

# SCIENZA FIRENZE

*Decima Edizione*

*Ordine e disordine nel mondo della natura*

*La dimensione sperimentale  
nello studio delle scienze*

*Firenze, 16-17 aprile 2013*

## *SEZIONE TESINA TRIENNIO*

*Menzione d'Onore*

*Adamo Carpaneto, Francesco Gazzo, Greta Pozzi*

*Classe I C, III G*

*Liceo Classico "Berchet"*

*Milano*

*Docente Coordinatore Prof.ssa Barbara Chierichetti*

*Titolo*

*Why these and not others?*

*Motivazione*

*Il nesso con il tema del concorso risulta ben definito, anche se non molto originale: lo studio di un fenomeno disordinato – la sovrapposizione di onde lungo una corda a estremi fissi – che a certe condizioni diventa ordinato, dando luogo al fenomeno delle onde stazionarie nella corda. Il lavoro sperimentale è stato svolto in modo accurato, con attenzione alla teoria della misura. Opportuna per un liceo classico l'introduzione di carattere storico, con un apprezzabile riferimento alla musica.*

## Relazione dell'insegnante allegata alla tesina dal titolo: **Why these and not others?**

Questa proposta è stata rivolta a due studenti della classe I e ad una studentessa della classe III del Liceo Classico.

L'introduzione teorica e l'attività sperimentale sono state svolte nel laboratorio di fisica durante ore extracurricolari.

Ho scelto lo studio delle onde stazionarie perché mi è sembrato potesse offrire buoni spunti per l'argomento che è tema del convegno. Inoltre, questo fenomeno è strettamente legato alla prima matematizzazione nota nella storia di un fenomeno fisico, cioè la scoperta del legame tra le lunghezze delle corde e l'esistenza di intervalli musicali armoniosi, scoperta attribuita a Pitagora.

Ho quindi invitato i ragazzi ad arricchire il loro lavoro con una ricerca storica sull'argomento.

Per questa parte è stata molto importante la collaborazione di un collega insegnante di greco e di docenti universitari che mi hanno validamente aiutato ad indirizzare le ricerche.

Lo sviluppo del percorso realizzato con gli studenti si può sostanzialmente dividere in tre fasi.

- **Prima fase: introduzione teorica**

All'inizio del percorso, poiché nessuno studente possedeva conoscenze in merito ai moti armonici e alle onde meccaniche, è stata necessaria una lunga fase di preparazione, durante la quale ho cercato di far loro comprendere gli aspetti essenziali di tali fenomeni. Solo così hanno potuto essere in grado di affrontare in modo consapevole il loro studio. Mi sono servita di diversi strumenti a disposizione della scuola, dal sistema di acquisizione di dati on-line per mostrare un esempio di moto armonico con un sistema massa-molla, all'uso di simulazioni al computer, oltre ovviamente delle lezioni frontali.

- **Seconda fase: costruzione dell'apparato sperimentale ed esecuzione delle misurazioni**

In questo percorso sono stati eseguiti due tipi di prove, una in cui, a parità di lunghezza e di tensione della corda, si faceva variare la frequenza della sorgente e una dove, a parità di lunghezza e frequenza della sorgente, si faceva variare la tensione della corda.

Nel primo caso abbiamo usato materiale molto povero: una corda per arrampicata, dei dischi per il lancio dei pesi come zavorra e per sorgenti gli studenti. La riuscita dell'esperimento non è stata immediata, infatti è stato necessario del tempo perché i ragazzi si impraticassero e riuscissero a generare onde con regolarità.

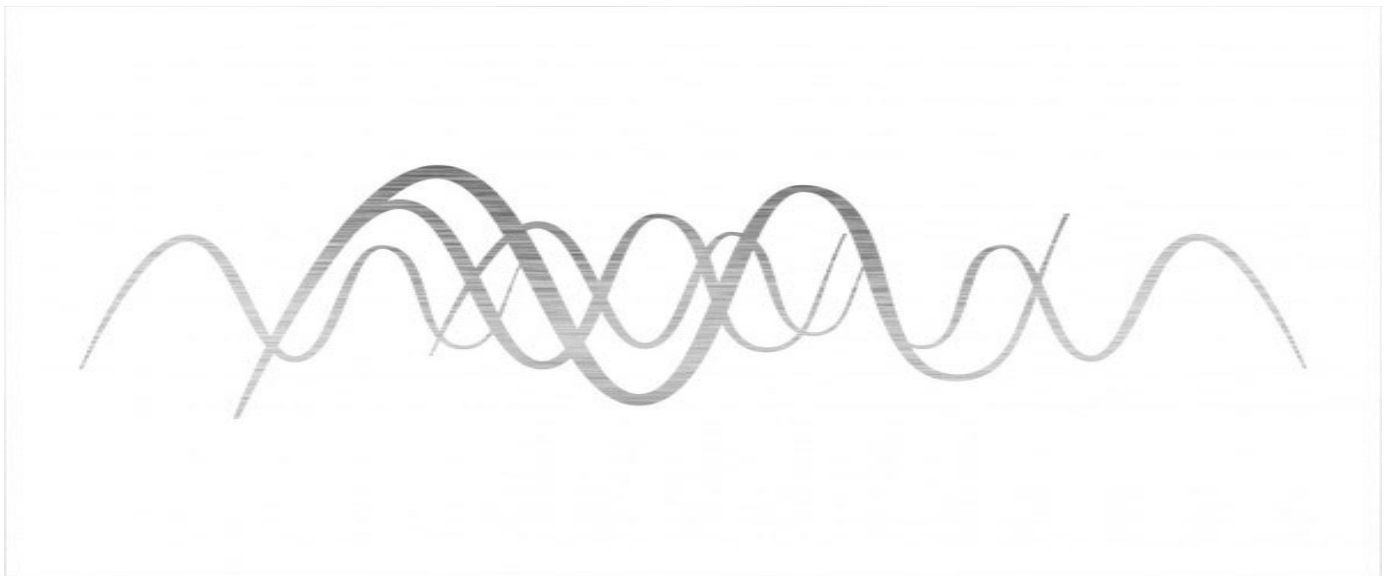
Nel secondo caso abbiamo utilizzato un dispositivo che sfruttava come sorgente il batacchio di un campanello elettrico alimentato da un generatore a bassa tensione. Il momento delicato di questo secondo tipo di misura è stato certamente nell'uso del dinamometro e nell'individuare il momento in cui si veniva a formare la configurazione d'interferenza costruttiva massima. Anche in questa circostanza sono state necessarie alcune prove prima che gli studenti fossero in grado di eseguire correttamente la misura.

