

VEDERE L'INVISIBILE

Lo sguardo dello scienziato dentro le cose.

Firenze, 18-19 aprile 2024

Menzione d'onore
SEZIONE TESINE TRIENNIO

Nodi e antinodi delle onde stazionarie

Studenti

Romeo Dario - Papa Agnese - Zaccaro Francesco - Errani Francesco - Grazioli Consuelo

Classe 4D

Istituto di Istruzione Superiore
Liceo Scientifico Oriani - Ravenna (RA)

Docente Coordinatore

Baroni Maurizio

La scelta del contenuto è coerente con il titolo del concorso: si studiano onde stazionarie in un fluido con un tubo di Rubens, progettato e costruito per questo esperimento; l'attività svolta è pienamente adeguata alle conoscenze di fisica degli studenti. L'esecuzione delle misure è molto accurata e i risultati sono presentati con rigore e in modo esauriente. La discussione conclusiva sui problemi incontrati e sulle possibili soluzioni dimostra un pieno controllo sia della teoria sia del metodo di misura.

Vedere l'invisibile:

Nodi e Antinodi delle onde stazionarie

L'invisibile pulsazione del gas confinato in
un tubo, resa visibile dalla luce delle
fiammelle

Concorso ScienzaFirenze - XXI Edizione 2024

"Vedere l'invisibile. Lo sguardo dello scienziato dentro le cose."

Relazione del Docente referente

Vedere l'invisibile: ossimoro coinvolgente, affascinante; spinta verso la volontà di conoscere e scoprire ciò che i sensi non vedono e non percepiscono, ma che l'intelletto intuisce e rende visibile.

Nasce qui il piacere della nostra scoperta nel cammino di questa edizione del concorso ScienzaFirenze. Abbiamo accettato la sfida che si cela dietro quel titolo.

Hanno aderito con entusiasmo alla proposta alcuni dei nostri studenti; abbiamo deciso di indagare e approfondire quanto studiato in classe, in ambito di Termodinamica e Acustica, in un contesto che potesse trasformare l'esperienza laboratoriale tradizionale.

La provocazione iniziale è stata: cosa non riusciamo a vedere di quanto studiato? Il brain storming che ne è seguito, nel perimetro degli argomenti di fisica oggetto di studio, ha visto prendere corpo il desiderio di vedere le onde stazionarie; in un primo momento abbiamo pensato alle vibrazioni dei bicchieri di cristallo, al livello dell'acqua che ne modula le armoniche, fino ad arrivare alle onde armoniche longitudinali nei gas. Come vedere compressioni e rarefazioni? Come visualizzare qualcosa che è soltanto udibile? Eppure vedere e ascoltare possono essere correlati. Ecco allora nascere l'idea di rendere visibile con la luce, ciò che il suono modula grazie alle variazioni di pressioni di un gas.

Vedere nel fuoco delle fiammelle più o meno alte, i nodi e gli antinodi delle onde stazionarie, ecco l'idea. La ricerca in letteratura ha portato a realizzare un "tubo di Rubens" innovativo, dotato di termometro e cassa acustica Bluetooth. La velocità di propagazione del suono dipende infatti anche dalla temperatura e il tubo scalda molto il gas al suo interno. Abbiamo così pensato alle relazioni della termodinamica e alla equazione che fornisce la velocità di propagazione di un suono in un gas, unendo in questo modo effetti termici ed acustici, resi visibili dalla luce delle fiammelle.

La progettazione del lavoro ha visto la definizione meticolosa del necessario per costruire il tubo e la suddivisione dei compiti: dall'acquisto del materiale al reperimento degli utensili per forare il tubo e attaccarlo al gas. Gli studenti hanno pienamente collaborato a tutte le fasi realizzative con entusiasmo e dedizione, migliorando il setting sperimentale iniziale, discutendo i risultati, modificando i valori delle frequenze in funzione delle misure di temperatura all'interno del tubo. Diverse frequenze non sono risultate accettabili, pur previste in teoria, per via dei limiti sperimentali che via via sono stati discussi insieme. Gli studenti hanno saputo lavorare con metodo, facendo in modo che il tubo avvalorasse o meno le loro ipotesi. E così gli occhi hanno potuto vedere ciò che la natura nascondeva; il ragionare in gruppo ha poi, esso solo, reso possibile il pieno discernimento, come dice Lucrezio nel De Rerum Natura:

"Né tuttavia concediamo che qui gli occhi s'ingannino in nulla. Vedere ovunque sia la luce e l'ombra è la loro funzione; ma se sia o no la medesima luce, e se la stessa ombra che fu qui ora là trascorra, o non piuttosto avvenga quel che poco prima dicevo, questo il ragionare della mente, esso solo, deve discernere, né possono gli occhi conoscere la natura delle cose. [Lucretius – De Rerum Natura]"

Sommario

Relazione del Docente referente.....	1
Introduzione e collocazione teorica dell'esperimento.....	1
Collocazione storica.....	3
Scopo dell'esperimento.....	3
Descrizione dell'esperimento svolto.....	3
Procedura sperimentale.....	4
Descrizione e rielaborazione dei dati sperimentali.....	5
Parte comune.....	5
Calcolo degli errori sulle misure sperimentali.....	5
Misure sperimentali: 9 nodi.....	6
Misure sperimentali: 8 nodi.....	6
Misure sperimentali: 7 nodi.....	7
Misure sperimentali: 6 nodi.....	7
Misure sperimentali: 5 nodi.....	8
Misure sperimentali: 2 nodi.....	8
Sintesi dei dati sperimentali.....	9
DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	10
CONCLUSIONI.....	11
SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA.....	12

