



Igino Ferrari

Liceo Scientifico
"A. Messedaglia",
Verona

Un metodo per misurare la velocità del suono

(Pervenuto il 24.7.2013, approvato il 14.2.2014)

ABSTRACT

A simple experiment for measuring the velocity of sound in air using two hollow metal cylinders, a microphone and a digital oscilloscope is described. Knowing the distance between microphone and cylinders the velocity of sound is easily computed by measuring the time interval between banging them together and the microphone's reception of the sound. In the best of cases the relative error can be about 1%, allowing to explore how the velocity of sound depends on the temperature of the air.

Introduzione

La misura della velocità del suono costituisce un interessante esperimento per la didattica perché coinvolge diversi argomenti che vengono trattati nei corsi di fisica delle scuole medie superiori. La termodinamica viene coinvolta perché la velocità del suono in un gas [3] è dipendente dalla densità, dalla temperatura e dalla pressione del gas stesso. Inoltre è interessata l'elettronica perché l'apparato sperimentale è costituito da un semplice circuito che, al contatto tra due tubi metallici, genera un impulso che si usa come *trigger* per un oscilloscopio digitale che registra la d.d.p. in uscita dalla capsula microfonica che riceve il suono.

Il metodo per la misura della velocità del suono che presentiamo in questo lavoro ci è sembrato particolarmente semplice ed intuitivo al punto da poter essere presentato in qualunque anno di corso della scuola secondaria di secondo grado. Naturalmente nel primo biennio e nella classe terza ci si limiterà ad una semplice descrizione dell'apparato sperimentale e alle misure di lunghezze e di tempi per poi ricavarne, dal rapporto, la velocità del suono.

Nella classe quarta si potranno approfondire anche gli aspetti termodinamici [1] con la relazione (1) che dà la velocità del suono nell'aria, in condizioni prossime a quelle standard, in funzione della temperatura "t" in °C dell'aria stessa:

$$V_{\text{suono}} \approx 331.45 + 0.62 t \text{ [m/s].} \quad (1)$$

Nella classe quinta potrà essere spiegato nei dettagli anche il circuito di trigger schematizzato nella figura 1 ed il funzionamento della capsula microfonica a condensatore con il relativo circuito di alimentazione (figura 2).

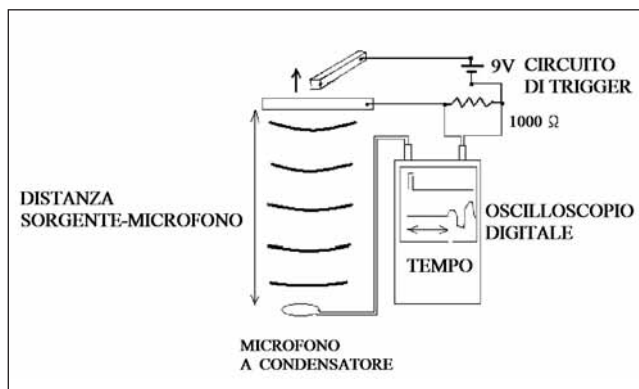


Figura 1. Schema dell'apparato sperimentale per la misura della velocità del suono.

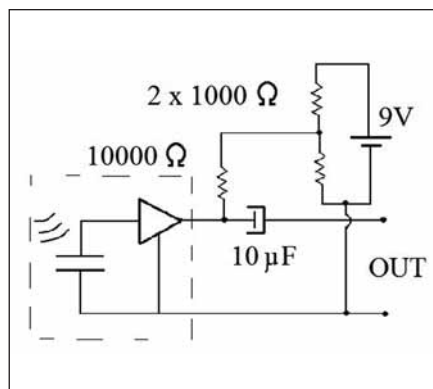


Figura 2. La capsula microfonica preamplificata con il circuito di alimentazione ed il filtro passa alto.

Descrizione dell'apparato sperimentale



Figura 3. Foto dell'apparato sperimentale con, in basso, il microfono, il circuito di trigger, l'oscilloscopio e i tubi.

Due tubi metallici, afferrati con le mani meglio se ricoperte da guanti, vengono fatti battere "con forza" uno contro l'altro. Al contatto i tubi chiudono il circuito di trigger che fa partire la registrazione, da parte di un oscilloscopio digitale programmato come "single", delle tensioni generate da una capsula microfonica.

