

# Divergenza di un raggio laser

Sotto la supervisione del Prof. Donelli Paolo

## Indice:

1. Premessa
2. Le basi per iniziare
3. Utilizzo e costruzione degli strumenti
4. Settaggio del fotosensore
5. Funzionamento del laser
6. L'esperimento
7. Analisi dati
8. Conclusioni dell'esperimento
9. Appendici

Hanno progettato l'esperimento gli alunni:

Giacomelli Giasis Giulio

Qin Wen Cheng

Necaj Dhionisios

Supervisione del Prof. Donelli Paolo durante tutto l'esperimento.

Gli strumenti usati sono stati omologati e utilizzati in modo da non costituire un pericolo.

Per ragioni di sicurezza l'esperimento è stato eseguito con dei appositi guanti e occhiali per evitare danni provvisori o permanenti di tipo visivi e cutanei.

## **1. Premessa**

Questo esperimento è il risultato di una serie di lezioni tenute in classe e in laboratorio sul funzionamento del raggio laser e della sua divergenza.

Esso è accompagnato da una serie di ore puntate a studiare statistica per poter dare un migliore e più approfondito risultato del nostro percorso.

L'esperimento è stato effettuato da tre ragazzi del liceo scientifico scienze applicate (SCA).

Esso consiste nel misurare la divergenza dell'angolo di alcuni raggi laser per dimostrare il suo allargamento nell'aumentare della distanza.

L'attività è stata svolta prima in laboratorio e poi in una stanza apposita buia per poter misurare meglio il raggio del laser.

La prima parte, riguardante la preparazione degli strumenti è stata eseguita in un laboratorio di fisica nel quale ci è stato possibile assemblare il laser.

La seconda invece, per evitare il più possibile che la luce esterna influenzi l'esperimento è stata svolta all'interno di una stanza buia di notevoli dimensioni.

## **2. Le basi per iniziare**

Prima di dare inizio all'esperimento è stato necessario decidere il procedimento.

Partendo dagli strumenti già a nostra disposizione abbiamo notato che non ci sarebbe stato bisogno di ulteriori parti fisiche, mancava però il metodo di calcolo dell'angolo del laser al decimo di millimetro evitando grossi errori, tra cui quello dell'incertezza visiva.

Ci siamo serviti della trigonometria e di una semplice formula per calcolare la divergenza e abbiamo ripassato delle parti di elettronica per evitare incidenti con i voltaggi, anche se molto bassi.

Ognuno dei tre studenti era responsabile di una parte diversa dell'esperimento.

Giacomelli si è occupato della parte elettronica e si è assicurato del funzionamento corretto degli strumenti e del loro utilizzo.

Qin ha provveduto a tutta la parte di sperimentazione fisica, assemblaggio e giusto posizionamento degli strumenti.

Necaj era responsabile della parte documentativa e di analisi dati, facendo foto e video per riprendere l'esperimento e inserendo tutti i dati ottenuti in apposite tabelle da lui progettate.

### 3. Utilizzo e costruzione degli strumenti

Sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

- Laser Verde classe 2 ( voltaggio differenziabile )
- Laser Rosso classe 1 ( circa 5 mw )
- Carta Millimetrata
- Scheda madre Arduino
- Scheda elettronica per bassi voltaggi
- Fotosensore
- Sensore temperatura e umidità
- Motore Servo a movimento angolare
- Scatola di cartone resistente
- Fissaggio per il laser
- PC
- Tablet
- Filo da pesca
- Macchina fotografica
- 4 pile da 9 v
- 4 pile da 1.5 v

L'esperimento è stato ulteriormente diviso in due parti:

Una riguardante il Laser Verde

Una riguardante il Laser Rosso

Nonostante l'apparente semplicità dell'esperimento è stato difficile assemblare correttamente uno strumento in grado di calcolare esattamente il diametro del raggio laser.

Dopo diverse prove con la carta millimetrata, funzionante solo per piccoli spessori, visto che oltre a un certo numero di millimetri l'incertezza visiva era troppo invasiva, abbiamo deciso di servirci di un fotosensore programmato in Python e poi collegato a una scheda Arduino che compilava il file di origine per dare funzionalità al sensore.

Una volta costruito il sensore rimaneva il problema del movimento.

Per calcolare il diametro del laser avevamo bisogno di uno spostamento regolare del sensore in modo da sapere l'esatta grandezza del raggio.

Ci siamo così serviti di una scatola di cartone resistente, per fare un appalto mobile sul quale metter il fotosensore, a sua volta spostato da un motore a movimento graduale (1 grado al secondo) collegati tra di loro con un filo da pesca, non flessibile. Sapendo che il movimento di 1 grado del motore equivaleva a 0,5 mill abbiamo poi effettuato le misure.