- **Terza fase: discussione ed elaborazione dei dati**

I dati raccolti sono stati regolarmente confrontati dagli studenti con quelli previsti teoricamente e in questo paragone venivano individuati i punti o gli aspetti su cui si doveva prestare attenzione o operare delle correzioni nell'esecuzione dell'esperimento la volta successiva.

Al termine di questo percorso, posso affermare che gli studenti hanno fatto l'esperienza, per loro del tutto nuova, di incontrare la dimensione sperimentale della scienza, ed inoltre ho potuto mostrare che un'indagine scientifica rivela un ordine, come quello scoperto da Pitagora, che ha radici più profonde.

# WHY THESE AND NOT OTHERS?



## *Ringraziamenti:*

*Si ringraziano le numerose persone che ci hanno sostenuto e aiutato a realizzare questa tesina. In particolare ringraziamo il prof. Gherlone per le utili indicazioni nella ricerca dei testi in greco e il sig. Mimmo per la costruzione del generatore di onde stazionarie.*

## **INDICE:**

1. Introduzione	p. 2
2. Un po' di storia...	p. 2
3. Le onde stazionarie	p. 3
4. Apparato sperimentale e misurazioni	p. 5
5. Esperimenti con la corda da arrampicata e con il cordino di nylon	p. 6
6. Esperimento con il "campanello elettrico"	p. 8
7. Conclusioni	p. 12
8. Bibliografia	p. 12

# 1. Introduzione

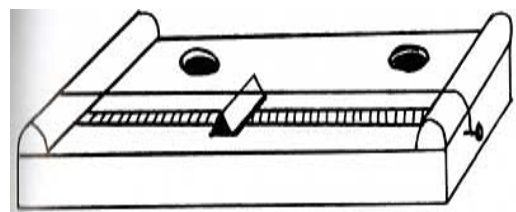
Tutto è iniziato all'inaugurazione del laboratorio di fisica del nostro liceo. Lì abbiamo scoperto l'opportunità di partecipare a questo progetto e ci è sembrato fantastico. Il titolo "ordine e disordine nel mondo naturale" ci sembrava intrigante e ci ha subito colpito perché pensavamo che le leggi descritte dalla fisica che possono sembrare perfette e cristalline e fossero valide per ogni situazione. Volevamo approfondire un argomento che tuttavia si legasse non solo alla fisica, ma anche ad altre materie di nostro interesse e studio. Abbiamo così deciso di occuparci delle onde stazionarie applicate al caso particolare di una corda vibrante con estremità fisse. Ciò che abbiamo voluto fare è stato verificare le formule teoriche ispirandoci a Galileo: " Voi, da vero scienziato, fate una ben ragionevole domanda; e così si costuma e conviene le scienze le quali alle conclusioni naturali applicano dimostrazioni matematiche, come si vede ne i prospettivi, negli astronomi, ne i meccanici, ne i musicisti ed altri, li quali con sensate esperienze confermano i principi loro, che sono i fondamenti di tutta la seguente struttura"<sup>1</sup>.

All'inizio non avevamo idea ben precisa su che cosa fosse un'onda stazionaria e pensavamo, dopo aver letto la descrizione dell'esperimento, che fosse banale riprodurre una, ma abbiamo constatato che non è così e che vi entrano in gioco diversi fattori come la frequenza, la tensione e la lunghezza della corda .



## 2. Un po' di storia...

Per studiare il fenomeno delle onde stazionarie ci siamo spinti fino al V secolo a.C. quando il matematico e filosofo Pitagora matematizzò per primo un fenomeno fisico: si racconta che un giorno passò davanti alla bottega di un fabbro e fu attratto dai suoni prodotti dalle incudini colpite da martelli: Pitagora riteneva che quei suoni si ripetessero a intervalli musicali regolari. Fondamentale fu l'apprendere che i martelli avessero diverso peso, il che gli fece concludere che gli intervalli fossero in relazione con il peso di questi. Quando tornò a casa, studiò il fenomeno su un monocordo, uno strumento musicale composto da una corda tesa tra due estremi fissi e sotto cui scorre un capotasto mobile che consente di accorciare la lunghezza effettiva della corda vibrante a proprio piacimento. Da questo esperimento Pitagora individuò due tipi di suoni: armonici e non armonici. I suoni armonici sono quelli gradevoli al nostro orecchio e corrispondono a frazioni semplici come  $2/1$ , mentre quelli non armonici risultano sgradevoli e corrispondono a frazioni come  $7/17$ . Pitagora e i pitagorici scoprirono quindi un legame tra suoni e numeri: l'intervallo tra due note emesse è gradevole a udirsi quando le lunghezze delle corde stanno tra loro in un rapporto semplice. In un frammento di Porfirio<sup>2</sup> da noi tradotto è riportata la testimonianza di Senocrate a proposito



Rappresentazione di un monocordo

<sup>1</sup> Galilei, G. - *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* - 1638