Nella nostra realizzazione i due tubi (figura 3) sono in ferro, a sezione quadrata con il lato esterno avente una lunghezza di 35(1) mm, sono lunghi 368(1) mm e lo spessore del metallo che forma il tubo è di 2.0(1) mm. Nessuna di queste caratteristiche è critica però, in una eventuale realizzazione, non ci si deve allontanare troppo se si vuole avere un contatto elettrico sicuro fra i tubi, una distanza dalla capsula microfonica determinabile entro lo 0.5 % e l'emissione di un suono sufficientemente intenso. Deve essere posta attenzione anche al collegamento dei fili in rame che collegano i tubi con il resto del circuito di trigger. Noi abbiamo fissato i fili in rame ai tubi per mezzo di viti passanti attraverso un foro praticato in prossimità di una estremità di ciascun tubo e fissate con dado e rondella. I fili usati hanno area della superficie della sezione di 2.5 mm². Il filo così grosso non è necessario per le correnti che deve trasportare, che hanno intensità di circa 10 mA, ma è necessario per resistere agli scossoni che subisce mentre si batte un tubo contro l'altro.

Uno dei modi, per ottenere misure sufficientemente precise di spazi e tempi, consiste nel tenere un tubo fermo con una mano e nello spingere con l'altra

mano l'altro tubo verso l'alto fino a colpire il tubo fermo (figura 3).

Nella ricerca del miglior assetto sperimentale si è provato ad allineare il microfono con il tubo fermo e a battere il secondo tubo contro questo tubo tenuto fermo. Con un tale assetto si ha un errore inferiore, rispetto all'assetto precedente, nella misura della distanza sorgente-microfono. Infatti il primo fronte d'onda che arriva al microfono parte dal bordo inferiore del tubo fermo diretto verso il microfono e quindi la distanza sorgente-microfono è determinabile con la precisione di circa ± 1 mm contro un errore di circa ± 5 mm con i tubi disposti come in figura 1.

Però, con questo assetto ovvero con il tubo diretto verso il microfono, si nota nella forma d'onda registrata dall'oscilloscopio che il primo segnale elettrico proveniente dal microfono ha un picco positivo diverse volte più piccolo che non con i tubi disposti come in figura 1. Questo rende più difficile identificare l'istante in cui il primo fronte d'onda arriva al microfono e quindi aumenta l'imprecisione nella misura del tempo.

Si è provato anche a sostituire il tubo che viene spinto verso l'altro tubo con un martelletto metallico in modo da localizzare con maggior precisione la sorgente sonora. Anche in questo caso si è notata nella immagine registrata dall'oscilloscopio una diminuzione, rispetto all'assetto con i tubi disposti come in figura 1, dell'ampiezza della prima oscillazione proveniente dal microfono con conseguente maggiore difficoltà nell'individuare l'istante in cui è arrivato al microfono il primo fronte dell'onda sonora. Con i due assetti sperimentali appena

descritti le oscillazioni registrate all'oscilloscopio aumentano in ampiezza con il passare del tempo, variando da un massimo positivo della prima oscillazione di circa 25 mV ad un massimo positivo di circa 150 mV in 5 oscillazioni. Con i tubi disposti come in figura 1 si hanno i massimi positivi delle prime oscillazioni dell'ordine di 150 mV e poi l'ampiezza decresce con le oscillazioni successive.

Complessivamente, tenendo conto dei pregi e dei difetti, si può dire che questi tre assetti sperimentali si equivalgono e, in effetti, sono state eseguite misure con ognuno di essi.

Vediamo ora alcune considerazioni per localizzare con maggior precisione possibile la sorgente del primo fronte d'onda che raggiunge la capsula microfonica.

Al contatto i due tubi subiscono una deformazione che, in prima approssimazione, possiamo ritenere elastica (ovvero i tubi dopo l'urto ritornano, con oscillazioni smorzate, nello stato iniziale). La momentanea deformazione del ferro dei tubi causa delle variazioni della pressione dell'aria posta a contatto e nelle vicinanze del ferro. Queste variazioni di pressione si propagano nell'aria, per mezzo degli urti fra molecole, in tutte le direzioni e quindi anche verso la capsula microfonica.

