

Come si misura la velocità della luce?

Sezione biennio

La scelta dell'argomento da trattare in occasione della XIX edizione di *ScienzaFirenze* è nata da una domanda di uno studente di seconda liceo nel corso della trattazione della cinematica, durante la descrizione di metodi pratici per la misura della velocità dei corpi: "come si misura la velocità della luce visto che a differenza dei normali oggetti è molto più alta"?

Ho colto l'occasione proponendo allo studente di partecipare a *ScienzaFirenze* insieme ad altri tre studenti tutti frequentanti il secondo anno del liceo scientifico OSA.

Il nostro lavoro, quindi, ha avuto come obiettivo quello di rispondere alla suddetta domanda ed in particolare di capire come l'uomo sia arrivato a stabilire il valore preciso della velocità della luce. Oltre ad una breve ricerca storica ho proposto tre metodi, adatti a studenti del biennio, di cui uno originale che prevede l'utilizzo del telemetro. Gli altri due esperimenti, diffusi in rete, prevedono uno l'utilizzo del forno a microonde ed un altro l'utilizzo di Arduino.

Per il lavoro con Arduino, visto che nel nostro istituto è presente l'indirizzo di elettronica, ho fatto fare il lavoro ad un ragazzo di quinta ITI che ha introdotto, attraverso una serie di esperimenti preliminari, l'utilizzo della piattaforma hardware e successivamente è stato realizzato l'apparato che ci ha permesso di determinare la velocità della luce in aria. Questo lavoro ha richiesto complessivamente poco più di dieci ore che sono state riconosciute, allo studente di quinta, come attività PCTO.

L'attività è iniziata a fine ottobre ed ha richiesto qualche ora di lezione teorica per introdurre alcune caratteristiche delle onde ed in particolare delle onde stazionarie e per descrivere, sempre dal punto di vista teorico, l'esperimento con il telemetro. La trattazione delle onde stazionarie si è resa utile in quanto, come detto, una delle misure prevede l'uso del forno a microonde. Dopo abbiamo realizzato gli esperimenti con il microonde e con il telemetro, successivamente è stato svolto il "corso" di Arduino. Infine, tra fine gennaio e fine febbraio abbiamo scritto la relazione.

In totale i ragazzi hanno lavorato complessivamente per circa 30 ore quasi totalmente in presenza.

Il referente del progetto

Come si misura la velocità della luce?

“Un esperimento è una domanda che la scienza pone alla natura, ed una misurazione è la registrazione della risposta della Natura” - Max Planck

Abstract

In this work, three results are considered which results in taking the speed of light in a simple way. In particular, using a microwave oven, a rangefinder and a more sophisticated system with the use of Arduino.

Introduzione

Molto spesso gli scienziati quando cercano di capire un nuovo fenomeno si trovano di fronte a domande del tipo: Come si può misurare questa grandezza?

Questo fatto è ricorrente e gli scienziati per risolvere questo tipo di problema spesso devono auto-costruirsi degli apparati di misura. Un esempio emblematico può essere l'acceleratore di particelle di Ginevra, opera mastodontica che permette di scoprire come è fatta la materia dal punto di vista microscopico.

Sicuramente una delle domande più interessanti che gli scienziati si sono posti nel passato è quale fosse la velocità della luce e come questa grandezza si potesse misurare.

Per misurare la velocità di un corpo generalmente si determina il tempo che il corpo impiega a percorrere una distanza nota e poi facendo il rapporto tra spazio percorso e tempo impiegato si ottiene la velocità. Anche per la velocità della luce si può utilizzare questo metodo, ma vi è un problema, la velocità della luce è molto alta e quindi determinare i tempi su distanze ordinarie è molto difficile. Questo fatto, in passato, ha creato non pochi problemi, infatti, l'uomo ha fatto diversi tentativi prima di arrivare a misurare con una certa precisione la velocità della luce.

In questo lavoro, dopo un breve percorso storico, faremo vedere tre semplici metodi che permettono di determinare la velocità della luce. In particolare, il primo metodo prevede l'utilizzo di un forno a microonde, il secondo sfrutta una anomalia del telemetro e il terzo prevede l'utilizzo di Arduino.