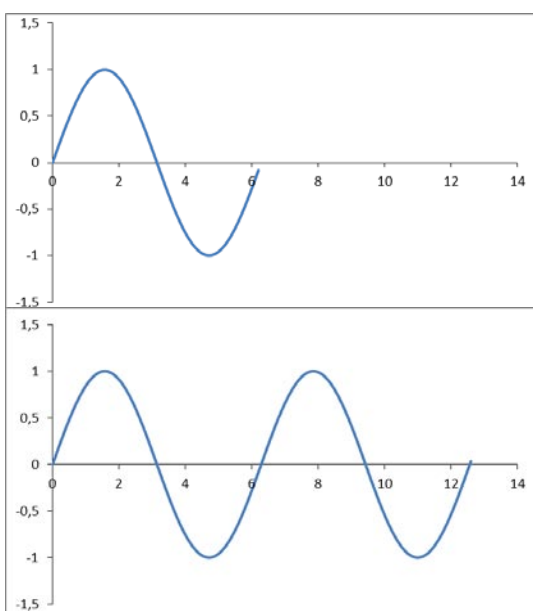
<sup>2</sup> Porphyrius in harm. Ptol. P. 213 ff. Wallis tratto da Heinze R. - *Xenokrates: Darstellung Der Lehre Und Sammlung Der Fragmente*. - pp. 162-163

dell'esperimento di Pitagora sui suoni. Il pensiero di Pitagora sul rapporto tra suoni e numeri è così descritto:

*“Riguardo a ciò anche Eraclide scrive queste cose nell’Introduzione musicale. Pitagora, così dice Senocrate, scopre anche gli intervalli nella musica che non hanno un’origine che prescinda dal numero. Infatti (un intervallo) è la combinazione di una certa quantità in rapporto ad un’altra: dunque indagava accadendo cosa si generano intervalli consonanti ma anche dissonanti e tutto ciò che è armonico e disarmonico. Ed essendo risalito all’origine del suono diceva che se qualcosa di armonioso può essere ascoltato grazie ad un’eguaglianza, è necessario che si generi qualche movimento. [...] Considerando (Pitagora) dunque che i sensi che si producono non sono costanti ma disordinati ed incapaci di comprendere ciò che è preciso, tentò con metodo sistematico di comprendere la composizione dei suoni. Infatti poiché di questi suoni alcuni sono disarmonici e altri armonici, e i primi infastidiscono la nostra percezione sensoriale o cambiano irregolarmente, proprio come i cattivi odori turbano l’odorato, le cose di genere sgradevole turbano la vista; così anche tutti i suoni aspri e quelli privi di gradevolezza infastidiscono l’udito. Armonici sono invece i suoni gradevoli e dolci. Si dimostra poi che ogni suono si muove secondo numero; ed è comune al suono il movimento secondo numero, ed è proprio del suono l’essere armonico e l’essere disarmonico. Dunque bisogna indagare che cosa aggiungendosi ai numeri, i suoni acquisiscono tale carattere. Poiché dunque nient’altro che la proporzione ha la stessa natura dei numeri: aggiungendosi questa proporzione al movimento dei suoni si genera suono armonico. E così si potrebbe dimostrare che a causa della proporzione accade ciò che si è detto.”*

I rapporti numerici semplici portarono all’individuazione di note e intervalli: ad esempio 2/1 per l’intervallo di ottava (es. do-do) perché fissando il punto medio della corda e facendola poi vibrare si ricava una nota di un’ottava superiore, 3/2 per l’accordo di quinta giusta (es. do-sol) e 4/3 per l’accordo di quarta giusta (es. do-fa). Da questi rapporti Pitagora e i pitagorici costruirono una scala musicale chiamata scala pitagorica con regole matematiche e non musicali. Pitagora studiò il suono emesso dalla corda; bisogna aspettare fino al XVII secolo per i primi studi sul fenomeno fisico della vibrazione dell’onda che produceva il suono. Si scoprì che la nota dipende dalla frequenza della vibrazione e che il rapporto tra le lunghezze delle corde è uguale al reciproco del rapporto tra le frequenze dei suoni emessi. La frequenza musicale fu misurata per la prima volta da Marin Mersenne, filosofo e matematico, nel 1648.

### 3. Le onde stazionarie



Per comprendere il fenomeno delle onde stazionarie abbiamo dovuto studiare i fenomeni oscillatori, in particolare quello delle onde. Un’onda meccanica è una qualunque perturbazione che si propaga in un mezzo materiale. Per il nostro esperimento abbiamo studiato quelle che si propagano in un mezzo lineare e omogeneo, come una corda: infatti un esempio di onda meccanica è la propagazione di un impulso in una corda ottenuto da una oscillazione prodotta da una sorgente posta ad un estremo della corda stessa. Se gli impulsi vengono prodotti con regolarità e continuità nel tempo si generano onde periodiche. Il periodo e la frequenza dell’onda coincidono con il periodo e la frequenza delle oscillazioni prodotte all’estremo della corda. Un caso particolare di onde periodiche sono le onde armoniche. In questo caso le onde che oscillano perpendicolarmente rispetto alla direzione di

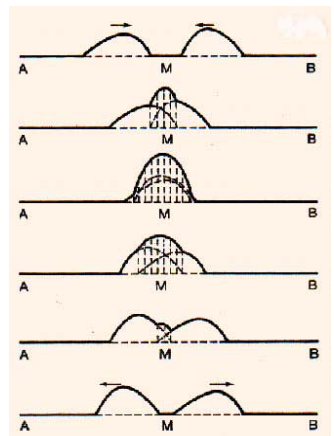
[Figura 1]

propagazione dell'onda e i cui punti si muovono di moto armonico, sono dette trasversali. Lo spostamento di un punto del mezzo investito dalla perturbazione rispetto alla sua posizione non perturbata viene chiamata elongazione. L'elongazione massima è detta ampiezza dell'onda. La perturbazione sollecitata dalla sorgente si propaga lungo la corda con una velocità chiamata velocità di propagazione, una grandezza costante. Per definire tale grandezza, prendiamo in considerazione il fronte d'onda che rappresenta il punto della corda più distante dalla sorgente che viene interessato dalla perturbazione. Durante un periodo di un'oscillazione il fronte d'onda avanza di una distanza pari ad una lunghezza d'onda che è definita come la minima distanza che separa due punti della corda con le stesse caratteristiche cinematiche, cioè due punti in fase tra loro.