La deformazione momentanea del bordo del ferro si propaga, per mezzo degli urti tra gli atomi di ferro, anche all'interno del ferro stesso con una velocità di circa 5130 m/s e quindi circa 15 volte maggiore di quella del suono nell'aria. Questo particolare ci dice che per una corretta valutazione della distanza fra la sorgente del primo fronte d'onda che arriva alla capsula microfonica e la capsula microfonica stessa bisogna prendere in considerazione la parte di tubo battuto più vicina alla capsula microfonica e non, ad esempio, la parte dei tubi che è venuta a contatto. In altre parole il suono ha viaggiato così rapidamente all'interno del tubo di ferro dal punto di percussione alla parte del tubo verso la capsula microfonica che si può trascurare il tempo (circa $0.035/5130 \approx 6.8 \mu\text{s}$) impiegato per compiere questo tragitto all'interno del ferro. Trascurando il tempo suddetto si può ritenere che il primo fronte d'onda che raggiunge la capsula microfonica sia partito, all'istante del contatto fra i tubi, dalla parte di tubo battuto posta verso la capsula microfonica, ovvero dalla parte più bassa del tubo se la capsula microfonica è posta, come in figura 3, più in basso dei tubi. Viceversa il ritenere che il punto di partenza del primo fronte dell'onda sonora che raggiunge la capsula microfonica sia il punto di contatto fra i tubi porterebbe ad un errore sistematico nella misura dei tempi di circa $0.035/340 \approx 103 \mu\text{s}$ che non è trascurabile tenendo conto che la sensibilità della misura dei tempi, come vedremo, è di $40 \mu\text{s}$.

È da osservare che la sorgente delle onde sonore costituita dai due tubi che entrano in vibrazione quando collidono uno contro l'altro è molto estesa nello spazio e quindi ci sono onde che percorrono distanze diverse prima di arrivare alla capsula microfonica. Ma, se ci si limita a considerare il primo fronte d'onda che arriva alla capsula microfonica, allora non conta che dopo questo primo fronte d'onda ne arrivino degli altri. Quello che interessa, ai fini della misura della velocità del suono, è localizzare la parte della sorgente dell'onda sonora più vicina alla capsula microfonica ed il tempo impiegato da questo primo fronte d'onda per raggiungere la capsula microfonica. In altre parole non viene eseguita nessuna misura sul periodo o sulla forma dell'onda: viene misurato all'oscilloscopio solo il tempo intercorrente da quando i tubi entrano in contatto a quando la prima perturbazione dell'aria arriva alla capsula microfonica.

È interessante osservare anche che il tenere in mano i tubi ne smorza le vibrazioni ma, poiché siamo interessati solo all'inizio della prima vibrazione, lo smorzamento delle vibrazioni non influisce sulla misura del tempo impiegato dal primo fronte d'onda per andare dalla sorgente del suono alla capsula microfonica.

Il circuito di trigger

I tubi metallici, battendo uno contro l'altro, oltre che emettere un suono chiudono un circuito, che chiamiamo di trigger perché aziona il trigger dell'oscilloscopio (figura 1). Il circuito di trigger è formato, oltre che dai tubi, da una pila da 9V e da una resistenza da 1000 Ω collegati in serie. Quando i tubi, posti a contatto, chiudono il circuito di trigger inizia a passare in esso una corrente elettrica. Per effetto di questa corrente ai capi della resistenza da 1000 Ω si instaura una d.d.p. che, essendo trascurabili rispetto ai 1000 Ω sia la resistenza interna della pila sia la resistenza dei tubi e dei fili di collegamento, è di circa 9V. Un canale dell'oscilloscopio, A nel nostro caso, (in genere gli oscilloscopi digitali hanno due canali denominati A e B) è collegato agli estremi della resistenza da 1000 Ω e quindi viene visualizzata con la traccia A la differenza di potenziale in funzione del tempo presente agli estremi della resistenza da 1000 Ω (figura 4).

Nell'oscilloscopio c'è la possibilità di usare la tensione applicata ad un canale, il canale A nel nostro caso, come trigger per entrambi i canali. Quando la tensione visualizzata nel canale A supera un certo valore predeterminato, 1V nel nostro caso, inizia la registrazione delle forme d'onda su entrambi i canali.

