

Risonanza delle onde sonore in una colonna d'aria

(exp. id 20210106-2-v1)

Un esperimento proposto da

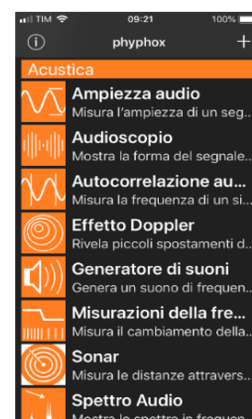
Prof. Alessandro Ercoli and Prof. Cristina Trifolelli Liceo Scientifico Statale "P. Ruffini", Viterbo, Italia
traduzione¹ dall'inglese a cura di Luca Montefusco – Liceo Scientifico "Tullio Levi Civita" (Roma)

Introduzione

Con questo esperimento di acustica studiamo il fenomeno delle onde stazionarie, in particolare analizziamo da un punto di vista quantitativo e qualitativo il fenomeno dell'interferenza delle onde sonore in un tubo riempito di d'aria e chiuso a un'estremità. L'obiettivo dell'esperimento è quello di descrivere la propagazione di un'onda sonora in una colonna d'aria evidenziando come le caratteristiche dell'onda ottenuta per interferenza all'interno dipendano dalla lunghezza della colonna e dalla frequenza del suono.

Un'onda sonora generata vicino a una delle estremità del tubo si propaga nella colonna d'aria e incide sulla superficie posta all'altra estremità del tubo, subendo così una riflessione. La sovrapposizione dell'onda sonora incidente con quella riflessa dà luogo a un tipico fenomeno d'interferenza all'interno del tubo, caratterizzato dalla presenza di *nodi* e *antinodi*: nei primi l'onda risultante è nulla; nei secondi l'onda risultante raggiunge la massima ampiezza.

L'esperimento si può realizzare con due smartphone: lo smartphone in prossimità dell'estremità aperta del tubo è usato come generatore di suoni armonici; l'altro, mobile all'interno del tubo, come rivelatore dell'intensità sonora.



Materiali

- Due smartphone con PHYPHOX installato;
- un tubo, lungo all'incirca un metro, con un diametro superiore alla larghezza degli smartphone;
- un supporto per smartphone;
- un'asta graduata, o un metro da sarto o un metro a nastro.

L'esperimento

Quando il generatore di suoni del primo smartphone, che si trova a una estremità del tubo, si attiva, il secondo smartphone, con la funzione dell'audioscopio dell'app PHYPHOX attivata, si fa scivolare nel tubo per misurare l'intensità del suono in funzione della sua posizione.

La misura si esegue più facilmente mettendo lo smartphone in un tubo trasparente, posizionato in verticale o in orizzontale. In questo modo puoi misurare direttamente la sua posizione. In alternativa si può utilizzare un tubo porta poster, attaccando lo smartphone a un'asta graduata,

¹Lavoro eseguito nell'ambito di un progetto PCTO con la collaborazione di Graziano Surace, Sapienza Università di Roma.

un metro da sarto o un metro a nastro, ottenendo la posizione dello smartphone dalla misura della sua profondità. L'acquisizione e l'archiviazione dei dati si può effettuare sfruttando l'accesso remoto di PHYPHOX attivabile toccando i tre puntini verticali in alto a destra nello schermo e selezionando "accesso remoto". È importante che sia lo smartphone che il computer utilizzati per accedere con il browser Web appartengano alla stessa rete locale.

Quando si sposta uno degli smartphone nel tubo, da $x = L$, corrispondente all'estremità chiusa del tubo, a $x = 0$, corrispondente all'estremità aperta del tubo, l'intensità del suono misurato dall'audioscopio varia. In alcuni punti ha valore massimo (antinodi) e in altri punti il valore approssimativo è zero (nodi).

Misuriamo l'intensità del suono $A(x)$ in funzione della posizione x all'interno del tubo e della frequenza f , avendo cura di mantenere stabili l'apparato e l'intensità del suono emesso dalla sorgente.

Ripetiamo l'esperimento con i seguenti valori della frequenza,

$$f_n = n \left(\frac{v}{8L} \right)$$

con $\{n \in N : 5 \leq n \leq 15\}$ dove L è la lunghezza del tubo e v è la velocità del suono.

Domande

- Ci sono frequenze per cui non risulta mai $A(x) = 0$?
- Esistono frequenze in corrispondenza delle quali i massimi dell'intensità acustica sono più intensi delle altre?

Relativamente alle frequenze di cui al punto b), registra la posizione dello smartphone corrispondente sia a un segnale massimo sia a uno nullo di $A(x)$. Segna i valori di queste posizioni su un asse in cui la scala completa è la lunghezza del tubo.