Nella figura 1 viene rappresentato l'avanzamento del fronte d'onda di una corda dopo un periodo. Dalla definizione di lunghezza d'onda, si può dedurre la seguente relazione con il periodo dell'oscillazione (T) e la velocità di propagazione (v):  $\lambda = vT$  da cui esplicitando la velocità si ottiene  $v = \frac{\lambda}{T}$  o in funzione della frequenza  $v = \lambda f$ .

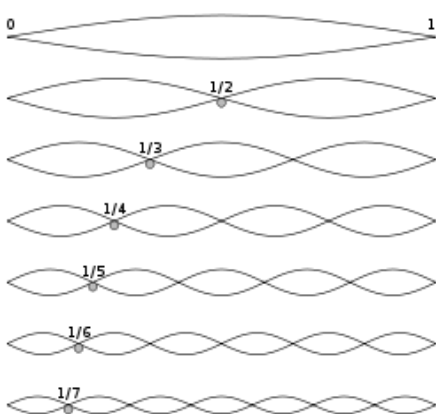
La velocità di propagazione in una corda dipende dalle sue caratteristiche fisiche, in particolare aumenta con la sua rigidità e diminuisce con l'aumentare della densità lineare: la rigidità della corda (tensione F) dipende dalla forza con cui questa viene tesa mentre la densità lineare è definita come il rapporto tra la massa della corda e la sua lunghezza ( $\mu = \frac{m}{l}$ ). La formula che lega la velocità di propagazione in una corda elastica a queste due grandezze è la seguente:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$



[Fig.2]

Per spiegare il fenomeno delle onde stazionarie è necessario parlare dell'interferenza: quando su una stessa corda vibrante si incontrano due perturbazioni ondose che si propagano l'una verso l'altra, queste si sovrappongono e poi continuano il loro percorso con la stessa configurazione iniziale. Questo comportamento, illustrato nella figura 2, può essere spiegato con il principio di sovrapposizione. Secondo tale principio i punti della corda, nella fase di sovrapposizione, assumono un'elongazione  $\vec{s}$ , data dalla somma vettoriale delle elongazioni delle singole onde. L'espressione vettoriale del principio di



[Fig.3]

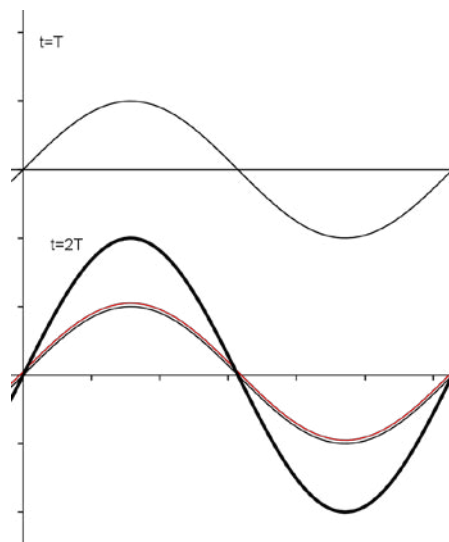
sovrapposizione è  $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$  dove  $\vec{s}_1$  indica l'elongazione dell'onda che si muove da un qualunque punto A verso un punto B e  $\vec{s}_2$  quella che si muove da B ad A.

Per il nostro esperimento, abbiamo fatto oscillare con frequenza regolare una corda elastica considerando due estremi fissi, uno dei quali era il generatore di oscillazioni di onde armoniche. Queste, giunte all'altra estremità, si riflettono e tornano indietro interferendo con le altre onde prodotte nel frattempo. Abbiamo rilevato che si genera un effetto disordinato quando le configurazioni sono variabili nel tempo con

irregolarità, mentre un effetto ordinato quando sono particolari e regolari. In queste ultime si possono individuare dei punti fissi e in quiete chiamati nodi mentre tutti gli altri, tra cui i punti di massima elongazione detti ventri, si spostano trasversalmente. Le onde che assumono queste caratteristiche sono chiamate onde stazionarie, come rappresentato nella figura 3. Per tali onde esiste un legame tra lunghezza d'onda e lunghezza della corda, data dalla seguente

relazione  $\lambda = \frac{2l}{n}$  dove n è il numero dei ventri. In figura 4 viene

descritto il significato di questa formula: il primo grafico rappresenta un'onda che si forma su una corda che ha lunghezza d'onda uguale alla lunghezza della corda dopo un tempo pari a un periodo T, mentre in quello successivo viene descritta la situazione al tempo 2T dove coesistono due onde, una prodotta dalla sorgente e l'altra riflessa (indicata in rosso), che evidentemente si sovrappongono per tutti i punti della corda dando origine ad un'interferenza costruttiva. L'effetto che noi osserviamo è dato dall'onda disegnata in grassetto. Per fare un esempio, l'onda prodotta dal pizzicamento di una corda di chitarra è stazionaria: infatti la corda ha come estremi fissi il ponte e il capotasto; pizzicandola si generano onde che si propagano verso i due estremi della corda a velocità costante; quindi si riflettono e si dirigono verso il capo opposto della corda così da creare riflessioni consecutive.



[Fig.4]

## 4. Apparato sperimentale e misurazioni

Per eseguire il nostro esperimento ci siamo dotati di due corde: la prima un cordino di nylon, senz'anima metallica, lunga 4 m e di massa 34,31 g, la seconda una corda da arrampicata lunga 20 m e di massa 1105 g. Questi dati sono stati ottenuti dopo diverse misurazioni con un metro da falegname di portata 2 m e sensibilità 1 mm per la lunghezza delle corde, per la massa con una bilancia di precisione con portata di 600 g e sensibilità di 1 cg per la misurazione del cordino mentre con una bilancia da cucina di portata 2200 g e sensibilità di 5 g per quella della corda da arrampicata.

Ci siamo serviti di due tipi di zavorra: un pesetto di massa 144,06 g per il cordino di nylon e due dischi da lancio di massa 1000,32 g per l'altra corda.