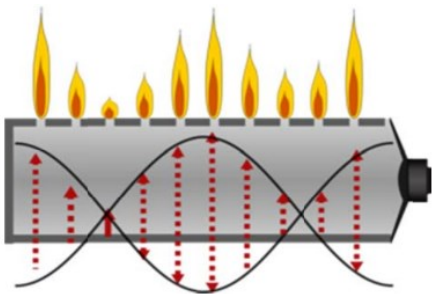
Introduzione e collocazione teorica dell'esperimento

Il tubo di Rubens è un dispositivo che permette di visualizzare il comportamento delle onde acustiche stazionarie. L'apparecchio consiste in un tubo di alluminio, sigillato a un'estremità e chiuso dall'altra con una membrana sottile, lungo il quale sono praticati una serie di fori. Successivamente viene riempito di gas infiammabile, che, durante l'esperimento, viene acceso, creando delle piccole fiamme attraverso i fori.

Quando una sorgente sonora emette una serie di frequenze facendo vibrare la membrana, le fiamme formano un modello di onda stazionaria visiva, permettendo di vedere l'invisibile, variando in altezza in base alla temperatura e alla pressione interne al tubo.

Prendendo in considerazione il principio di Bernoulli, che afferma che la somma di pressione statica, geodetica e cinetica è costante [$P + \rho gh + \frac{1}{2}mv^2 = k$], è possibile generalizzarlo affermando che $P_{dinamica} + P_{statica} = P_{tot}$, poiché la pressione geodetica è costante in quanto la quota del gas nell'esperimento rimane invariata. Si arriva così alla conclusione che il flusso di gas che esce dai fori è proporzionale alla differenza di pressione tra l'interno e l'esterno del tubo.

Quando l'altoparlante viene acceso, l'onda stazionaria all'interno del tubo crea nodi e anti-nodi. La pressione oscillante dovuta alle onde sonore permette la visualizzazione rispettivamente di nodi e anti-nodi, in corrispondenza di zone di bassa e alta pressione. Nei nodi il gas fuoriesce con difficoltà, formando fiamme più piccole, mentre dove si trovano gli anti-nodi si presenta la massima differenza di pressione e il gas genera fiamme più alte, in accordo con l'equazione di Bernoulli.



Possiamo quindi affermare che le onde longitudinali sono più una variazione in pressione che uno spostamento stesso del gas in relazione all'onda sonora. Il funzionamento del tubo di Rubens è molto simile a quello di un organo, essendo che le canne dell'organo sono aperte da un'estremità e chiuse dall'altra. Poiché l'anti-nodo più ravvicinato alla membrana si misura a $\frac{\lambda}{4}$ possiamo affermare che l'armonica fondamentale si trovi ad un quarto della lunghezza del tubo.

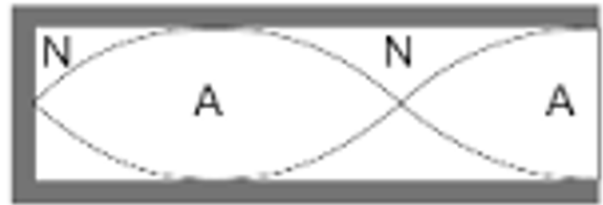
Quindi la frequenza fondamentale è: $f = \frac{v}{4L}$

Trattandosi di un tubo chiuso, si deve anche considerare che le armoniche che si andranno a visualizzare saranno solo dispari e che quindi le frequenze successive saranno $2n - 1$ volte la l'armonica fondamentale, con n che rappresenta il numero di nodi. Il tubo infatti è chiuso tramite tappo in legno siliconato da un lato e dotato di membrana elastica vibrante dall'altro lato, su cui viene appoggiato il diffusore acustico.

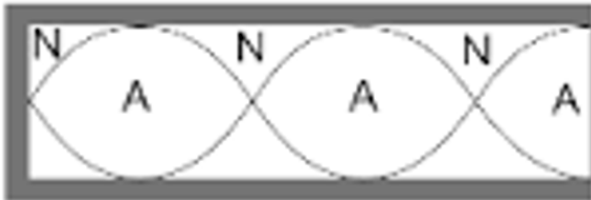
Le armoniche che si instaurano in un tubo chiuso ad una estremità sono le seguenti:



(Prima armonica o fondamentale: 1 nodo)



(Terza armonica: 2 nodi)



(Quinta armonica: 3 nodi)



(Settima armonica: 4 nodi)

Si può generalizzare quanto sopra affermando che il numero di nodi e anti-nodi che si creano in tutta la caratteristica ondulatoria del tubo dipendono dalla frequenza armonica dell'onda. Ogni armonica ha una caratteristica univoca, visualizzabile tramite le zone di compressione e rarefazione del gas. Tali zone, in base alla equazione di Bernoulli, produrranno variazioni di pressione locale nel gas (metano) e conseguentemente altezza variabile delle fiammelle, in piena armonia con le armoniche del tubo.