- C'è una regolarità nella distribuzione di valori, cioè dove l'ampiezza dell'onda sonora è massima (antinodi) e dov'è nulla (nodi)?
- Come varia la distribuzione di questi punti in funzione della frequenza del suono e della lunghezza d'onda?
- È possibile fare una previsione sulle altre frequenze, e le relative lunghezze d'onda, per cui si verifica la stessa regolarità?
- C'è una relazione tra la lunghezza del tubo e la frequenza del suono o la lunghezza d'onda?
- Quale relazione matematica descrive le regolarità osservate?
- Quale distribuzione di nodi e antinodi dovrebbe avere l'onda all'interno del tubo se seguisse la relazione matematica trovata?

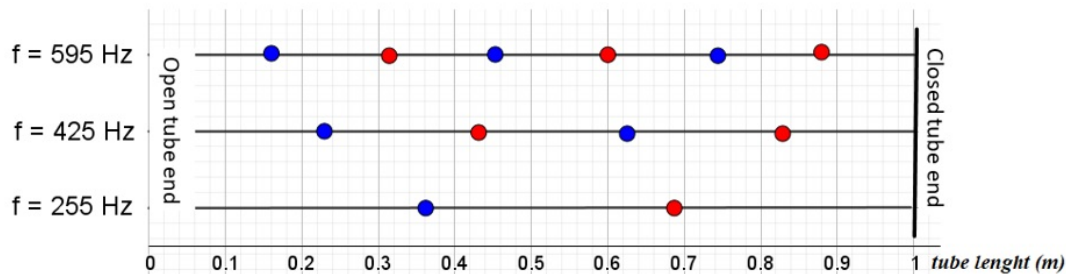
Per l'insegnante

(exp. id 20210106-2-v1)

Abbiamo preparato due brevi video per mostrare come abbiamo eseguito l'esperimento:

- `experiment.mp4` mostra l'intensità sonora misurata mentre lo smartphone scende nel tubo, tenuto in verticale. Puoi anche mettere il tubo in posizione orizzontale con il fondo contro il muro.
- `resonance.mp4` compara le misure eseguite con un tubo di un metro a due differenti frequenze: 595 Hz è una frequenza di risonanza, mentre 546 Hz non lo è.

Nell'ultimo video sono mostrati i massimi valori dell'ampiezza del suono registrati nei due esperimenti. La figura seguente mostra un grafico dove sono indicate le posizioni dei massimi (punti blu) e gli zeri (punti rossi) per tre frequenze (la misura si riferisce al caso di un tubo di un metro e una velocità del suono stimata di 340 m/s).



Possiamo fare le seguenti osservazioni.

- All'aumentare della frequenza aumenta la densità dei punti e quindi diminuisce la lunghezza d'onda.
- Per ogni frequenza, la media delle distanze tra due punti adiacenti è uguale a un quarto della lunghezza dell'onda sonora. In altre parole, per ogni frequenza, la distanza tra due nodi (punti rossi) o tra due antinodi (punti blu) è uguale alla metà della lunghezza d'onda del suono.
- Le frequenze di risonanza sono approssimativamente un multiplo dispari di $\frac{v}{4L}$, cioè la lunghezza del tubo è all'incirca un multiplo dispari di un quarto della lunghezza d'onda corrispondente.
- Aumentando la frequenza dell'onda sonora secondo la prescrizione dettata da f_n , il numero dei punti aumenta ogni volta di due unità (una volta rossa e una blu). Questo ci permette di predire le frequenze che mostrano la stessa regolarità
- Alla fine, dovrete aver trovato le seguenti relazioni:

$$f_n = \left(2n - 1\right) \frac{v}{4L} \quad (1)$$

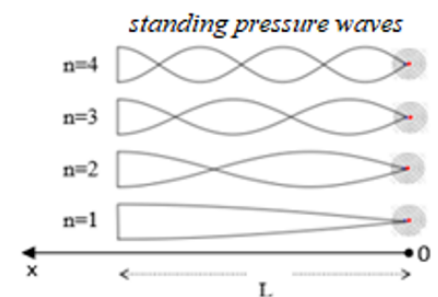
$$\lambda_n = \frac{4L}{2n - 1}, \quad (2)$$

dove v è la velocità del suono, L la lunghezza del tubo e $n \in \mathbb{N}_0$.

- Conoscendo la lunghezza del tubo e la velocità del suono è possibile prevedere le frequenze delle onde stazionarie nella colonna. Per una colonna d'aria chiusa a una estremità, tenendo aperta l'altra, le frequenze e le relative lunghezze d'onda per un'onda stazionaria sono date dalle equazioni (1) e (2)

Utilizzando un foglio di calcolo e le precedenti equazioni è possibile prevedere dove saranno i punti di ampiezza massima e minima per una data frequenza di risonanza (figura a lato).