La misura delle distanze

Le distanze sono state misurate con un'asta graduata lunga 2 m in legno che si può facilmente auto costruire. Come si vede nella figura 3, che riporta una foto dell'intero apparato sperimentale, l'asta è fissata al tavolo, sul quale è posto l'oscilloscopio ed il circuito di trigger. La base dell'asta poggia sul pavimento dove è posta la bassetta su cui si trova la capsula microfonica con la sua alimentazione ed il condensatore che la collega all'oscilloscopio. Bisogna avere l'avvertenza che lo zero dell'asta sia posto proprio in corrispondenza della parte alta della capsula microfonica perché è lì dove è posto il condensatore che rivela le onde sonore [2]. Se si vuole che la distanza percorsa dall'onda sonora sia, ad esempio, di due metri si deve tenere con una mano un tubo orizzontale all'altezza, rispetto alla capsula microfonica, di 2.035 m in modo che la parte bassa del secondo tubo, spinto contro il primo dal basso verso l'alto, venga a trovarsi al momento dell'urto ad una distanza di 2.000 m dalla capsula microfonica (ricordiamo che il tubo ha una sezione quadrata avente il lato esterno di 35(1) mm).

Per ridurre gli errori relativi sia sulle distanze che sui tempi conviene che la distanza percorsa dal suono sia di almeno un metro, questo sempre compatibilmente con il fatto che la capsula microfonica non deve essere troppo lontana dalla sorgente del suono perché deve essere in grado di rivelare l'arrivo dell'onda sonora su di essa.

La capsula microfonica a condensatore

Come si vede dalla figura 2 la capsula microfonica è del tipo a condensatore e contiene un preamplificatore. La nostra capsula microfonica è siglata XL-R, è cilindrica con diametro uguale a 10 mm e altezza uguale a 7 mm e ha due fili in uscita: uno rosso che va collegato al polo positivo del condensatore elettrolitico e alla resistenza da 10000 Ω e uno nero che va collegato al polo negativo della pila. Il costo di questa capsula microfonica è di circa 3€. Altre informazioni sulle capsule microfoniche si possono reperire in [2].

Il circuito di rivelazione del suono è quindi costituito dalla capsula microfonica, dall'alimentazione della capsula microfonica, dalla resistenza da 10000 Ω e dal condensatore da 10 μF . Il condensatore, con il resto del circuito in cui è inserito, costituisce un filtro "passa alto" indispensabile per fermare la tensione continua che alimenta per mezzo dello stesso filo la capsula microfonica ed in-

viare all'oscilloscopio solo la tensione alternata. L'alimentatore della capsula microfonica può essere costruito con una pila da 9 V e un partitore di tensione o direttamente con una pila da 4.5 V. Noi abbiamo preferito la soluzione "pila da 9 V e partitore" per poter selezionare la tensione di alimentazione ideale per il microfono, che è risultata intorno ai 4.5V, semplicemente cambiando, sulla basetta forata dove sono inserite, le resistenze del partitore di tensione. La resistenza da 10000 Ω , il cui valore e la posizione nel circuito è data dalla casa costruttrice della capsula microfonica, è richiesta dal fatto che la capsula microfonica è del tipo a due fili. Questi due fili svolgono ben tre compiti: portare una d.d.p. sulle armature del condensatore, alimentare il preamplificatore interno alla casula microfonica e portare fuori il segnale elettrico dipendente dall'onda sonora che ha interessato il microfono.

L'oscilloscopio digitale

L'oscilloscopio digitale, come già detto, deve essere settato su "single" ovvero all'arrivo dell'impulso di trigger inizia la registrazione di entrambi i canali e la prosegue per 20 divisioni dell'asse dei tempi. Se si è programmato un tempo di 1 ms per ogni divisione, la memorizzazione delle forme d'onda dei due canali proseguirà quindi per 20 millisecondi. Sullo schermo sono visualizzate le forme d'onda per un tempo di solo 10 ms alla volta, per visualizzare le forme d'onda corrispondenti agli altri 10 ms si può far scorrere l'immagine orizzontalmente.