Breve storia della misura della velocità della luce [1]

Nell'antichità si riteneva che la velocità della luce fosse infinita, anche se in questo senso si trovano notizie contrastanti. Sicuramente ad insinuare il dubbio che la velocità della luce fosse finita fu Galileo. Infatti, a proposito del ritardo con cui si sente lo sparo di un cannone rispetto al lampo dell'esplosione scrive:

"...da codesta notissima esperienza non si raccoglie altro se non che il suono si conduce al nostro udito in tempo men breve di quello che si conduce il lume; ma non mi assicura se la venuta del lume sia per ciò istantanea ...".

Galileo tentò di misurare questo tempo, facendosi aiutare da un assistente e utilizzando due lanterne e un orologio per la misurazione degli intervalli di tempo. L'idea di Galileo fu quella di porre una lanterna su una collina nei dintorni di Firenze e l'altra lanterna su un'altra collina distante circa 1600 m dalla prima. Le lanterne dovevano essere inizialmente coperte da un panno. Galileo scoprì la sua lanterna e iniziò a misurare lo scorrere del tempo. Quando lo sperimentatore sull'altra collina vedeva arrivare la luce dall'altra lanterna scopriva anche la seconda lanterna. Il primo sperimentatore, che era Galileo stesso, doveva fermare il tempo quando vedeva la luce di ritorno dalla seconda lanterna. La misura non riuscì in quanto Galileo non poté misurare il tempo, perché appena toglieva il panno dalla sua lanterna vedeva l'assistente fare altrettanto.

La prima tecnica di misura che ha portato a risultati soddisfacenti fu proposta da Rømer nel 1676. Osservando il moto di Io, una delle lune di Giove, calcolò la velocità della luce.

Io compie un'orbita completa intorno a Giove in 1,76 giorni. Rømer, però, si accorse che in certi periodi dell'anno, quando la Terra era più lontana

da Giove, ci metteva più tempo; al contrario, quando Terra e Giove erano più vicini, la luna lo sembrava anticipare la sua rivoluzione.

Rømer, effettuando numerose misure, arrivò alla conclusione che la luce impiega 22 min per percorrere una distanza pari al diametro di rivoluzione terrestre e da questo dato dedusse che la velocità della luce fosse pari a 220000 km/s.

Nel 1849 Fizeau riesce a misurare la velocità della luce usando un apparato sperimentale come quello rappresentato in figura 1.

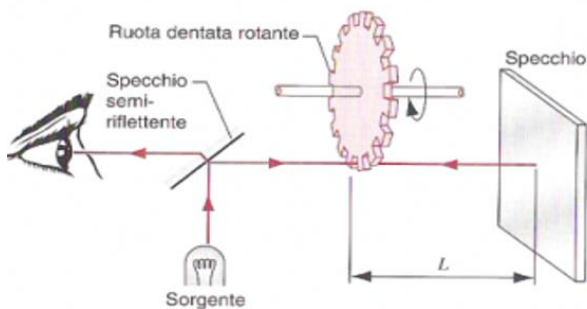


Figura 1 Schema dell'apparato usato da Fizeau

In poche parole, grazie alla presenza di una ruota dentata messa in rotazione, Fizeau riuscì a misurare il tempo che la luce impiegava a percorrere una distanza nota conoscendo la velocità di rotazione della ruota. Fizeau ottenne un valore pari a 314000 km/s.

Altri esperimenti degni di nota furono quello di Foucault (1875), Michelson (1878) e Michelson e Morley (1887).

Con questi esperimenti si ottennero dei valori sempre più vicini a quello che attualmente è associato alla velocità della luce nel vuoto ossia:

$$c = 299792458 \text{ m/s.}$$

Misura con il microonde [2]

Un metodo semplice e rapido per misurare la velocità della luce si basa sul fenomeno delle onde stazionarie e prevede l'uso di un forno a microonde.

La luce è un'onda elettromagnetica con caratteristiche (frequenza) tale per cui è visibile dai nostri occhi. Tutte le onde elettromagnetiche viaggiano alla stessa velocità, appunto la velocità della luce. In questo primo esperimento

effettivamente stimeremo la velocità delle microonde stazionarie del forno a microonde.