Successivamente abbiamo calcolato la densità lineare delle due corde ( $\mu = \frac{m}{l}$ ) e la forza di tensione (F) che corrisponde alla massa della zavorra (M) per l'accelerazione di gravità (g), escludendo la parte di corda che pende dallo schienale di una sedia di legno perché irrilevante rispetto alla tensione complessiva, così da

ipotizzare la velocità di propagazione di un'onda sulla corda con la formula  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ . Quindi abbiamo

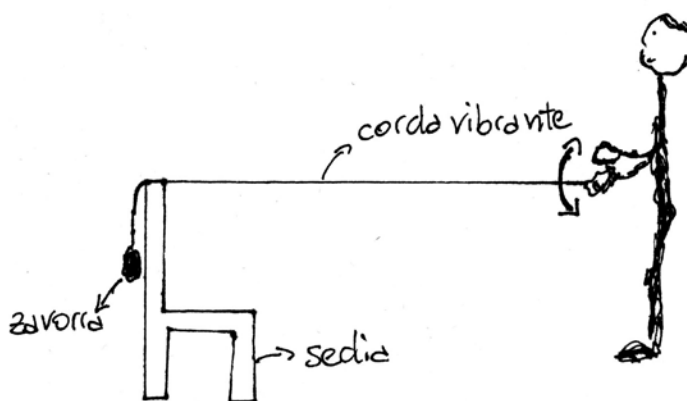
paragonato questo valore con la velocità vista come rapporto fra lunghezza d'onda e periodo  $v = \frac{\lambda}{T}$ .



Dati corda da arrampicata				
1	massa corda	$m$	$1'105 \pm 5$	g
2	lunghezza tot. corda	$L$	20,00	m
3	densità lineare	$\mu = m/L$	0,055	kg/m
4	massa zavorra	$M$	$1'000,3 \pm 0,1$	g
5	forza di tensione	$F = Mg$	9,81	N
6	vel. propagazione	$v = \sqrt{F/\mu}$	13,36	m/s
Dati cordino di nylon				
1	massa corda	$m$	$34,31 \pm 0,01$	g
2	lunghezza tot. corda	$l$	4'000,0	m
3	densità lineare	$\mu = m/L$	0,009	kg/m
4	massa zavorra	$M$	144,06	g
5	forza di tensione	$F = Mg$	1,412	N
6	vel. propagazione	$v = \sqrt{F/\mu}$	12,83	m/s

## 5. Esperimenti con la corda da arrampicata e con il cordino di nylon

Sullo schienale della sedia abbiamo appoggiato la corda, della quale un'estremità pendeva da una parte, mentre l'altra era tesa da uno di noi. All'estremità che pendeva dalla sedia abbiamo legato le rispettive zavorre. Nel caso della zavorra della corda d'arrampicata ci è stato utile riporla in un sacchetto di massa trascurabile e quindi anch'esso ininfluente sul valore della tensione. Uno di noi ha teso la corda da arrampicata ad una distanza pari a 5,11 m dallo schienale della sedia, facendola oscillare con una frequenza non troppo elevata. Dopo diversi tentativi, per ricavare delle buone misurazioni ci siamo resi conto che è importante non muovere la mano in tondo e cercare di compiere un movimento della mano non molto ampio (max 3 cm).



Ciò è risultato essere alquanto complesso perché la corda tende a produrre moti rotatori per la sua stessa struttura interna a spirale, cosa che fortunatamente non pregiudica l'esito dell'esperimento. Tuttavia la parte più complessa è stata cercare di mantenere inalterata la frequenza di oscillazione e la potenza dei colpi dati. In generale abbiamo notato che la corda viene perturbata in modo irregolare ma che variando opportunamente la frequenza di oscillazione della mano può anche assumere configurazioni ondose con uno, due, tre o quattro ventri.

Inoltre, visto che il nostro problema più importante è stato quello di coordinazione tra la persona che cronometrava 10 oscillazioni (usando un cronometro di sensibilità di decimo di secondo) e la persona che faceva oscillare la corda, abbiamo trovato un espediente molto utile: contare ad alta voce il numero delle oscillazioni così da riuscire a misurare più precisamente il tempo. Ma ci siamo accorti che questa attenzione non era sufficiente, così per contare le oscillazioni abbiamo trovato più comodo tenere il gomito adiacente al costato e con l'altra mano aiutarci a contarle, cioè contare l'oscillazione al tocco della mano oscillante con quella ferma sopra di essa. E' importante ricordare che un'oscillazione completa è composta da una discesa della mano oscillante e da una salita della stessa perché inizialmente è stato uno dei nostri errori!

Ecco i risultati ottenuti con la corda da arrampicata:

DATI RILEVATI CON LA CORDA DA ARRAMPICATA - tempo di 10 oscillazioni										
N° VENTRI	PROVA 1 (s)	PR. 2 (s)	PR. 3 (s)	PR. 4 (s)	PR. 5 (s)	PR. 6 (s)	PR. 7 (s)	PR. 8 (s)	PR. 9 (s)	PR. 10 (s)
2	3,6	3,9	3,8	4,0	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	3,4
3	2,7	2,5	2,4	2,6	2,6	2,2	2,1	2,4	2,4	2,6
4	1,7	1,7	1,9	1,8	1,8	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8

media	v. max	v. min	semid.
3,72	4	3,4	0,3
2,45	2,7	2,1	0,3
1,85	2	1,7	0,2

Per calcolare l'incertezza sui valori dei tempi delle 10 oscillazioni abbiamo usato la formula della

$$\text{semidispersione } \Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2}$$

Successivamente con i dati rilevati abbiamo calcolato la velocità di propagazione e l'abbiamo comparata con quella teorica. I risultati sono eccezionalmente simili tenendo conto del margine d'errore prodotto dalle misurazioni.