L'oscilloscopio digitale permette la memorizzazione di 10 di queste registrazioni, la loro visualizzazione e la loro stampa. Nella figura 4 è riportata una di queste stampe.

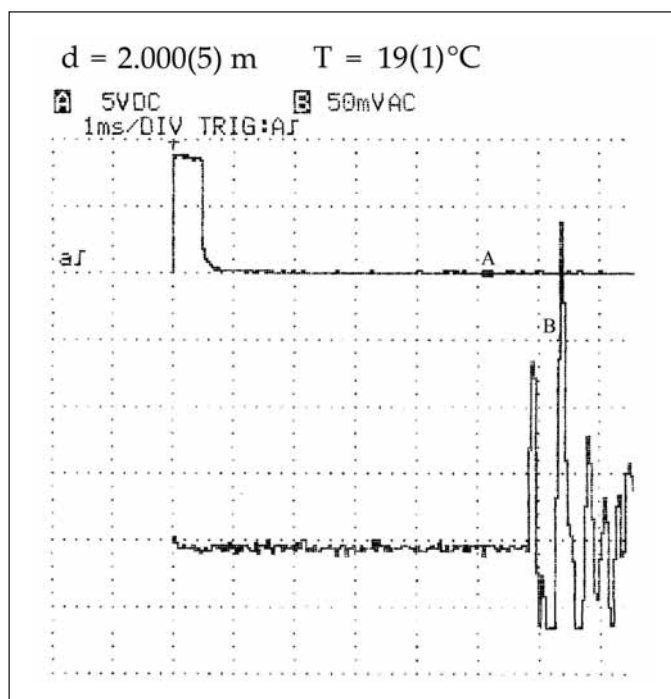


Figura 4. Stampa dell'oscilloscopio dell'impulso di trigger (traccia A) e della tensione generata dal microfono (traccia B).

Il canale A, che visualizza l'impulso di trigger, è programmato per avere 5V DC per divisione verticale, mentre il canale B, che visualizza la d.d.p. alternata all'uscita del circuito che rivela il suono, è programmato per avere 50 mV AC per divisione verticale.

Nella figura 4 è possibile vedere nella traccia A l'impulso di trigger della durata di circa 0.5 ms, questa durata non interessa ai fini della misura della velocità del suono ed è determinata dalle modalità dell'urto fra i due tubi di ferro (per la precisione quello che si vede è solo il primo rimbalzo di una serie di rimbalzi che hanno sempre luogo quando si chiude un circuito elettrico con un interruttore meccanico).

In corrispondenza del fronte di salita dell'impulso di trigger si vede, sul canale B, l'inizio della registrazione del segnale di uscita dal circuito che rivela il suono. Questo segnale è costituito, inizialmente, dal "rumore elettrico", con qualche millivolt di ampiezza picco-picco, emesso dalla capsula microfonica anche in assenza di suono ricevuto. Mentre il suono viaggia dalla sorgente alla capsula microfonica, sul canale B, è visualizzato solo questo rumore elettrico. Quando il fronte dell'onda sonora emessa dai tubi battuti uno contro l'altro arriva alla capsula microfonica, si ha che la d.d.p. sul canale B, senza apprezzabile ritardo, aumenta bruscamente da qualche millivolt a circa 150 millivolt. Si è scelta una capsula microfonica a condensatore proprio per avere i ritardi elettronici trascurabili [2] rispetto ai 40 μ s di sensibilità nella misura dei tempi, altre capsule microfoniche sarebbero state meno pronte ai transienti prodotti dalle onde sonore.

Abbiamo voluto verificare l'entità di questi ritardi elettronici facendo misure a distanze diverse variabili da 0.1 m a 2 m. Con queste misure si ottiene che il ritardo introdotto dall'elettronica è dell'ordine di 20 μ s e quindi minore della sensibilità che si ha nella misura dei tempi. Questo piccolo valore ci ha indotti, per semplificare l'elaborazione dei dati, a compiere misure della velocità del suono su distanze intorno ai due metri in modo che i tempi da misurare siano di circa 5 ms e sia così trascurabile questo ritardo introdotto dall'elettronica nella misura dei tempi. Naturalmente per misure della velocità del suono su distanze intorno, ad esempio, a 0.2 m in cui i tempi da misurare sono intorno a 0.5 ms non si può trascurare questo ritardo che darebbe luogo ad un errore sistematico nella misura dei tempi inaccettabile se si vogliono misure con un errore relativo simile a quello ottenibile su distanze più grandi.