Le onde stazionarie hanno la caratteristica di non propagarsi ma rimangono sempre nella stessa regione di spazio. In ciascun punto dello spazio investito da un'onda di questo tipo il campo elettromagnetico oscilla sempre nello stesso modo. In particolare, esistono dei punti in cui l'oscillazione è nulla detti nodi e dei punti in cui l'oscillazione è massima detti ventri o creste. Nella foto di figura 2 è riportato un forno a microonde con la rappresentazione di un'onda stazionaria all'interno. Infatti, all'interno di questi forni si hanno delle onde stazionarie con frequenza tipica delle microonde corrispondente ad una lunghezza d'onda di qualche centimetro.

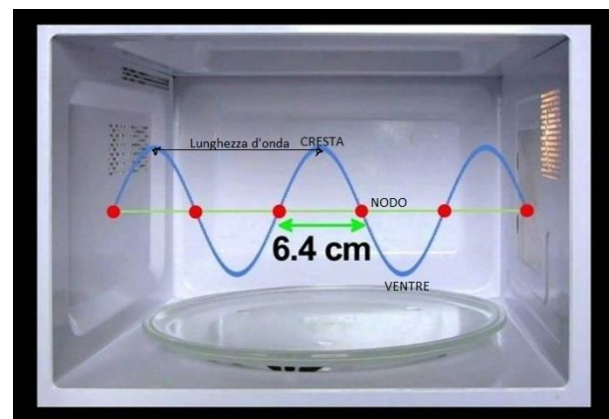


Figura 2 Forno a microonde

Le microonde del forno riscaldano soprattutto in corrispondenza delle creste e dei ventri, per questo motivo questi forni hanno un piatto rotante che permette al cibo di cambiare continuamente posizione rispetto alle onde stazionarie. In questo modo i cibi si riscaldano più o meno uniformemente.

L'idea di base di questo primo esperimento è quella di mettere una fetta di pane in un forno a microonde per un breve periodo di tempo. Prima però si toglie il piatto rotante in modo che la fetta rimanga ferma in una ben determinata posizione. In tal caso, semplificando il fenomeno, la fetta di pane viene investita da un'onda stazionaria che la riscalderà in corrispondenza dei ventri e delle creste. Se si lascia la fetta abbastanza a lungo, qualche minuto, inizia a bruciarsi in corrispondenza di questi punti come si può vedere nelle foto di figura 3 e 4.



Figura 3



Figura 4

Determinando la distanza tra i centri delle bruciature si risale alla lunghezza d'onda delle microonde del nostro forno. Sapendo poi quanto vale la frequenza del forno, nel nostro caso 2450 MHz, è possibile determinare la velocità dell'onda utilizzando la seguente formula:

$$v = \lambda \cdot f$$

dove λ è la lunghezza d'onda ed f è la frequenza dell'onda.

Tutte le prove da noi effettuate, anche con l'utilizzo di una tavoletta di cioccolata, hanno dato valori della semi-lunghezza d'onda compresi tra 5 e 7 cm. Questo vuol dire che la lunghezza d'onda da noi misurata corrisponde a

$$\lambda = (12 \pm 2) \cdot 10^{-2} m$$

Con questa lunghezza d'onda e con la frequenza sopra riportata si ottiene il seguente valore di velocità:

$$v = (2,94 \pm 0,49) \cdot 10^8 m/s$$

Come si vede, anche se il metodo è piuttosto "grossolano", il valore ottenuto è in accordo con il valore della velocità della luce misurata con metodi più accurati.

Misura con il telemetro

Il telemetro è ormai uno strumento di uso comune in particolare tra gli artigiani e permette di misurare le distanze con una precisione al millimetro. Il funzionamento si basa sull'emissione di un raggio laser che colpendo una superficie viene riflesso; un circuito elettronico determina il tempo intercorso tra l'emissione del raggio emesso e la rilevazione del raggio riflesso e conoscendo la velocità della luce in aria determina la distanza rilevata.

Ma cosa succede se il fascio laser attraversa un materiale trasparente diverso dall'aria? In tal caso il telemetro rileva una distanza tra due punti diversa da quella reale. E la misura risulterà tanto maggiore quanto maggiore è lo spessore del mezzo trasparente posto tra i punti.