Per essere sicuri del corretto funzionamento dell'assemblaggio abbiamo anche usato la carta millimetrata nonostante alcune complicazioni.

Ultima cosa da noi assemblata è il Laser Verde.

A differenza di quello rosso, già costruito, quello verde è un raggio laser a voltaggio variabile, cioè che può essere esposto anche ad un alto numero di volt (48-60 v).

Abbiamo usato una scheda elettronica differenziale e alcuni fili come collegamento tra la scheda, il laser e le batterie.

Per permettere l'utilizzo di voltaggio più alti alcune pile sono state collegate tramite dei fili speciali.

Come ultima cosa ci siamo occupati di creare un fissaggio per il laser, in modo che durante il movimento del sensore esso non si muova a causa dei piccoli tremolii delle mani, nel caso fosse stato tenuto da una persona.

#### **4. Settaggio del fotosensore**

Una volta montato il fotosensore è stato necessario compilarlo per avere un output dati in resistenza elettrica.

Praticamente, quando il laser colpisce il fotosensore, esso agisce come diodo e crea una resistenza elettrica sulla scheda elettronica che a sua volta viene captata dalla scheda Arduino.

Al buio l'output è di 1023 in fattore resistenza, cioè la resistenza al passaggio di corrente è pari a 0.

Fattore e resistenza sono inversamente proporzionali.

Alla luce invece il fattore si avvicina sempre di più a 0. La luce solare ad esempio sforza il fotosensore a emettere un fattore resistenza di circa 800, pari a un diodo di circa 100  $\mu\text{m}$ .

A contatto con un laser invece, il sensore può scendere fino a 12 di fattore resistenza, creando una resistenza pari a un diodo di 1000  $\mu\text{m}$ .

Il sensore è stato compilato in python, tradotto poi in linguaggio Arduino.

Il tutto è perciò elettronico e non sottoposto a errori di grosse dimensioni.

A causa della forte intensità del laser, siamo costretti a usare guanti e occhiali.

I primi non sono indispensabili, visto che non produce calore, ma dobbiamo seguire le regole di sicurezza.

#### **5. Funzionamento del laser**

In modo da dare una spiegazione più approfondita al nostro esperimento, è necessario spiegare il funzionamento di un laser.

Il Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) è uno strumento che utilizza i livelli di energia degli atomi per creare un raggio di luce visibile.

Esso è costituito da 2 specchi e da un impulso energetico iniziale costituito da fotoni. Quando essi colpiscono gli atomi presenti tra i due specchi, fanno scendere di 1 livello energetico l'atomo colpito, che rimanderà fuori una carica pari e uguale a quella che l'ha investito. Quando però la carica esce e si trova davanti a uno specchio, essa è costretta a tornare indietro trovandosi così davanti a uno o più atomi. Più volte questo passaggio si ripete, più sarà il numero di onde presente tra i due specchi, finché non giungeranno ad una uscita sferica creando il raggio laser che noi vediamo.

Ci sono in tutti 4 classi di laser calcolate in base alla lunghezza d'onda.

Classe	descrizione e avvertenza	lunghezza d'onda
1	La radiazione laser accessibile non è pericolosa. Laser con emissioni superiori alla MEP sono di classe 1 se chiusi in un alloggiamento non accessibile.	Da 180 nm a 1 mm.
1M	La radiazione laser accessibile è innocua nelle normali condizioni d'uso fino a quando non vi sono strumenti ottici come lenti di ingrandimento o binocoli che possono concentrare l'energia sulla cornea. <b>Non guardare il fascio direttamente con strumenti ottici.</b>	Da 302,5 nm a 4000 nm
2	La radiazione laser accessibile nello spettro visibile. È innocua per l'occhio considerando anche che la protezione dell'occhio è normalmente assicurata dalle reazioni di difesa compreso il riflesso palpebrale (circa 0,25s) anche se si utilizzano dispositivi ottici di osservazione. <b>Non fissare il fascio.</b>	Da 400 nm a 700 nm
2M	Come la classe 2, la visione del fascio può essere più pericolosa se l'operatore impiega ottiche di osservazione all'interno del fascio. <b>Non fissare il fascio o guardarlo direttamente con strumenti ottici.</b>	Da 400 nm a 700 nm
3R	La radiazione laser accessibile è potenzialmente pericolosa, Il LEA è inferiore a cinque volte il LEA di Classe 2 nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 400 e 700 nm, ed inferiore a cinque volte il LEA di Classe 1 per le altre lunghezze d'onda. <b>Evitare la diretta esposizione degli occhi.</b>	Da 180 nm a 1 mm
3B	La radiazione laser accessibile è normalmente pericolosa per gli occhi se direttamente esposti a distanza inferiore alla DNRO e in casi particolari anche per la pelle. L'esposizione a luce diffusa o dispersa da riflessioni è di solito sicura. <b>Evitare l'esposizione al fascio.</b>	Da 180 nm a 1 mm
4	La radiazione laser accessibile è molto pericolosa per gli occhi e pericolosa per la pelle, inclusa la radiazione diffusa. Quando si utilizza questo raggio laser si possono provocare incendi o esplosioni. <b>Evitare di esporre occhi o pelle alla radiazione diretta o diffusa.</b>	Da 180 nm a 1 mm