Per il tubo aperto da un lato e chiuso dall'altro preso in esame, la formula per calcolare le armoniche è: $f_n = \frac{(2n-1)v}{4L}$ in cui:

- n è il numero di nodi
- v è la velocità del suono nel mezzo
- L è la lunghezza del tubo

Per ottenere dati sperimentali il più accurati possibile, è stato necessario mettere in relazione la velocità del suono nel mezzo utilizzato e la sua temperatura. La formula che definisce la velocità delle onde sonore longitudinali in un mezzo è la seguente:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$$

- ρ_0 è la densità del mezzo attraverso cui l'onda viaggia
- B è il modulo di elasticità cubico (modulo di compressione) $B = \frac{\Delta P V}{\Delta V}$:

rapporto tra la variazione ΔP di pressione su un corpo e la variazione del volume $\frac{\Delta V}{V}$.

Si deve tenere conto che nel caso dei gas i processi non sono isotermici, bensì adiabatici. Quindi la relazione va sostituita con quella più corretta: $B^1 = \gamma P_0$ (in condizione di compressione adiabatica, quando le compressioni e rarefazioni sono così rapide che non permettono scambi di calore tra il sistema e l'ambiente circostante).

Se il mezzo è un gas è possibile esprimere B in funzione della pressione di equilibrio del gas P_0 .

Per un'onda sonora $v = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$ dove $\gamma = \frac{c_p}{c_v} \rightarrow$ rapporto tra calori specifici di quel gas.

$$P_0 = \frac{nRT}{V} \text{ quindi, sostituendo nella prima equazione che definiva la velocità } \Rightarrow v = \sqrt{\frac{\gamma nRT}{V \cdot \rho_0}}$$

A questo punto sappiamo che $v \cdot \rho_0 = m$ e, di conseguenza che $\frac{n}{m} = M_A$

In conclusione, la velocità ora si può descrivere come:
$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M_A}}$$

Tale equazione è la sintesi della termodinamica che sarà applicata all'analisi acustica dell'onda stazionaria.

Collocazione storica

Il fisico tedesco Heinrich Rubens ha scoperto un modo di dimostrare visivamente le onde acustiche stazionarie, utilizzando ciò che ad oggi identifichiamo come "tubo di Rubens". Lo scienziato utilizza un tubo in ottone con 200 fori praticati su tutta la lunghezza. Successivamente, riempiva lo strumento con il gas per un totale di 2 minuti e dava fuoco alle fiammelle che si trovavano sulla lunghezza. Il tubo era sigillato da entrambi i lati e le frequenze erano emesse tramite un diapason chiuso all'interno di una scatola e inserito nel tubo. Alla risonanza del tubo, era possibile vedere l'onda stazionaria al di sopra, con la pressione corrispondente a quella della fiamma.

Allo stesso modo, nel 1866, un fisico di nome August Kundt tentò di dimostrare le onde stazionarie utilizzando un tubo simile a quello di Rubens, ma inserendo sabbia finissima in esso. All'emissione del suono riscontrò che la sabbia si concentrava in punti caratteristici, quali i nodi e gli anti-nodi.

Scopo dell'esperimento

Visualizzare nodi e antinodi di un'onda armonica stazionaria in un gas tramite la differente altezza della fiamma di n fiammelle uscenti da fori consecutivi praticati in un tubo (Tubo di Rubens). La valutazione sperimentale considera la velocità di propagazione del suono in un gas in funzione della temperatura.

Rendere visibile (fiamma), l'invisibile (nodi e antinodi dell'onda stazionaria)

Descrizione dell'esperimento svolto

Abbiamo costruito da zero un prototipo di tubo di Rubens tramite la foratura con punta da ferro di un tubo di 200 cm di alluminio, praticando fori con passo di 2 cm. (vedi immagine)



Abbiamo quindi chiuso una estremità con tappo di legno siliconato e applicato all'altra estremità una membrana elastica a cui appoggiare il diffusore acustico. Sono stati applicati due ingressi per il gas metano a due ulteriori fori da 14 mm, filettati. Gli innesti sono stati resi ermetici applicando teflon sul filetto.

I due innesti sono stati quindi portati ad un connettore a forma di "T", collegato poi all'uscita del gas metano in laboratorio. Tutti gli innesti sono stati verificati con acqua saponata e fascettati per evitare fughe di gas.

Il tubo è stato infine posto su appositi piedistalli per mantenerlo perfettamente orizzontale.

Procedura sperimentale

La procedura seguita per rendere operativo l'esperimento è la seguente:

- Apertura del gas e accensione del tubo tramite accendino. Attesa di circa 30 secondi per stabilizzare la fiamma
- Misurazione della temperatura all'interno del tubo tramite il termometro inserito nell'estremità chiusa del tubo (tappo in legno con foro per il termometro)
- Determinazione della velocità di propagazione del suono nel gas (metano) dalla formula precedentemente dimostrata $v = \sqrt{\frac{\gamma TR}{M_A}}$; la formula è stata inserita in Excel in modo da avere rapidamente il risultato in funzione della temperatura istantanea.