Il nostro prof di fisica ha pensato di utilizzare questo "difetto" per determinare la velocità della luce in un mezzo trasparente diverso dall'aria, dando per buono il valore di $2,998 \cdot 10^8 m/s$ della velocità della luce in aria.

Per comprendere come sia possibile utilizzare questa anomalia bisogna fare alcune considerazioni teoriche.

Supponiamo che il raggio di un telemetro percorra una distanza d , di cui d_0 (con $d_0 < d$) in acqua come illustrato in figura 5.

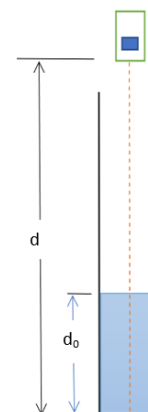


Figura 5

Se v è la velocità della luce in acqua e se indichiamo con V la velocità in aria, il tempo d'andata e ritorno è

$$t = 2 \cdot \frac{d-d_0}{V} + 2 \cdot \frac{d_0}{v} \quad (1)$$

Il telemetro non tiene conto della presenza dell'acqua e legge una distanza scorretta d' che possiamo determinare con la seguente formula:

$$d' = \frac{v \cdot t}{2}$$

Sostituendo in quest'ultima espressione la (1) si ottiene:

$$d' = d - d_0 + \frac{v}{v} \cdot d_0 = d + d_0 \cdot \left(\frac{v}{v} - 1\right)$$

Siccome $\frac{v}{v} > 1$, allora $d' > d$, ossia la distanza rilevata d' in presenza di acqua lungo il percorso della luce risulta maggiore di quella misurata quando la luce incontra solo aria.

A questo punto è possibile determinare il ritardo che la luce accumula ad attraversare l'intero percorso, a causa della presenza dell'acqua, tramite la seguente formula:

$$\Delta t = 2 \frac{d' - d}{v}$$

Sommando Δt al tempo che impiegherebbe la luce a percorrere il tratto d_0 in assenza di acqua si ottiene

$$t_{mezzo} = \Delta t + t_{ARIA} = 2 \frac{d' - d}{v} + 2 \frac{d_0}{v} \quad (2)$$

Quest'ultima espressione permette di calcolare il tempo impiegato dalla luce ad attraversare la colonna di acqua (andata e ritorno) o, più in generale, del mezzo trasparente che incontra.

L'esperimento consiste nel misurare le tre distanze d' , d e d_0 in modo da determinare t_{mezzo} e, successivamente, metterlo in relazione con il doppio dell'altezza della colonna d'acqua $2d_0$.

Il materiale occorrente per effettuare l'esperimento è di facile reperibilità, oltre al metro-laser, basta un sostegno ed un contenitore per il liquido trasparente. Noi abbiamo effettuato misure non solo con acqua ma anche con altri mezzi trasparenti.

L'apparato sperimentale utilizzato per effettuare le misure riportate di seguito consiste in un cilindro in vetro da laboratorio (diametro circa 8 cm ed altezza circa 40 cm), un telemetro, un metro, morsetti e sostegni da laboratorio. Si assembla l'apparato sperimentale come in figura 6. Cilindro e telemetro devono essere ben fissati e

non devono minimamente essere spostati durante le misure. In particolare, il telemetro deve essere posto sopra il cilindro e puntato in modo che il raggio laser colpisca la zona centrale del fondo dove è posta una piccola piastra di alluminio che serve per riflettere la luce emessa dal metro laser. Quest'ultima scelta viene fatta per evitare che la luce attraversi anche il fondo in vetro del cilindro. Assemblato l'apparato sperimentale, innanzitutto, si misura la distanza d tra il telemetro e il fondo del cilindro quando non è presente liquido nel contenitore. Successivamente, si versa una certa quantità di liquido nel contenitore in modo da raggiungere un'altezza di circa 4-5 cm.



Figura 6 Apparato sperimentale

L'altezza d_0 della colonna di liquido può essere misurata con un metro a nastro. Fatto questo si misura ancora la distanza tra telemetro e fondo del tubo ottenendo d' . Si ripete questa misura con colonne di liquido sempre più alte per almeno 4-5 valori di d_0 .