Il tempo impiegato dall'onda sonora per andare dalla sorgente alla capsula microfonica è quindi quello fra il fronte di salita dell'impulso di trigger sul canale A e l'inizio delle ampie oscillazioni sul canale B. Questo tempo è determinabile sullo schermo dell'oscilloscopio con un errore tipico di ± 0.04 ms se si è programmato l'oscilloscopio per avere l'asse dei tempi di 1 ms/div. Misurando sullo schermo dell'oscilloscopio il tempo t di viaggio dell'onda sonora e conoscendo la distanza d fra la parte bassa (quella verso la capsula microfonica) del tubo battuto e la capsula microfonica si può calcolare la velocità del suono $v = d/t$.

Poiché la velocità del suono nell'aria varia al variare della temperatura, come predice la formula (1), bisogna annotare anche la temperatura dell'aria nella stanza durante la misura.

Dati ottenuti

La figura 4 riporta la stampa di una tipica registrazione eseguita dall'oscilloscopio digitale che, nel nostro caso, è un *Fluke* PM 97.

Alle misure di distanza è stato attribuito un errore assoluto di ± 5 mm, alle misure di tempo è stato attribuito un errore assoluto di ± 0.040 ms che corrisponde a ± 1 pixel nello schermo dell'oscilloscopio regolato a 1 ms/div.

La distanza sorgente-microfono per questa misura di cui è riportata la registrazione era di 2.000(5) m ed il tempo impiegato dal suono per andare dalla sorgente alla capsula microfonica, come si ricava dalla stampa dello schermo dell'oscilloscopio (figura 4), è stato di 5.84(4) ms, quindi la velocità del suono è risultata essere $v = 2.000(5)/0.00584(4) = 342(3)$ m/s. La temperatura dell'aria nel laboratorio era di 19(1)°C.

Qui di seguito riportiamo altre misure che sono state eseguite a varie distanze fra la sorgente sonora e la capsula microfonica e a varie temperature dell'aria nel laboratorio.

Distanza: 2.000(5) m, tempo: 5.76(4) ms, quindi velocità del suono = 347(3) m/s, la temperatura dell'aria del laboratorio era di 26(1) °C.

Distanza: 2.000(5) m, tempo: 5.78(4) ms, quindi velocità del suono = 346(3) m/s, la temperatura dell'aria del laboratorio era di 26(1) °C.

Distanza: 2.000(5) m, tempo: 5.72(4) ms, quindi velocità del suono = 350(3) m/s, la temperatura dell'aria del laboratorio era di 26(1) °C.

Distanza: 1.000(5) m, tempo: 2.88(4) ms, quindi velocità del suono = 347(7) m/s, la temperatura dell'aria del laboratorio era di 22(1) °C.

Distanza: 1.500(5) m, tempo: 4.36(4) ms, quindi velocità del suono = 344(4) m/s, la temperatura dell'aria del laboratorio era di 19(1) °C.

Le misure sono state ripetute numerose volte, anche da altri insegnanti e dagli studenti di varie classi, a distanze variabili tra 1 m e 2 m e a diverse temperature: quelle che il "clima" della stanza offriva di volta in volta.

Nella figura 5 c'è un grafico in cui si riportano le misure della velocità del suono che abbiamo svolto a varie temperature e, per confronto, i valori ottenuti con la formula (1).

È da osservare che la retta teorica è intersecata dalle barre d'errore delle misure ottenute, questo ci conforta riguardo alle valutazioni che abbiamo fatto degli errori da cui sono affette sia le misure di velocità che di temperatura.