INSERISCI LA TEMPERATURA

25 °C

Velocità : 454

=RADQ(4/3*8,314*(273,15+G3)/0,016)

(la cella G3 è quella della temperatura sopra riportata) [nel seguito: formula 2]

- Valutazione della lunghezza d'onda teorica desiderata tramite la formula: $\lambda_n = \frac{4L}{(2n-1)}$ con n numero di nodi desiderato (tale numero di nodi è quello che dovrà poi essere visualizzato sul tubo dalle fiammelle) [nel seguito: formula 1]
- Determinazione della frequenza dell'armonica desiderata: la velocità ricavata si inserisce nella formula di f_n , sostituendo n con il numero dell'armonica che si desidera visualizzare: $f_n = \frac{v}{\lambda_n}$ [nel seguito: formula 3]
- Invio della frequenza al tubo tramite cassa Bluetooth
- Analisi dell'onda armonica rappresentata tramite le fiammelle e conteggio del numero di nodi con confronto rispetto a quanto teoricamente atteso
- Misurazione della semilunghezza d'onda tramite il conteggio del numero di fiammelle tra due antinodi consecutivi (picchi di fiamma consecutivi)
- Comparazione tra lunghezza d'onda teorica attesa e lunghezza d'onda sperimentale ricavata
- Calcolo dello scostamento e degli errori
- Ripetizione della procedura per diversa frequenza (verificando la nuova temperatura istantanea)

Descrizione e rielaborazione dei dati sperimentali

Parte comune

Riepilogo delle formule, già introdotte nella trattazione teorica e riprese per comodità di riferimento:

- Valutazione della lunghezza d'onda teorica desiderata tramite la formula:

$$\lambda_n = \frac{4L}{(2n-1)} \text{ [formula 1]}$$

- Determinazione della velocità di propagazione del suono nel gas, in funzione della temperatura:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma TR}{M_A}} \text{ [formula 2]}$$

- Determinazione della frequenza dell'armonica desiderata:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} \text{ [formula 3]}$$

In relazione alla procedura sperimentale sopra riportata si riportano nel seguito le immagini delle armoniche visualizzate e l'analisi dei dati conseguenti a ciascuna forma d'onda. Ogni fotografia del tubo di Rubens visualizza l'armonica con i dati di frequenza, temperatura, lunghezza d'onda e numero di nodi, così da permettere il confronto tra i dati sperimentali e i risultati teorici attesi con relativo scostamento. Si procede poi con l'analisi puntuale dei dati sperimentali.

Calcolo degli errori sulle misure sperimentali

Si riporta la tabella completa con misure ed errori dopo la parte di raccolta dei dati sperimentali

Lunghezza del tubo	2,00 m	Tubo di alluminio appositamente tagliato e forato
Errore sulla lunghezza d'onda teorica:	± 0,01 m	si ottiene come prodotto dell'errore assoluto su L (0,01 m) per la misura di λ
Errore sulla temperatura	± 0,1 °C	(strumento digitale preciso al decimo di grado centigrado)
Errore sul calcolo della velocità		si ottiene come propagazione degli errori relativi sulla formula di v, considerando l'incertezza su T: $\Delta v = \frac{\Delta T}{T} \cdot 0,5 \cdot v$
Intervallo di frequenze possibili		Si ottiene considerando gli estremi dell'intervallo con: $f_{\min} = v_{\min} / \lambda_{\max}; f_{\max} = v_{\max} / \lambda_{\min}$
Frequenza immessa		Si ottiene come mediana dell'intervallo di frequenze possibili
Errore sulla lunghezza d'onda misurata:	± 0,02 m	Si ottiene in base alla precisione dovuta al passo tra le fiammelle

Misure sperimentali: 9 nodi

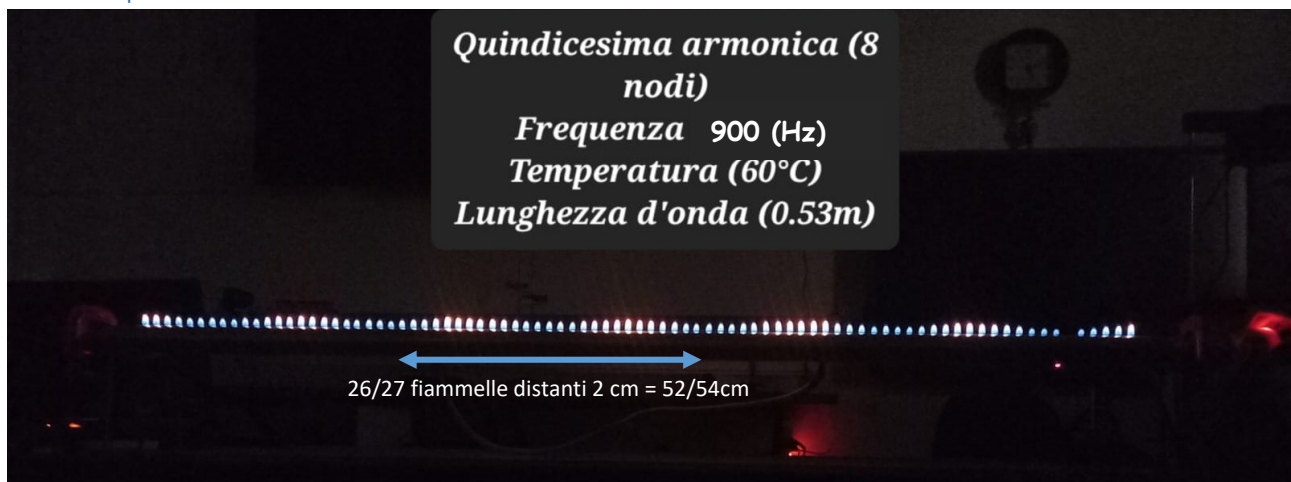


L'immagine visualizza i 9 nodi richiesti dalla 17° armonica. Il primo nodo è in corrispondenza del morsetto rosso di sinistra dove il tubo risulta chiuso dal tappo in legno. Il 9° nodo è nella zona del morsetto di destra, a cui segue poi la sorgente sonora. In tutte le immagini il nodo di destra è in prossimità del morsetto di destra. Dopo di che l'onda, seguendo lo schema delle distanze tra i vari massimi, si rialza fino alla cassa.