In tabella I sono riportati i valori di t_{mezzo} , calcolati con la (2), al variare dell'altezza della colonna d'acqua e nel grafico (figura 7) questo tempo viene messo in relazione con il doppio dell'altezza della colonna [3].

d (m)	d' (m)	2d ₀ (m)	t _{mezzo} (s)
0,931 ± 0,001	0,931±0,001	0	0
	0,953±0,001	0,130±0,002	(0,580±0,020)·10 ⁻⁹
	0,977±0,001	0,260±0,002	(1,174±0,020)·10 ⁻⁹
	0,996±0,001	0,396±0,002	(1,755±0,020)·10 ⁻⁹
	1,019±0,001	0,532±0,002	(2,362±0,020)·10 ⁻⁹
	1,045±0,001	0,664±0,002	(2,975±0,020)·10 ⁻⁹
	1,059±0,001	0,736±0,002	(3,309±0,020)·10 ⁻⁹

Tabella I

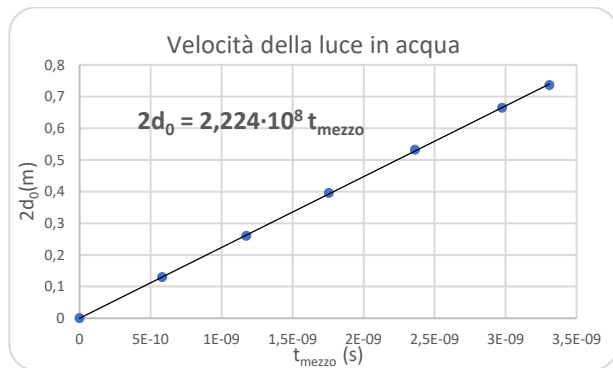


Figura 7 Relazione tra distanza percorsa in acqua dalla luce e tempo di percorrenza.

Come si evince dal grafico all'aumentare dell'altezza della colonna d'acqua aumenta proporzionalmente il tempo t_{mezzo} . La pendenza del grafico, in questo caso pari a $2,224 \cdot 10^8$ m/s, rappresenta la velocità della luce in acqua ottenuta sperimentalmente. Questo valore è in buon accordo con il valore teorico della velocità della luce in acqua, infatti in letteratura si trova $2,254 \cdot 10^8$ m/s.

Come detto abbiamo ripetuto l'esperimento utilizzando diversi liquidi. In particolare, abbiamo provato innanzitutto con liquidi a "basso costo": soluzioni di acqua e sale e acqua e zucchero. Ma in questo caso il comportamento è risultato equivalente a quello dell'acqua. Successivamente abbiamo utilizzato glicerina e poi olio di girasole che ha un comportamento equivalente a quello della glicerina, ma ha costi decisamente più bassi.

In figura 8 e 9 sono riportati rispettivamente i grafici ottenuti con olio di girasole e glicerina.

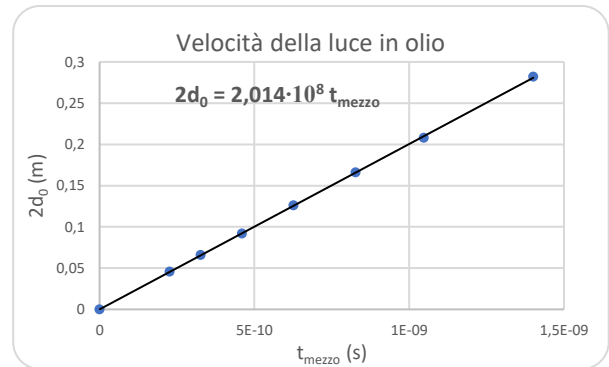


Figura 8 Relazione tra distanza percorsa in olio dalla luce e tempo di percorrenza

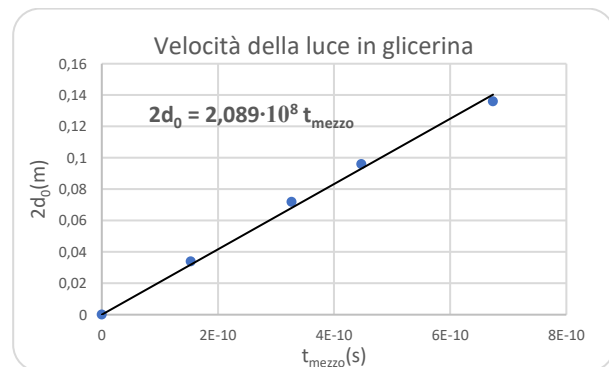


Figura 9 Relazione tra distanza percorsa in glicerina dalla luce e tempo di percorrenza

Anche in questo caso le velocità ottenute sono simili ai valori trovati in letteratura (entrambe hanno velocità pari a circa $2,035 \cdot 10^8$ m/s).