Dati calcolati riguardo alla c. da arramp.				
N° ventri	tm(s)*	T(s)*	λ(m)*	v(m/s)*
2	3,72±0,3	0,372±0,03	5,11	14±1
3	2,45±0,3	0,245±0,03	3,41	14±2
4	1,85±0,2	0,185±0,02	2,56	14±2

\* legenda

tm tempo medio di n°.10 oscillazioni

T periodo dell'oscillazione media (tm/10)

λ lunghezza d'onda ( $\lambda = \frac{2l}{n}$ )

v velocità di propagazione ( $v = \frac{\lambda}{T}$ )

Abbiamo ripetuto l'operazione anche con il cordino di nylon tendendolo ad una distanza pari a 3,40 m. Abbiamo riscontrato delle particolarità che secondo noi sono importanti: siamo riusciti a riprodurre solo onde con due e tre ventri, causa l'estrema difficoltà nel crearne una sola questo perché ha una rigidità diversa e densità lineare minore rispetto alla corda da arrampicata!

Riportiamo di seguito i dati ottenuti:

DATI RILEVATI CON IL CORDINO DI NYLON - tempo 10 oscillazioni										
N° VENTRI	PROVA 1 (s)	PR. 2 (s)	PR. 3 (s)	PR. 4 (s)	PR. 5 (s)	PR. 6 (s)	PR. 7 (s)	PR. 8 (s)	PR. 9 (s)	PR. 10 (s)
2	2,6	2,7	2,5	2,6	2,7	2,5	2,5	2,8	2,7	2,6
3	1,9	1,8	1,7	1,9	2,0	1,7	1,7	2,0	1,7	1,8

media	v. max	v. min	semid.
2,62	2,8	2,5	0,2
1,82	2	1,7	0,2

Dati calcolati				
N° ventri	tm(s)*	T(s)*	$\lambda(m)^*$	v(m/s)*
2	2,6±0,2	0,26±0,02	3,40	13±1
3	1,8±0,2	0,18±0,02	2,30	13±2

Si riferisca \* alla tabella precedente della corda da arrampicata

La velocità di propagazione misurata con questo metodo risulta leggermente maggiore di quella ipotizzata, forse a causa dell'elasticità del filo che non facilita il permanere delle condizioni di stazionarietà delle onde. Tuttavia, confrontando i risultati ottenuti dagli esperimenti e da quelli ipotizzati, abbiamo riscontrato che sono molto simili e precisi, tenendo conto del margine di errore. Già solo dopo questa prima fase dell'esperimento abbiamo in parte capito che le onde stazionarie si propagano secondo una specifica geometria composta da rapporti ben precisi.

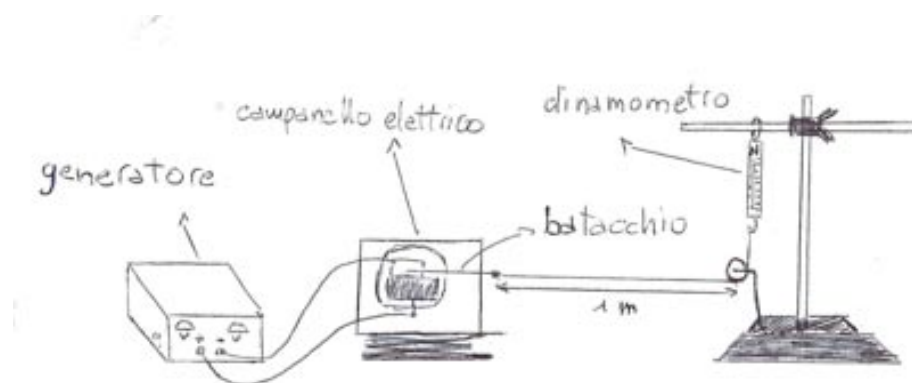
Seguono due tabelle che confrontano i valori della velocità ottenuti sperimentalmente riferiti ad entrambe le corde e ai due metodi: si può notare da queste che c'è una buona corrispondenza tra valori!

CORDA DA ARRAMPICATA	
risultati ottenuti (m/s)	risultato ipotizzato (m/s)
14±1	13,4
14±1	
14±1	

CORDINO DI NYLON	
risultati ottenuti (m/s)	risultato ipotizzato (m/s)
13±1	12,8
13±1	

## 6. Esperimento con il “campanello elettrico”

Oltre al precedente esperimento ne abbiamo elaborato un secondo per verificare la dipendenza tra tensione e velocità. Ci siamo serviti di un filo inestensibile e lo abbiamo fissato a due estremità fisse, ovvero un batacchio di un campanello elettrico da una parte e dall'altra a un dinamometro che abbiamo utilizzato per misurare la tensione del filo. Abbiamo fatto passare il filo, dalla parte legata al dinamometro, attraverso una carrucola, così da poter utilizzare il dinamometro in posizione verticale, in modo tale che la molla non fosse ostruita dall'attrito della camicia nel suo funzionamento, e allo stesso tempo abbiamo dovuto mantenere il filo in posizione orizzontale così che non ci fosse attrito, o almeno più di quello necessario, tra il filo e la carrucola. La distanza tra l'estremità legata al batacchio e l'estremità inferiore della carrucola, punto a partire dal quale il filo smette di muoversi liberamente, è di 1 m. In seguito abbiamo collegato il campanello elettrico attraverso un cavo ad un generatore a bassa tensione elettrica con un voltaggio tra i 0/10V, al variare del quale osservavamo una diversa ampiezza d'oscillazione dei punti della corda. La frequenza di oscillazione del batacchio corrisponde a quella della corrente di rete, ovvero 50Hz.



Nel misurare la tensione del filo abbiamo utilizzato due dinamometri, uno per le onde stazionarie a un ventre, un altro per quelle a due, tre e quattro ventri. Il primo aveva portata massima di 10N e sensibilità di 0,1N, il secondo aveva portata massima di 2N e sensibilità di 0,02N.