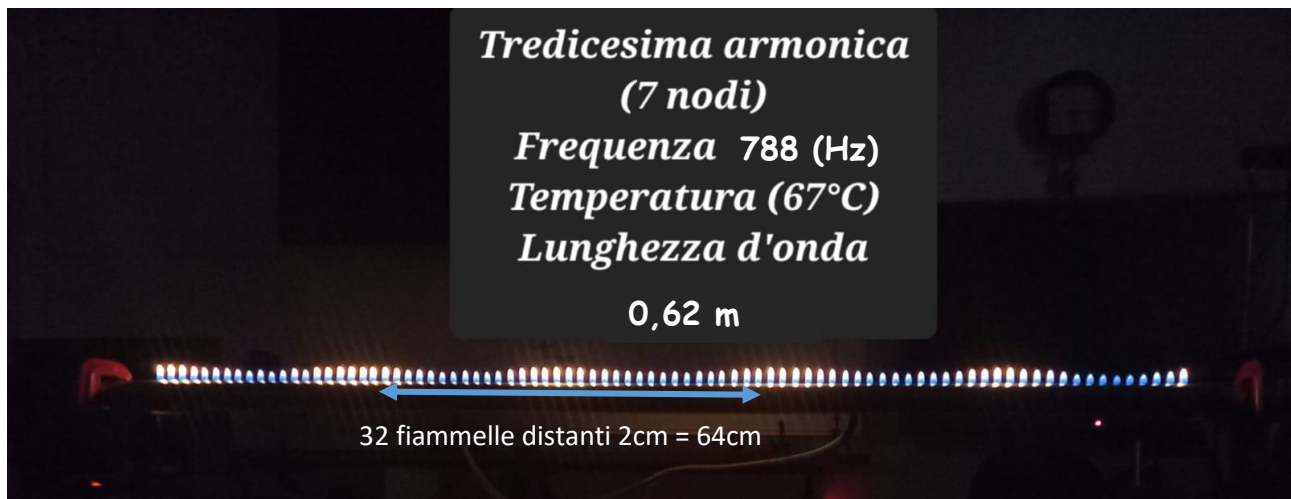
Tale andamento finale non è visualizzato in quanto non sono presenti i fori necessari, che porterebbero ad un surriscaldamento della membrana e della cassa acustica, ma sono desumibili dalla forma complessiva dell'onda armonica e dall'analisi delle distanze, riportando la lunghezza d'onda fino alla cassa acustica. Tale situazione è comune a tutte le armoniche successivamente descritte.

La figura riporta in basso la lunghezza d'onda: 24 FIAMMELLE, corrispondenti quindi, visto il passo di 2 cm tra due fiammelle, a 48 cm complessivi, in ottimo accordo con la lunghezza d'onda teorica attesa (47 cm)

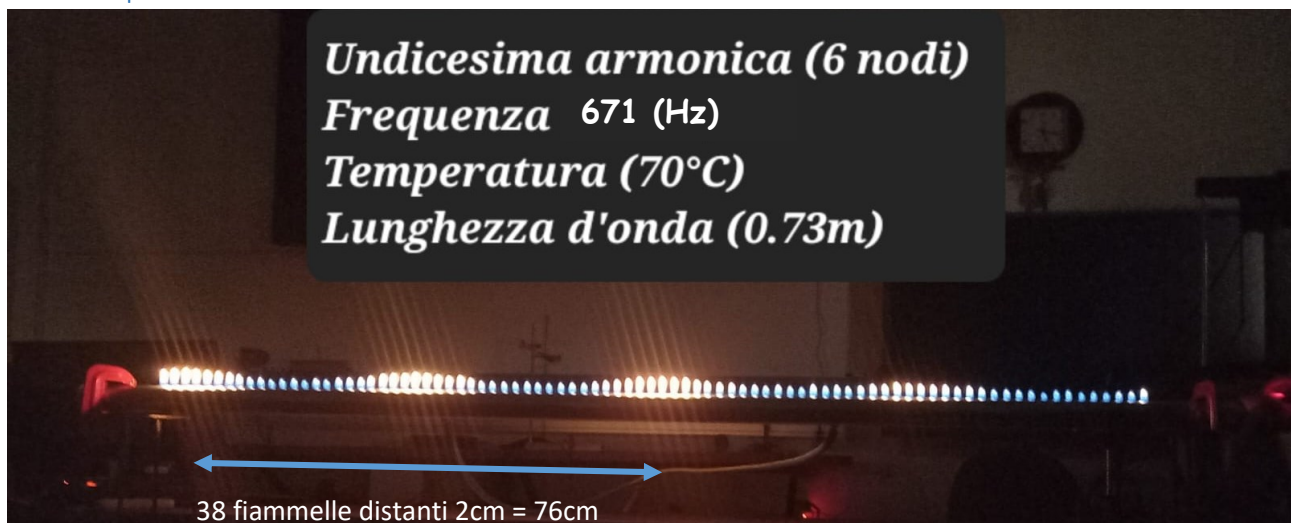
Misure sperimentali: 8 nodi



L'immagine visualizza gli 8 nodi richiesti dalla 15° armonica. Il primo nodo è in corrispondenza del morsetto rosso di sinistra dove il tubo risulta chiuso dal tappo in legno. L' 8° nodo è nella zona del morsetto di destra, a cui segue poi la sorgente sonora. In tutte le immagini il nodo di destra è in prossimità del morsetto di destra. Dopo di che l'onda, seguendo lo schema delle distanze tra i vari massimi, si rialza fino alla cassa. La figura riporta in basso la lunghezza d'onda: 27 FIAMMELLE, corrispondenti quindi, visto il passo di 2 cm tra due fiammelle, a 54 cm complessivi, in ottimo accordo con la lunghezza d'onda teorica attesa (53 cm)