I nostri due laser sono di fascia 2 (quello verde) e di fascia 1 (quello rosso).

Quello verde è un laser come già detto diverse volte, a voltaggio variabile.

Esso è costruito per lavorare a 9 v, ma si può salire fino a 60 per vedere gli effetti e i cambiamenti del raggio.

Sono presenti al suo interno 2 specchi e un piccolo collegamento che manda il primo input di fotoni per creare l'effetto sopra elencato.

L'uscita sferica è provvista di una piccola lente che amplifica l'effetto del raggio laser rendendolo piccolo e molto preciso.

All'inizio del "corpo" del laser è presente un bottoncino che permette il passaggio di corrente dal tubicino alla "camera" con i due specchi.

Purtroppo non ci è possibile spiegare l'esatto funzionamento del laser rosso, visto che non è stato possibile aprirlo, ma sicuramente è molto simile se non uguale a quello verde.

## **6. L'esperimento**

Dopo aver assemblato gli strumenti, compilato la scheda Arduino e montato il laser sul fissaggio, ci siamo diretti nella stanza buia per dare inizio all'esperimento.

Visto che il nostro obiettivo era quello di calcolare la divergenza dell'angolo del laser, ci siamo serviti di una formula trigonometrica :

Angolo in rad = Diametro / Distanza

Il nostro esperimento doveva perciò essere eseguito a distanze diverse per osservare il modificarsi del diametro del raggio.

Prima di iniziare era però necessario calcolare la quantità di umidità nell'aria.

A cause della notevole quantità di pulviscolo presente nella stanza, un'umidità eccessiva avrebbe appesantito la polvere, che, a contatto con il raggio, lo avrebbe leggermente deviato cambiando i risultati.

Ci siamo così serviti della scheda Arduino e di un sensore Temp.-Umid. per calcolare la percentuale d'umidità dell'aria.

Il risultato è stato del 51%. Sotto al 75-90% la deviazione non è eccessiva e abbiamo quindi catalogato l'errore legato all'agente esterno nullo.

Dopo aver effettuato questa misura alcune volte, siamo passati alla parte sperimentale.

Abbiamo scelto 9 distanze in metri :

-0,6

-2

-3

-4

-6

-7,3

-10

-12  
-15,3

Abbiamo posizionato il fissaggio del laser su un tavolino e il sensore su un'altra superficie, spostando il primo nelle 9 diverse distanze.

Una volta fissato il laser abbiamo acceso il raggio e lo abbiamo puntato sul sensore.

A questo punto pigiando un bottone compilato e collegato alla scheda Arduino, si aziona il motore che fa spostare il sensore.

Il primo output deve stare tra 1023 e 600 ( $600 < x < 1023$ ) in modo da farci capire che il laser non sta ancora puntando sul sensore ma è molto vicino.

Muovendolo verso il raggio, l'output del fattore resistenza cambia drasticamente ( $10 < x < 100$ ) avvertendoci che la luce del laser si trova esattamente sul sensore.

Appena l'output torna a 1023 sappiamo che il laser non si trova più sul sensore.

A questo punto contiamo il numero di gradi.

Con la carta millimetrata abbiamo visto che 1 grado di movimento corrisponde esattamente a 0,5 mm (ci è bastato calcolarlo mettendo la carta mill. sotto al sensore per vedere il suo movimento che risulta precisissimo).

A questo punto moltiplichiamo il numero di gradi per 0,5 mm e otteniamo il diametro.

Abbiamo effettuato tutte le misure diverse volte sia su sensore che su carta millimetrata, ed è incredibile quanto il risultato di entrambi sia molto simile (anche se ci siamo fidati più del sensore visto che la carta è soggetta a errore visivo).