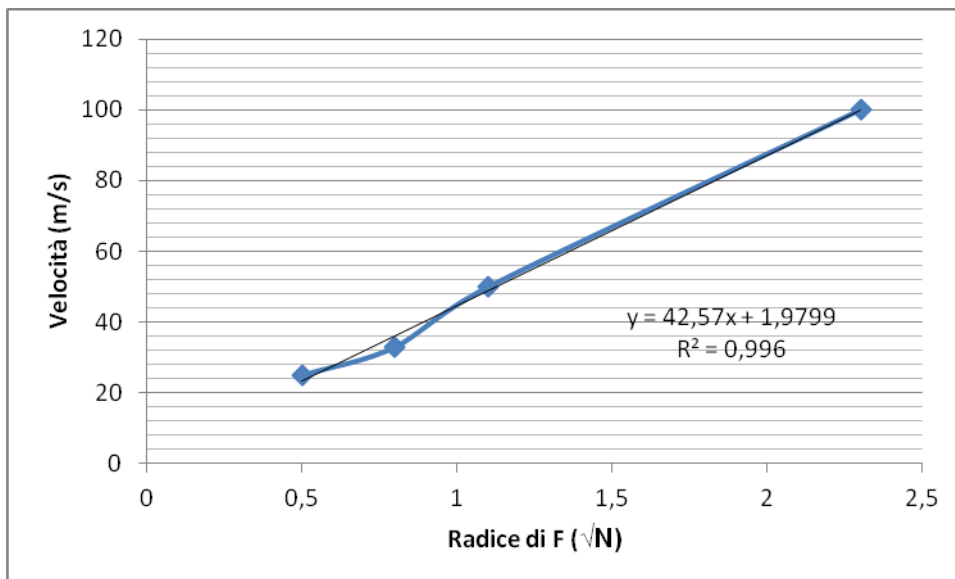
Dopo aver acceso il generatore e quindi attivato il batacchio, abbiamo osservato una confusione quasi totale nella corda, le onde non erano stabili. Variando la posizione del dinamometro e quindi la tensione della corda, siamo riusciti a produrre delle onde stazionarie a 3 ventri e solo dopo aver aumentato la tensione di molto abbiamo raggiunto delle onde stazionarie a 1 ventre. Abbiamo quindi verificato, almeno da un punto di vista qualitativo, che all'aumentare della tensione la velocità di propagazione aumenta, in quanto con una tensione minore siamo riusciti a produrre onde stazionarie a 3 ventri, mentre avendo successivamente aumentato la tensione e quindi la velocità di propagazione abbiamo raggiunto onde stazionarie ad 1 ventre solo.

Abbiamo quindi notato che le onde stazionarie si sviluppano non con un valore preciso di tensione del filo, ma in un range più o meno ampio a seconda del numero dei ventri, infatti variando di poco la tensione possiamo avere onde stazionarie “migliori”, cioè quelle con elongazione massima e costruttiva. Abbiamo inoltre osservato che aumentando il voltaggio si creavano onde con maggiore elongazione e stabilità, che ci permetteva quindi di misurare meglio la tensione della corda. Abbiamo misurato la tensione della corda in corrispondenza delle onde stazionarie a uno, due, tre e quattro ventri per 4 volte e calcolato il valor medio della tensione per ciascuna delle configurazioni come riportato in tabella.

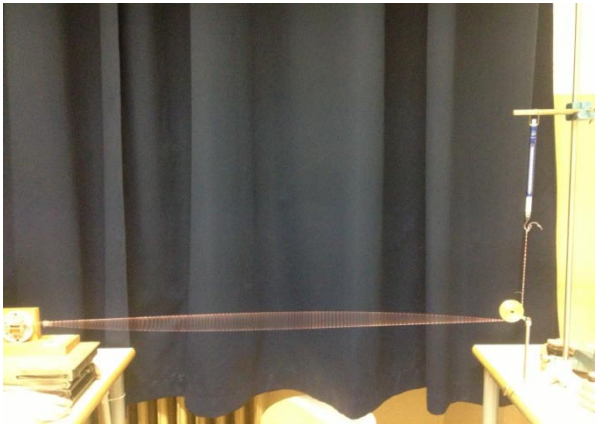
	Prova 1 F(N)	Prova 2 F(N)	Prova 3 F(N)	Prova 4 F(N)	Media F(N)
1 ventre	5,2	5,15	5,6	5,6	5,4±0,4
2 ventri	1,2	1,45	1,25	1,1	1,3±0,2
3 ventri	0,6	0,65	0,6	0,52	0,59±0,07
4 ventri	0,32	0,18	0,32	0,34	0,29±0,08

Poiché la relazione tra la velocità di propagazione dell' onda e la tensione del filo è:  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ , ci aspettavamo una proporzionalità diretta tra i valori della velocità e quelli della radice della tensione. Per verificare questo, abbiamo misurato la velocità di propagazione sapendo che questa è:  $v = \lambda f$ , dove  $f$  vale 50Hz, e  $\lambda$  è stata ricavata considerando i numeri dei ventri delle onde stazionarie con la relazione  $\lambda = \frac{2l}{n}$  dove  $l$  è la lunghezza della corda pari a 1m. Abbiamo costruito un grafico che mette in relazione queste due grandezze fisiche come segue:

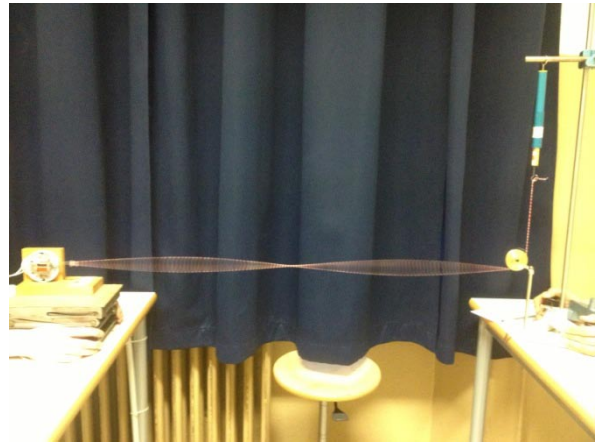
	Rad F(√N)	v(m/s)
1 ventre	2,3	100
2 ventri	1,1	50
3 ventri	0,8	33
4 ventri	0,5	25