Per confrontare le misure dell'ampiezza misurata dall'onda $A(x)$ in funzione della posizione è possibile usare la figura menzionata sopra per discutere il modello

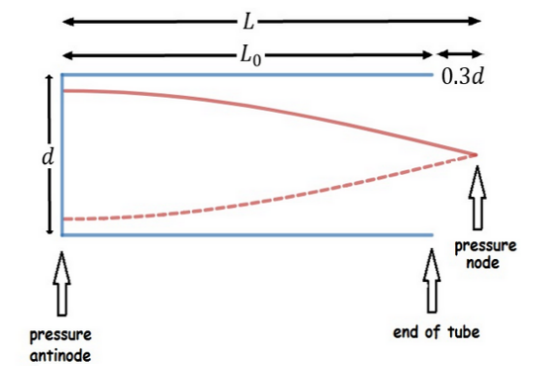


- g) L'accordo tra la previsione teorica e i risultati sperimentali può essere influenzato da errori sistematici, ovvero,
- l'effettiva velocità del suono potrebbe differire da quella usata nell'equazione (1), a seconda della temperatura, della densità e dell'umidità dell'aria;
 - l'esatta posizione del sensore dello smartphone che acquisisce i dati per l'audioscopio dell'app PHYPHOX potrebbe essere incerta (per ridurre quest'errore si può usare sempre lo stesso punto di riferimento sullo smartphone per fare la misurazione: la posizione apparente del microfono è una buona scelta; solitamente è sul bordo inferiore del telefono e si presenta come un forellino);
 - il modello usato per derivare le equazioni (1) e (2) non assume alcuna dipendenza dal diametro del tubo. Tuttavia, gli esperimenti mostrano che il raggio del tubo influenza le misure. Il motivo è che il nodo della pressione previsto dalla teoria all'estremità aperta della colonna d'aria può non coincidere con l'estremità del tubo quando si considerano tubi di raggio diverso.

La distanza dall'estremità del tubo dal nodo è all'incirca 0.3 volte il diametro del tubo. Questa distanza è chiamata *correzione dell'estremità* (*end correction*, in inglese) [1] [2] [3]. I tubi più grandi richiedono una correzione dell'estremità maggiore. Perciò la lunghezza effettiva di una colonna d'aria aperta-chiusa è leggermente più lunga rispetto al tubo stesso:

$$L = L_0 + 0.3 d$$

Dove L è l'effettiva lunghezza della colonna d'aria, L_0 è la lunghezza fisica del tubo e d è il diametro del tubo, come indicato nella figura che segue.



Questo esperimento è stato testato con successo durante un corso di formazione di fisica per insegnanti di scuole superiori nel 2018 ed è usato spesso nelle classi d'ultimo anno delle scuole superiori.

Obiettivi, Livello di sviluppo e Durata _____

- Obiettivo primario: rendere intellegibile e fruibile il concetto di onda sonora stazionaria per utilizzarlo in un'esperienza di laboratorio per verificare la descrizione teorica del fenomeno.
- Obiettivo secondario: derivare delle relazioni matematiche appropriate a descrivere l'esperimento osservato.
- Obiettivo secondario: perfezionare un modello dove teoria ed esperimento non sono in accordo, dopo aver escluso errori durante l'esperimento.
- Adatto per: scuole secondarie di secondo grado, primo anno dei corsi di laurea scientifici.
- Durata: 2-3 ore per l'acquisizione di dati + 2 ore di analisi e rappresentazione dei dati.

Approfondimenti ed altre considerazioni _____

- Quest'esperimento è ovviamente collegato al modo in cui funzionano molti strumenti musicali. Praticando fuori sulla superficie laterale del tubo nelle posizioni appropriate si possono osservare quali frequenze non sono permesse come onde stazionarie.
- Se si potesse ripetere l'esperimento in condizioni di temperatura leggermente diversa si potrebbero osservare gli effetti della diversa velocità di propagazione dell'aria (p.e., una volta stando in una stanza con aria condizionata e una volta all'esterno, quando fa caldo).
- Se si potesse effettuare l'esperimento in una camera in cui si può far variare la composizione dei gas (per esempio riempiendola di elio, o con del vapore acqueo), o la pressione, avremmo ulteriori dati interessanti su come tali fattori incidono sulla formazione di un'onda stazionaria.

Riferimenti _____

Riferimenti bibliografici

- [1] Experimenting with end-correction and the speed of sound, Michael C Lopresto, *Physics Education* Vol. 46, No.4, 2011
- [2] Pipe Diameter and End Correction of a Resonant Standing Wave, Taylor Boelkes and Ingrid Hoffmann, *ISB Journal of Physics*, January 2011
- [3] End Correction of a Resonant Standing Wave in Open Pipes of Different Diameters Syed Rashad Iqbal, Hudhaifa Mazin Abdull Majeed, *Journal of Natural Sciences Research*, Vo 1.3, No. 4, 2013

Ulteriori informazioni online _____

Lasciate opinioni, suggerimenti, commenti e notizie sull'utilizzo di questa risorsa sul canale corrispondente a questo esperimento all'interno dello spazio di lavoro di Slack "smartphysicslab.slack.com".

Gli insegnanti possono chiedere di essere registrati sulla piattaforma attraverso il modulo presente sulla *home page* di [smartphysicslab.org](http://www.smartphysicslab.org) e ottenere così l'invito alla registrazione su Slack ed essere inseriti nella *mailing list* di smartphysicslab.