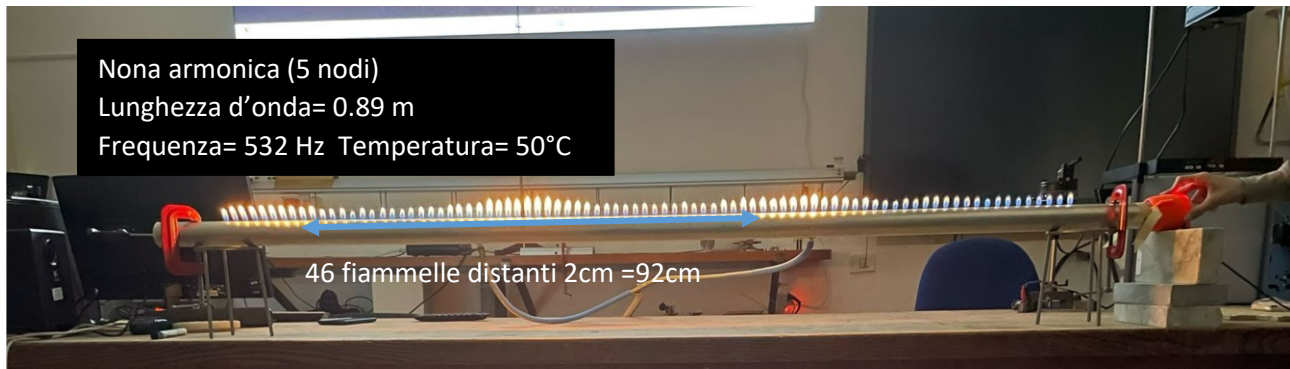
L'immagine visualizza i 7 nodi richiesti dalla 13° armonica. Il primo nodo è in corrispondenza del morsetto rosso di sinistra dove il tubo risulta chiuso dal tappo in legno. Il 7° nodo è nella zona del morsetto di destra, a cui segue poi la sorgente sonora. In tutte le immagini il nodo di destra è in prossimità del morsetto di destra. Dopo di che l'onda, seguendo lo schema delle distanze tra i vari massimi, si rialza fino alla cassa. La figura riporta in basso la lunghezza d'onda: 32 FIAMMELLE, corrispondenti quindi, visto il passo di 2 cm tra due fiammelle, a 64 cm complessivi, in ottimo accordo con la lunghezza d'onda teorica attesa (61 cm). I punti corrispondenti agli antinodi per il conteggio sono considerati dai punti alti iniziali a destra, considerando che il tubo del gas va ad alzare le fiammelle successive.



L'immagine visualizza i 6 nodi richiesti dalla 11° armonica. Il primo nodo è in corrispondenza del morsetto rosso di sinistra dove il tubo risulta chiuso dal tappo in legno. Il 6° nodo è nella zona del morsetto di destra, a cui segue poi la sorgente sonora. In tutte le immagini il nodo di destra è in prossimità del morsetto di destra. Dopo di che l'onda, seguendo lo schema delle distanze tra i vari massimi, si rialza fino alla cassa.

La figura riporta in basso la lunghezza d'onda: 38 FIAMMELLE, corrispondenti quindi, visto il passo di 2 cm tra due fiammelle, a 76 cm complessivi, in ottimo accordo con la lunghezza d'onda teorica attesa (73 cm).