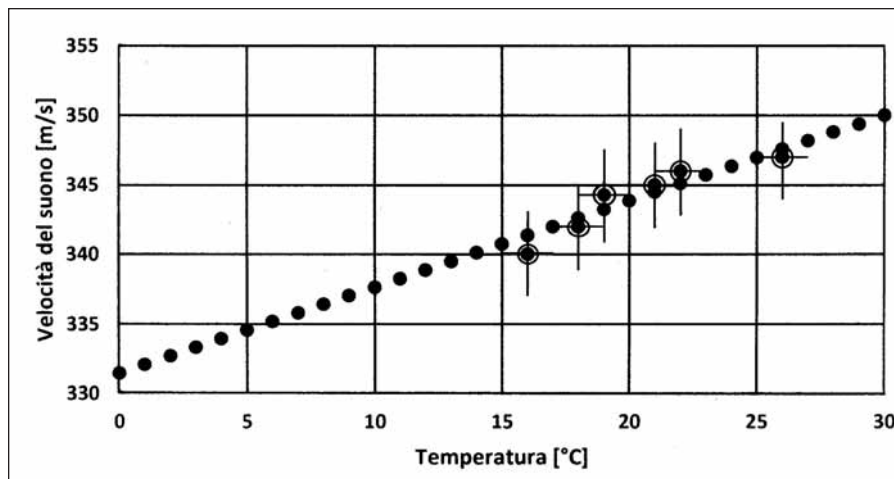


Figura 5. Misure della velocità del suono con le barre di errore e valori teorici ottenuti con la (1).

Inoltre l'andamento teorico previsto dalla formula (1) è seguito abbastanza bene dai dati sperimentali, almeno nel ristretto intervallo di temperature in cui abbiamo eseguito le misure. Questo ci dice che l'apparato sperimentale descritto è effettivamente in grado di evidenziare, naturalmente con le imprecisioni che derivano dalla sua semplicità, le variazioni della velocità del suono al variare della temperatura dell'aria in cui il suono stesso si propaga.

- Bibliografia**
- [1] MARAZZINI, P., BERGAMINI, M.E., MAZZONI, L. *Fenomeni e Fisica* Vol. II, Minerva Scuola, Milano, 2008.
 - [2] <http://www.cedelettronica.com>.
 - [3] ALONSO, M., FINN, E.J. *Elementi di Fisica per l'Università* Vol. II, Addison-Wesley, Amsterdam, 1974.

LA COPERTINA

Buon compleanno Galileo!

In occasione del 450esimo compleanno di Galileo, per lo scorso 15 febbraio, Poste Italiane aveva programmato l'emissione di un francobollo raffigurante una statua del Nostro scolpita (1835-1871) da Aristodemo Costoli ed attualmente esposta nel Piazzale degli Uffizi a Firenze.

Galileo vi è rappresentato mentre regge in una mano il cannocchiale, in posa ispirata e impaludamento accademico.

Tuttavia, proprio alla vigilia delle celebrazioni, ecco l'Azienda postale sfoderare l'*Opzione SorpRende*: emissione annullata, causa sopravvenuti problemi tecnici.

Il Comune di Pisa, l'Università e la Scuola Normale si trovano costrette a revocare le numerose iniziative predisposte per l'occasione; annullato pure l'annullo filatelico speciale presso l'Ufficio Postale di Pisa Centro e la Scuola Normale Superiore.

L'emissione del francobollo di Galileo è rinviata a "data da definirsi".

Il festeggiato probabilmente ci sarebbe rimasto male, più o meno come appare qui a fianco, nell'immagine di un suo busto, opera dello scultore Antonio Novelli, degli anni 1640-1660, che si trova nella villa Galletti presso Firenze (fotografia Brogi tratta da *L'ILLUSTRAZIONE ITALIANA*, per il Terzo Centenario di Galileo, 7 dicembre 1892, pag. 404).

Quest'opera con "imbronciamento" a noi pare, per vari motivi, più adatta a "festeggiare" la mancata ricorrenza; anche il mezzobusto è più consono al temperamento di Galileo che, com'è noto, mal sopportava la "toga gravità" (leggasi il celebre poemetto *Contro il portar la toga*).

Caro Galileo, non te la prendere!

Quindi ci uniamo agli auguri: "Buon compleanno Galileo!" ... che è anche il titolo di una serie di interessanti iniziative curate dal Museo Galileo, nuova denominazione assunta nel 2010 dall'*Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze* (<http://www.museogalileo.it/>).

Ultimo aggiornamento: finalmente l'emissione del francobollo è avvenuta lo scorso mese di aprile, ai primi ... però non esattamente al 1°.