Abbiamo provato questo metodo anche con materiali solidi trasparenti tipo plexiglass ottenendo dei buoni risultati. Ovviamente, l'utilizzo dei liquidi ha una maggiore comodità in quanto si possono variare le altezze a piacere, mentre avere vari pezzi di materiale solido trasparente di diverso spessore è più difficile.

In ogni caso, riportiamo di seguito una foto dell'apparato (figura 10) e il grafico relativo alla misura effettuata con diversi pezzi di plexiglass (figura 11). Per le misure abbiamo usato diversi blocchi di plexiglass presenti nel nostro laboratorio in un kit di ottica.

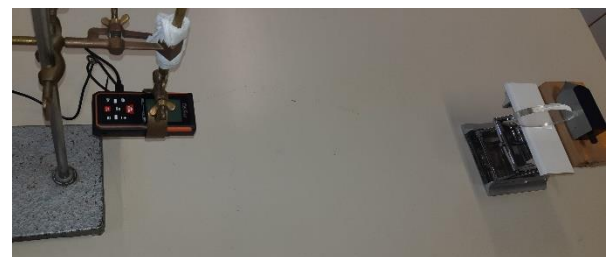


Figura 10 Apparato sperimentale per la misura della velocità della luce attraverso il plexiglass

Nell'esecuzione della misura bisogna fare attenzione a puntare correttamente il fascio di luce del metro laser in modo che attraversi tutto il blocco di plexiglass e oltre il pezzo trasparente bisogna mettere un ostacolo, nel nostro caso un blocco di metallo, che rifletta la luce.

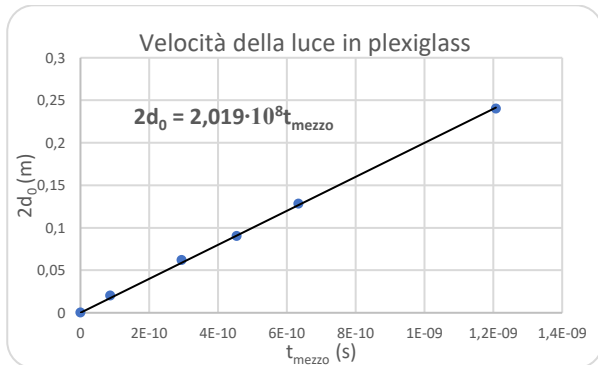


Figura 11 Relazione tra distanza percorsa attraverso il plexiglass dalla luce e tempo di percorrenza

Anche in questo caso si ottiene un valore della velocità in buon accordo con il valore teorico che è pari a circa $2,026 \cdot 10^8$ m/s.

Questo metodo originale di determinare la velocità della luce in diversi mezzi trasparenti ha un limite legato alla "penetrabilità" del fascio laser all'interno del mezzo. Durante l'esecuzione degli esperimenti abbiamo notato che dopo una certa altezza della colonna di liquido le misure iniziavano a non essere costanti a parità di altezza della colonna. È come se il fascio venisse riflesso lungo il tratto di liquido e non sul fondo del recipiente. In effetti, questo effetto ci ha costretti ad usare altezze diverse per i diversi mezzi. Questo fatto si evince anche dalle ordinate dei grafici sopra riportati.

Misura con Arduino [4] [5]

Come detto il telemetro misura il tempo che la luce impiega a percorrere una certa distanza, ma restituisce il valore di una distanza. Questo tempo è detto tempo di volo ed è indicato con TOF, dall'inglese Time Of Flight.

Esiste un dispositivo a basso costo, il sensore VL53L0X, che permette di misurare il TOF. Questo sensore incorpora un emettitore, costituito da un laser VCSEL che emette impulsi a 940 nm, ed un ricevitore, un diodo SPAD ultraveloce sensibile al singolo fotone e adeguatamente schermato in

modo da ricevere soltanto la lunghezza d'onda a 940 nm del laser VCSEL.