Misure sperimentali: 5 nodi

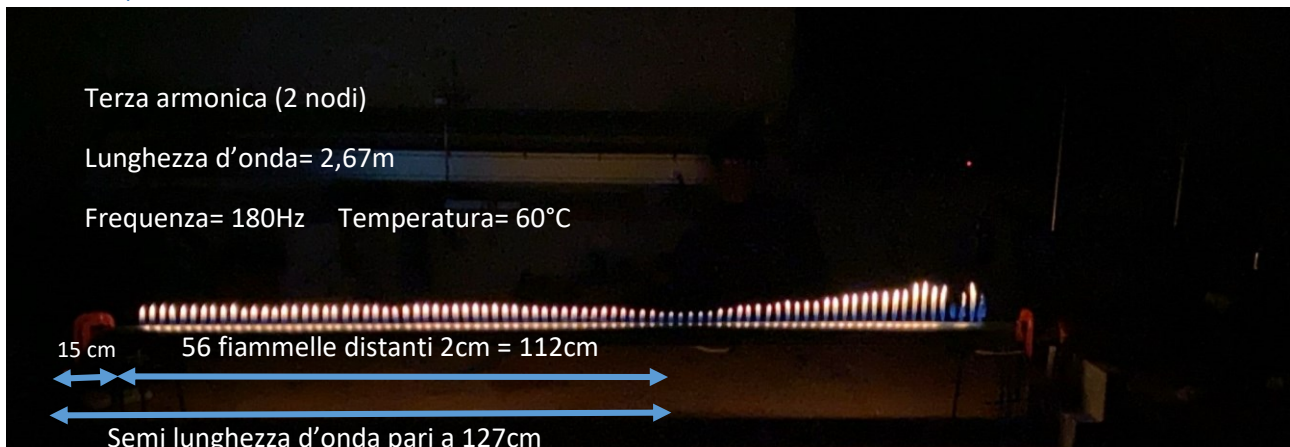


L'immagine visualizza i 5 nodi richiesti dalla 9° armonica. Il primo nodo è in corrispondenza del morsetto rosso di sinistra dove il tubo risulta chiuso dal tappo in legno. Il 5° nodo è nella zona del morsetto di destra, a cui segue poi la sorgente sonora. In tutte le immagini il nodo di destra è in prossimità del morsetto di destra. Dopo di che l'onda, seguendo lo schema delle distanze tra i vari massimi, si rialza fino alla cassa. In questa immagine il nodo di destra è difficilmente individuabile per cui si prendono le misure nella parte sinistra.

La figura riporta in basso la lunghezza d'onda: 46 FIAMMELLE, corrispondenti, visto il passo di 2 cm tra due fiammelle, a 92 cm complessivi, in ottimo accordo con la lunghezza d'onda teorica attesa (89 cm). I punti di misura sono considerati dalla variazione di altezza delle fiamme.

Le armoniche con numero di nodi inferiori, a causa delle frequenze più basse che la cassa acustica utilizzata deve emettere, risultano con maggiore margine di errore. Si riporta per completezza la terza armonica a 180 Hz.

Misure sperimentali: 2 nodi



L'immagine visualizza i 2 nodi richiesti dalla 3° armonica. Il primo nodo è in corrispondenza del morsetto rosso di sinistra dove il tubo risulta chiuso dal tappo in legno. Nella parte di sinistra è presente un massimo, in accordo con la forma d'onda della terza armonica:



La figura riporta in basso la semilunghezza d'onda: 56 FIAMMELLE, corrispondenti quindi, visto il passo di 2 cm tra due fiammelle, a 112 cm complessivi. A tale valore occorre aggiungere 15 cm per arrivare al nodo in fondo al tubo. In questa misura si ricava, a differenza di tutte le altre, la semilunghezza d'onda in considerazione della forma particolare dell'armonica con 1 solo nodo intermedio. Il valore sperimentale è quindi 1,27 m pari a 2,54 m per la lunghezza d'onda, in buon accordo con la lunghezza d'onda teorica attesa (2,67 m). Lo scostamento è in questo caso pari a circa il 4% considerando gli intervalli di errore.

Sintesi dei dati sperimentali

numero NODI (n)	Armonica	Lunghezza d'onda teorica (m) (formula: $4L/(2n-1)$)	Errore sulla lunghezza d'onda teorica (m)	Temperatura (°C)	Errore su T (°C)	velocità impostata (m/s)	Errore su v (m/s)	Intervallo di frequenze possibili		FREQUENZA IMMESSA (Hz) (mediana)	Lunghezza d'onda misurata (m)	Errore sulla lunghezza d'onda misurata (m)	Rientra nell'intervallo previsto dagli errori
5	NONA	0,89	0,01	50,0	0,1	473,0	0,5	526	539	532	0,92	0,02	SI
6	UNDICESIMA	0,73	0,01	70,0	0,1	488,0	0,3	661	681	671	0,76	0,02	SI
7	TREDICESIMA	0,62	0,01	67,0	0,1	485,0	0,4	775	802	788	0,64	0,02	SI
8	QUINDICESIMA	0,53	0,01	60,0	0,1	480,0	0,4	883	918	900	0,54	0,02	SI
9	DICIASSETTESIMA	0,47	0,01	58,0	0,1	479,0	0,4	996	1041	1018	0,48	0,02	SI
2	TERZA	2,67	0,01	60,0	0,1	480,0	0,4	179	181	180	2,54	0,02	NO, SCOSTAMENTO 4%

Si riporta nell'ultima colonna la valutazione del fatto che la misura sperimentale della lunghezza d'onda e quella teorica si sovrappongano o meno nei rispettivi intervalli di errore.

Tutte le misure sono in ottimo accordo con il modello teorico legato alla velocità di propagazione del gas e all'armonica. Lo scostamento più rilevante è per la misura relativa alla terza armonica (2 nodi).

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La decisione di realizzare un Tubo di Rubens è stata presa partendo dal comune desiderio di realizzare con creatività uno strumento affascinante e originale come approfondimento di argomenti già trattati in classe, così da poterlo mostrare ai compagni durante i laboratori di fisica. La prima idea è stata abbozzata quando abbiamo visualizzato su YouTube dei video con fiammelle danzanti a ritmo di musica, e quando il nostro prof l'ha approvata eravamo entusiasti di dare inizio ai lavori. Per prima cosa, ci siamo lanciati alla ricerca di un tubo adatto all'esperimento e ne abbiamo trovato uno perfetto da una Azienda locale.

Con l'appoggio delle mani esperte del nostro tecnico di laboratorio, abbiamo misurato con cautela il tubo e deciso di forarlo ogni 2cm con punte di diametro 2mm, così da ottenere 85 fori. Per immettere il gas abbiamo prudentemente creato due buchi ogni 66cm circa (a $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ del tubo) di diametro 14mm per poi filettarli e inserirci 2 attacchi per il gas.

