesa → il suono si prolunga.
- Risonanza → una corda vibra → alcune frequenze diventano più forti.

*Eco e riverbero dipendono da dove il suono va;
la risonanza dipende da come un sistema vibra.*

Isolamento vs trattamento acustico

1. **Isolamento acustico.** Si tratta di ridurre la *trasmissione* del suono tra ambienti diversi. Il principio fisico è *la legge della massa* → il potere fonoisolante aumenta con la massa superficiale (kg/m^2), la tenuta all'aria (l'assenza di fessure) e il disaccoppiamento strutturale. Soluzioni tipiche:

- pareti multistrato (es. cartongesso + intercapedine + lana minerale);
- murature pesanti (calcestruzzo, laterizio pieno) // porte acustiche sigillate;
- serramenti a vetrocamera (due o più lastre di vetro separate da uno spazio d'aria o gas sigillato):

2. **Trattamento acustico** → controllo del campo sonoro interno (eco, riverbero).

Principio fisico → l'*assorbimento* dell'energia sonora.

Parametro: il *coefficiente assorbimento* (α): $\alpha \rightarrow 0$ = riflessione // $\alpha \rightarrow 1$ = assorbimento.

Materiali tipici: pannelli porosi → *schiume acustiche* (materiali porosi a bassa densità);

Isolamento → riduce la trasmissione.

Assorbimento → riduce le riflessioni.

Materiali leggeri e porosi → assorbono ma non isolano.

Materiali pesanti e rigidi → isolano ma riflettono.



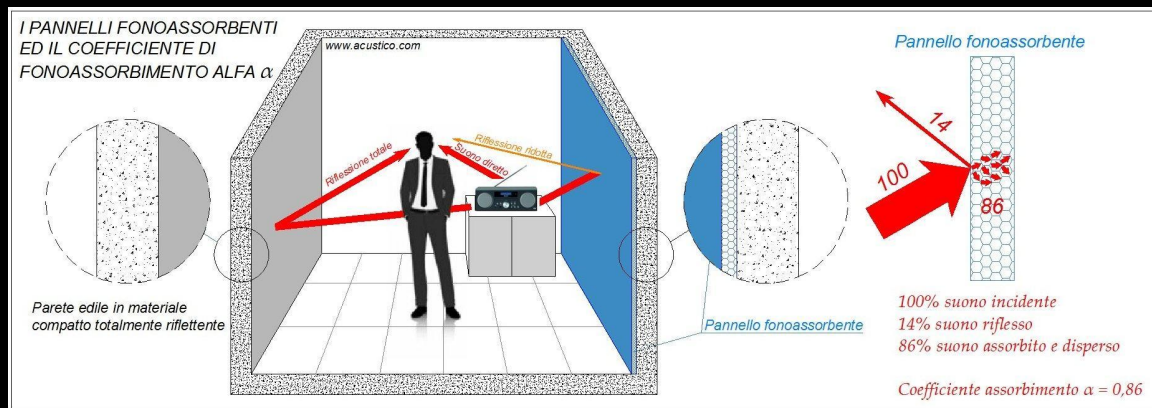
Pannello Fonoassorbente Piramidale 6cm
Grigio Antracite

Quando il suono colpisce una superficie:

- **Riflessione** → il suono torna indietro (eco, riverbero, ecc.).
- **Assorbimento** → energia dissipata con il suono attenuato. Il suono assorbito viene trasformato in energia interna del materiale, principalmente sotto forma di calore.
- **Trasmissione** → il suono passa oltre nell'altra stanza.

Due problemi distinti

- ***L'isolamento acustico*** → agisce sulla *trasmissione*, blocca il suono.
- Il ***trattamento acustico*** → agisce sulla *riflessione* e sull'assorbimento, migliorando il suono interno; richiede materiali porosi.



La massa, intesa come quantità di materiale per unità di superficie, determina l'*inerzia* della parete: non conta solo quanto è spessa, ma quanta materia contiene; più è elevata, più la parete oppone resistenza alla vibrazione indotta dal suono e quindi ne riduce la *trasmissione* del suono.

Studio di registrazione: due problemi, due soluzioni

1. **Controllo interno** → **Assorbimento**. L'obiettivo è avere la massima qualità del suono. Occorre ridurre l'eco, il riverbero e il rimbombo, controllando la dissipazione dell'energia sonora [= gestire quanta energia del suono viene trasformata (soprattutto in calore) invece di essere riflessa nello spazio, decidere quanta energia viene assorbita].

Materiali: porosi (lana di roccia, schiume, tessuti).

2. **Controllo esterno** → **Isolamento**. L'obiettivo è impedire la trasmissione del suono. Occorre ridurre il passaggio del suono tra ambienti operando sulla massa (inerzia), sulla tenuta all'aria e sul disaccoppiamento.

Soluzioni: pareti multistrato, porte acustiche, vetrocamera.

Differenza strutturale

Assorbimento → agisce sull'energia dentro lo spazio.

Isolamento → agisce sulla trasmissione tra spazi.

Materiali porosi → assorbono ma non isolano.

Materiali massivi → isolano ma riflettono.

Uno studio funziona quando il suono non esce e, dentro, è sotto controllo.

Disaccoppiamento

Isolamento acustico attraverso la separazione fisica delle strutture

Il suono si trasmette attraverso il contatto rigido; separando le strutture, il percorso della vibrazione viene indebolito

Collegamento Rigido



vibrazione trasmessa

collegamento rigido → il suono “cammina” nella struttura



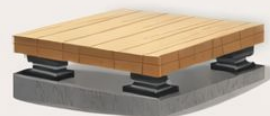
Intercapedine d'aria
→ interrompe il contatto rigido

Disaccoppiamento



vibrazione attenuata / disaccoppiata

intercapedine + isolatori → il percorso si interrompe



Isolatori Elastici



Supporti antivibranti
(gomma, molle)

disaccoppiano le strutture e dissipano energia