Questo sensore viene utilizzato per misurare distanze fino a due metri, ma, come vedremo, è possibile utilizzarlo per misurare il tempo di volo di impulsi luminosi in modo da effettuare delle misure della velocità della luce in diverse situazioni.

In questo esperimento mostreremo come è possibile misurare la velocità della luce in aria utilizzando Arduino con il sensore sopra descritto. Lo schema di montaggio è molto semplice ed è riportato in figura 12.

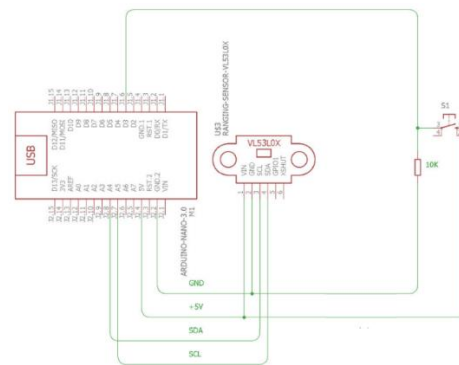


Figura 12 Schema elettrico del collegamento del sensore VL53L0X ad ARDUINO

Il codice di programmazione utilizzato è riportato nella nota [6]. Al suo interno sono presenti alcuni calcoli matematici che ci sono serviti per ottenere i differenti valori del TOF in picosecondi. Durante il corso dello svolgimento del progetto, abbiamo prestabilito che i valori misurati venissero letti su un monitor seriale, e non su un display come nel progetto di riferimento [5], proprio per questo all'interno del codice sono state richiamate le funzioni:

`Serial.begin(9600)` → per richiamare il monitor seriale e la sua velocità di comunicazione;
`Serial.println(duration)` → necessaria per scrivere i valori sullo schermo del pc e quindi sul monitor seriale.

In figura 13 è riportata una foto dell'apparato sperimentale. Su un piano in legno è stato fissato, con del nastro adesivo, un foglio A3 di carta millimetrata. Ad una estremità del piano è stato posizionato il sensore, fissandolo con del nastro adesivo in modo che non si spostasse durante le misure. Di fronte al sensore abbiamo posto un

blocchetto di legno che funge da barriera per la luce emessa dal sensore. Il blocchetto può essere spostato in modo da avere diverse distanze dal sensore e quest'ultime si determinano facilmente grazie alla presenza della carta millimetrata. L'esperimento è consistito nel rilevare i tempi che la luce impiega ad andare dal sensore fino al blocchetto e ritorno.

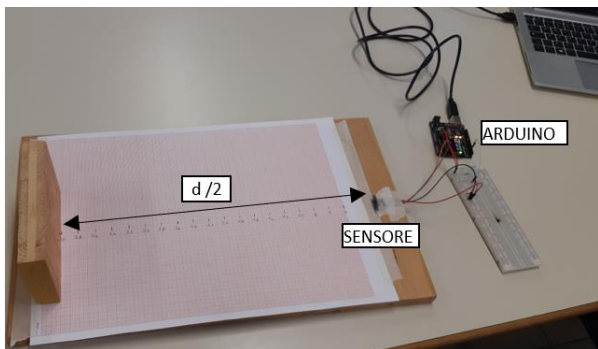


Figura 13 Foto dell'apparato sperimentale che prevede l'utilizzo di ARDUINO

Le misure effettuate sono riportate in tabella II e il grafico ottenuto in figura 14.

t (s)	d (m)
0	0
$(0,300 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,080 \pm 0,004$
$(0,401 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,120 \pm 0,004$
$(0,555 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,160 \pm 0,004$
$(0,706 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,200 \pm 0,004$
$(0,848 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,240 \pm 0,004$
$(0,980 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,280 \pm 0,004$
$(1,109 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,320 \pm 0,004$
$(1,241 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,360 \pm 0,004$
$(1,386 \pm 0,001) \cdot 10^{-12}$	$0,400 \pm 0,004$