In seguito abbiamo dato forma al tappo partendo da una tavola di legno, per poi sigillarlo col silicone a un'estremità del tubo. Poi, per raccogliere dati più precisi durante l'esperimento, lo abbiamo forato per poter inserire un termometro con portata di 300°C all'interno del tubo. Infine abbiamo tagliato e teso una membrana elastica, chiudendo l'altra estremità del tubo, quella da sottoporre alle vibrazioni di una cassa acustica Bluetooth.

Prima di ottenere risultati visibili, abbiamo riscontrato e affrontato insieme alcuni problemi riguardanti principalmente:

- la propagazione di frequenze inferiori a 100 Hz, in quanto la cassa non forniva sufficiente risposta in frequenza; analoga problematica per frequenza oltre 1,2 kHz. Pertanto ci siamo limitati all'intervallo 180-1020 Hz.
- I punti di immissione del gas provocano localmente interferenze con l'altezza delle fiammelle, pertanto tali zone sono state al possibile escluse dall'analisi; la distribuzione migliorava diminuendo la pressione del gas in ingresso.
- La membrana elastica si buca per via della eccessiva tensione e temperatura e per la bava residua nell'alluminio dopo il taglio a misura del tubo. Tale problema è stato risolto limando l'estremità con carta vetrata e applicando nastro isolante.
- Le misure erano fortemente influenzate dalla temperatura nel tubo, di cui non avevamo la precisa misurazione. Pertanto abbiamo applicato un termometro internamente al tubo e non all'esterno di esso.
- Non potendo forare il tubo fino alla estremità per non surriscaldare la cassa acustica, la visualizzazione del nodo iniziale non risulta possibile; pertanto lo abbiamo valutato riportando in tale zona il passo tra i nodi precedenti. In corrispondenza della cassa l'onda ritornerebbe ad alzarsi dopo il nodo ma non è visibile. Le misure sono pertanto state prese nelle zone centrali il più possibile
- Su diverse forme d'onda la zona degli antinodi è estesa a più fiammelle e ciò ha reso difficile l'effettuazione di alcune misure, in particolare nella zona di immissione del gas. Inoltre le misure per alcune armoniche sono state rese più complicate dalla presenza di più fiammelle a pari quota. Per tali situazione si è considerata la prima fiammella adiacente alla variazione di altezza del profilo d'onda.
- Abbiamo dovuto rinunciare alla visualizzazione della 5° e 7° armoniche, nonostante la frequenza fosse superiore a 180 Hz, in quanto la configurazione delle fiammelle non corrispondeva alle misure teoriche. La discussione ha portato a ritenere che la causa

potesse derivare dalla risonanza delle pareti del tubo o ad effetti di interferenza trascurabili al crescere della frequenza. Ciò in quanto per tali armoniche le fiammelle del primo tratto di tubo si spegnevano completamente.

- Abbiamo ritenuto utile in fase di discussione la possibilità di avere 1 solo ingresso per il gas per limitare gli effetti locali di perturbazione con l'onda sonora, addirittura su un piano perpendicolare ai fori di uscita. Tale situazione non è stata riprodotta avendo già forato il tubo con 2 immissioni separate, in quanto pensavamo di ottimizzare la distribuzione del gas all'interno del tubo.
- La scelta ottimale del diffusore acustico ha visto diverse casse di forma diversa: circolare, rettangolare con speaker di dimensione diversa. La cassa ottimale è risultata di forma circolare con diametro pari a quello del tubo.
- La cassa è stata posta in contatto con la membrana vibrante dopo diversi tentativi. Abbiamo potuto osservare che la situazione ottimale si aveva con la cassa premuta contro la membrana

CONCLUSIONI

L'analisi dei risultati sperimentali riportati in tabella, denota il successo dell'esperimento e la rispondenza dei valori rilevati sperimentalmente sul tubo con quelli previsti dallo studio teorico della termodinamica e dell'acustica.

Abbiamo reso visibili le zone di compressione e rarefazione dell'onda acustica del gas, normalmente invisibili ad occhio nudo.

L'indagine sperimentale è stata particolarmente significativa nel rendere visibile il moto, altrimenti invisibile, di compressione e rarefazione del gas, come una danza delle sue molecole al suono della musica.

Secondo noi i possibili sviluppi del lavoro in ambito scientifico e culturale possono riferirsi ad approfondimenti didattici della propagazione delle onde acustiche longitudinali, tramite compressione e rarefazione di un fluido; la correlazione tra termodinamica e acustica è un elemento di sicuro interesse per i programmi di fisica e può sviluppare, tramite il tubo, argomenti di forte interazione dei rispettivi ambiti di indagine; in musicoterapia infine può aiutare ad utilizzare in modo sinergico vista e udito, anche a livello terapeutico, così da creare un ambiente di immersione olistica nella musica, ... finalmente resa visibile.

SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA

- Libro di Testo "La fisica di Cutnell-Johnson", volume 1 e 2, ed.Zanichelli
- T.D. Rossing: "Average pressure in standing waves", The Physics Teacher 15, 260 (1977)
- R. Coleman: "The flaming air track", The Physics Teacher 13, 556 (1975). (<http://scitation.aip.org/tpt/>)

- grønlund G.W. Ficken and F.C. Stephenson: "Rubens flame-tube demonstration", The Physics Teacher 17, 306 (1979). (<http://scitation.aip.org/tpt/>)
- Per generare le frequenze: Soundcard Scope (https://zeitnitz.eu/scope_en)
- Per la costruzione del tubo (<https://ucscphysicsdemo.sites.ucsc.edu/physics-5b6b-demos/rubens-tube/>)