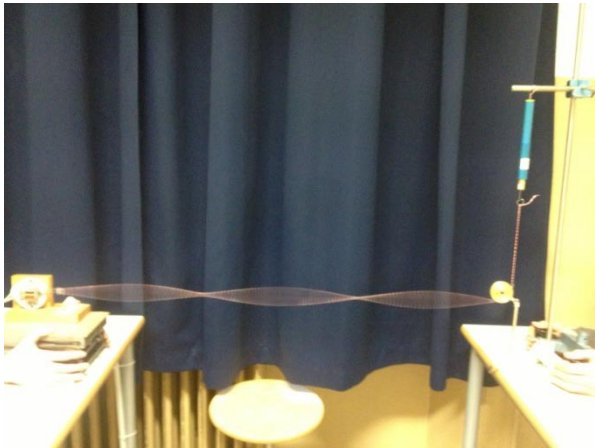
Come si nota dal grafico viene confermata la proporzionalità diretta tra le due grandezze; inoltre il coefficiente angolare di questa retta è riconducibile a  $\sqrt{\frac{1}{\mu}}$ . Sapendo che la lunghezza totale della corda è 1,35 m e che la sua massa è 0,93 g, per questo valore abbiamo ottenuto  $38\sqrt{\frac{m}{kg}}$ , che risulta dello stesso ordine di grandezza del coefficiente angolare della retta ottenuta che vale  $42\sqrt{\frac{m}{kg}}$ .



1 ventre (portata del dinamometro 10N)



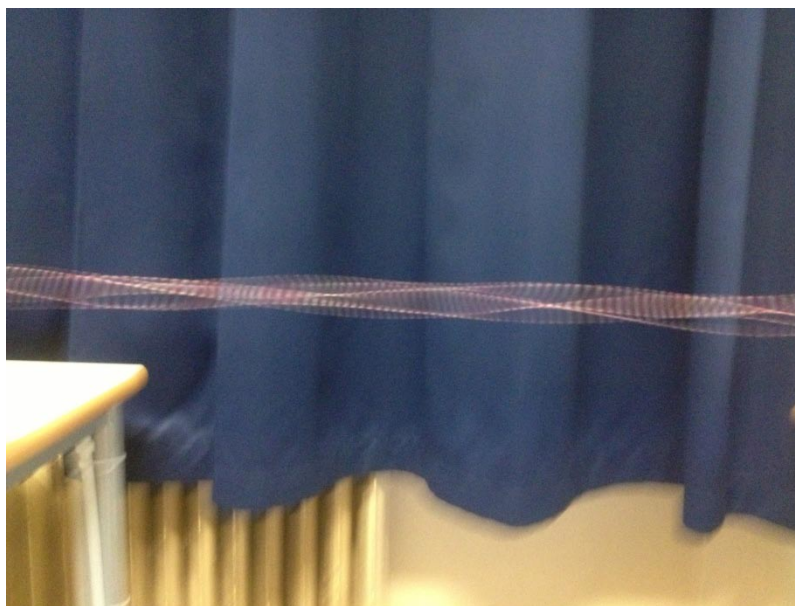
2 ventri (portata del dinamometro 2N)



3 ventri (portata del dinamometro 2N)



4 ventri (portata del dinamometro 2N)



Disordine

## 7. Conclusioni

Ci siamo avvicinati all'argomento delle onde stazionarie con la prospettiva di verificare alcune leggi che ne descrivono il fenomeno. Si tratta di leggi della fisica frutto della ricerca e della sete di conoscenza che non ha mai abbandonato l'uomo. Incuriositi dagli stessi fenomeni che hanno attirato l'attenzione di Pitagora, ci siamo accostati al fenomeno delle onde stazionarie fiduciosi dell'esistenza di un ordine che lo spiega e governa. Abbiamo riscontrato che quest'ordine esiste e che esso è carattere distintivo delle onde stazionarie. Questo grazie alle caratteristiche cinematiche con i loro valori costanti e particolari. Per generare onde stazionarie abbiamo dovuto porre in essere azioni e imbatterci in questioni già affrontate da filosofi, matematici e fisici come Mersenne e lo stesso Pitagora. Gli esperimenti da noi eseguiti hanno verificato le nostre ipotesi teoriche: se infatti avevamo ipotizzato una velocità di propagazione pari a  $12,8 \frac{m}{s}$  per il cordino di nylon e a  $13,5 \frac{m}{s}$  per la corda da arrampicata, i risultati medi ottenuti sperimentalmente sono rispettivamente di  $13 \pm 1 \frac{m}{s}$  e  $14 \pm 1 \frac{m}{s}$ , molto soddisfacenti se si considera il margine di errore. Per la buona riuscita del nostro lavoro sono stati fondamentali un buon approfondimento teorico, il rigore metodologico e la precisione nello svolgimento delle procedure, dalle più semplici (come misurare la lunghezza di una corda), alle più complesse (come generare onde stazionarie da una corda senza muovere troppo la mano). Nel corso dei nostri esperimenti abbiamo anche riscontrato l'esistenza del disordine: infatti se le onde stazionarie sono governate da un ordine, ciò non significa che lo siano tutti gli altri tipi di altre onde. Siamo riusciti a generare onde stazionarie solo passando prima da altri tipi di onde confuse e disordinate. Perciò per trovare l'esistenza di un ordine che governasse il fenomeno delle onde stazionarie è stato necessario conoscere e individuare anche l'esistenza di un disordine.

Grazie a questa esperienza abbiamo imparato a comprendere la coesistenza di valori di segno opposto in natura e a stupirci del loro meraviglioso interagire.

## 8. Bibliografia

- P. Marazzini, L. Mazzoni, M.E. Bergamaschini, *Fisica. Ipotesi teorie esperimenti*, Vol. 2, Minerva Scuola
- Ian Johnston, *Measured Tones. The interplay of physics and music*, second edition, IOP
- R. Heinze, *Xenokrates: Darstellung Der Lehre Und Sammlung Der Fragmente*. Ulan Press