Tabella II

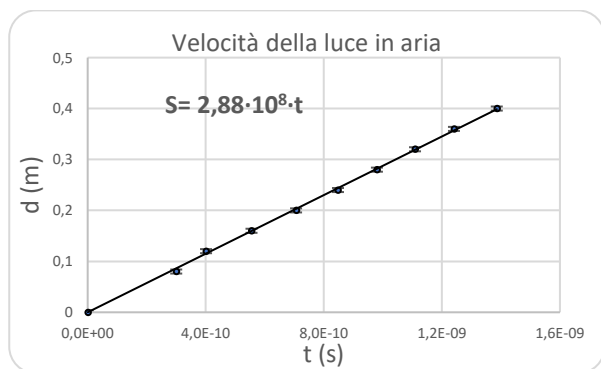


Figura 14 Misura della velocità della luce in aria

La pendenza del grafico rappresenta la velocità della luce in aria. Come si può notare il valore

ottenuto $2,88 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ è in buon accordo con quello di riferimento $2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Nel lavoro [4] sono riportate delle misure anche attraverso mezzi trasparenti diversi dall'aria. Noi abbiamo provato ad effettuare tali misure, ma non abbiamo ottenuto i valori corrispondenti a quelli teorici. Una possibile spiegazione di questo risultato potrebbe essere la seguente: la luce emessa dal sensore non è sufficientemente "energetica" per attraversare mezzi trasparenti diversi dall'aria. Questa ipotesi è suffragata da un altro fatto capitatoci durante gli esperimenti. Mentre effettuavamo le misure con il telemetro ad un certo punto non si riusciva più a replicare misure già effettuate. Dopo diversi tentativi ed ipotesi abbiamo notato che le batterie dello strumento erano scariche. Lo strumento effettuava correttamente le misure in aria, ma non riusciva ad effettuare le misure quando era presente un mezzo trasparente diverso dall'aria. Ricaricate le batterie il problema non si è più presentato.

Conclusioni

Attraverso questo lavoro abbiamo capito quanto sia importante, di fronte ad un fenomeno fisico, porsi le giuste domande per avere le risposte desiderate e quanto sia stata importante la curiosità dell'uomo per conoscere il comportamento della natura. In particolare, l'ambito scelto da noi ci ha permesso di comprendere le difficoltà che gli scienziati hanno incontrato per arrivare ad una risposta definitiva. Ma la caparbità dell'uomo ha permesso di raggiungere dei risultati, in ogni ambito, per cui dei semplici studenti di liceo come noi hanno potuto effettuare, con mezzi modici, la misura di una grandezza che per dei grandi scienziati del passato, come Galileo Galilei, risultava praticamente impossibile.

Sitografia e note

[1] http://www.ud.inf.n.it/URDF/laurea/DocuSefmi2014/Materiale%20Utilizzato/Laboratorio/Dispense/___SN_FMI%20%20Misura%20della%20velocit%C3%A0%20de lla%20luce.pdf

[2] <https://www.esperimentanda.com/come-misurare-la-velocita-della-luce-con-microonde-e-cioccolata-o-raggio-laser-modulato/>

[3] Per il calcolo dell'errore sul tempo t_{mezzo} abbiamo usato la seguente formula:

$$\Delta t_{mezzo} = 2 \frac{\Delta(d' - d)}{V} + 2 \frac{\Delta d_0}{V}$$

[4] <https://physicsopenlab.org/2018/09/21/misura-della-velocita-della-luce-con-un-sensore-time-of-flight/>

[5] <http://jabolatorium.com/Projects/Lightspeed/lightspeed.html>

[6]

```
#include <Wire.h>
#include <VL53L0X.h>

VL53L0X sensor;           //VL53L0X as sensor

double duration;         //variable duration to keep time in

void setup()
{
  pinMode(3, INPUT);     //pin 3 for switch as input
  Wire.begin();          //initialize wire.h library
  sensor.init();         //initialize sensor (VL53L0X)
  sensor.setTimeout(500);
  sensor.setMeasurementTimingBudget(200000);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if (digitalRead(3) == HIGH){
    duration = 0;
    for (int i=1; i<=50; i++){
      duration = duration + sensor.readRangeSingleMillimeters();
    }
    duration = duration/50;
    duration=2*3.335640952*duration; //3.335640952
    Serial.println(duration);
  }
}
```