Dopo aver calcolato il diametro abbiamo anche misurato l'alone del laser, cioè fino a dove la luce del raggio si espande su una superficie. È stato misurato solo con la carta mill. A causa delle sue dimensioni e date le incertezze assurde, visto che ognuno di noi vedeva un risultato completamente diverso (dovuto forse alla qualità visiva), abbiamo deciso di non prendere in considerazione l'alone e di concentrarci esclusivamente sul raggio principale.

Questo procedimento è stato eseguito per tutte le distanze, partendo dalle più piccole alle più grandi. Per assicurare dei risultati esatti ci siamo impegnati a calcolare il raggio diverse volte per ogni distanza, sia con il sensore che con la carta mill.

Solo nel caso delle ultime misure del laser rosso, troppo grandi da essere calcolate con il sensore, ci siamo serviti unicamente della carta mill.

L'esperimento è stato prima eseguito per il laser verde e poi per quello rosso con il loro voltaggio base.

Ci siamo però accorti che aumentando il voltaggio (cosa che solo nel laser verde era possibile) a cause della lunga durata dell'esperimento, dopo diverso tempo di utilizzo si affaticavano i circuiti e rischiavamo di danneggiare lo strumento, motivo per il quale ci siamo ridotti a fare le misure solo con 9v.

Durante l'esperimento, nonostante Necaj fosse responsabile della raccolta dati, ognuno ha scritto in una sua tabella la misura secondo lui corretta della carta mill. (del sensore non ce ne era bisogno visto la precisione elettronica).

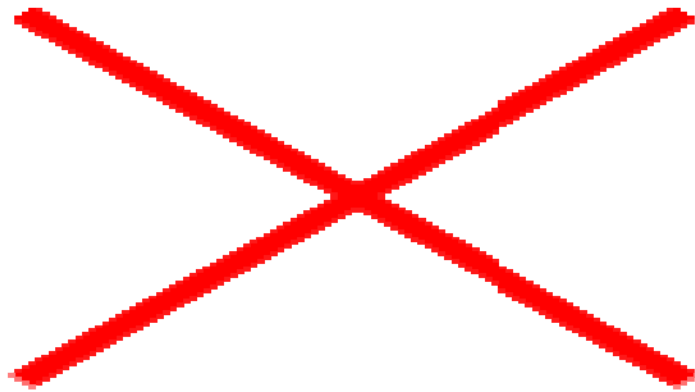
Abbiamo così fatto le medie prima tra i risultati della carta e poi tra quelli del sensore.

Abbiamo notato una differenza minima tra i due e abbiamo deciso di considerare i risultati del sensore sicuramente più preciso dei nostri occhi.

La carta mill. è stata dunque utile solo per accertarsi che i dati tornassero simili e che le parti elettroniche non stessero rendendo dei dati sbagliati.

## **7. Analisi Dati**

Concluso l'esperimento, per ogni laser avevamo 9 risultati riguardante il diametro del raggio, 1 per ogni distanza.

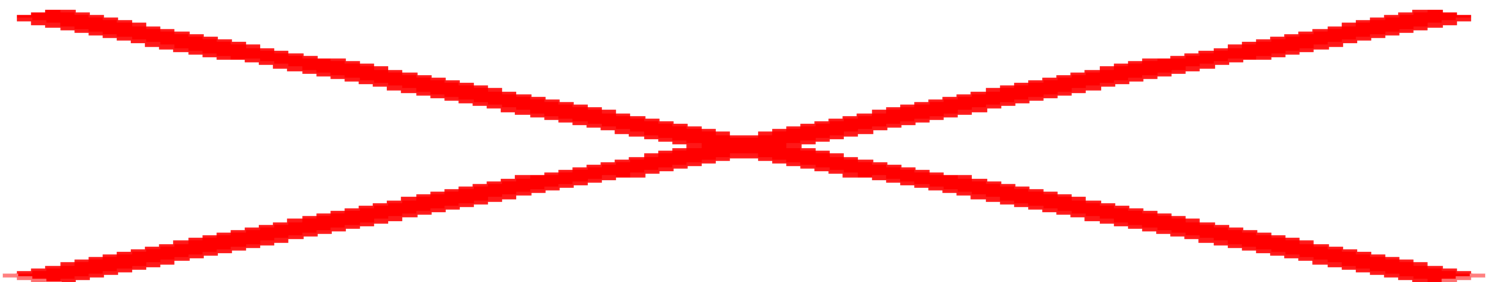


Notiamo subito una differenza notevole nel cambiamento del diametro tra il primo e il secondo laser: quello verde risulta infatti molto più preciso di quello rosso.

Una volta organizzate nella tabella le misure base, siamo passati a calcolare in gradi e in radianti la divergenza.

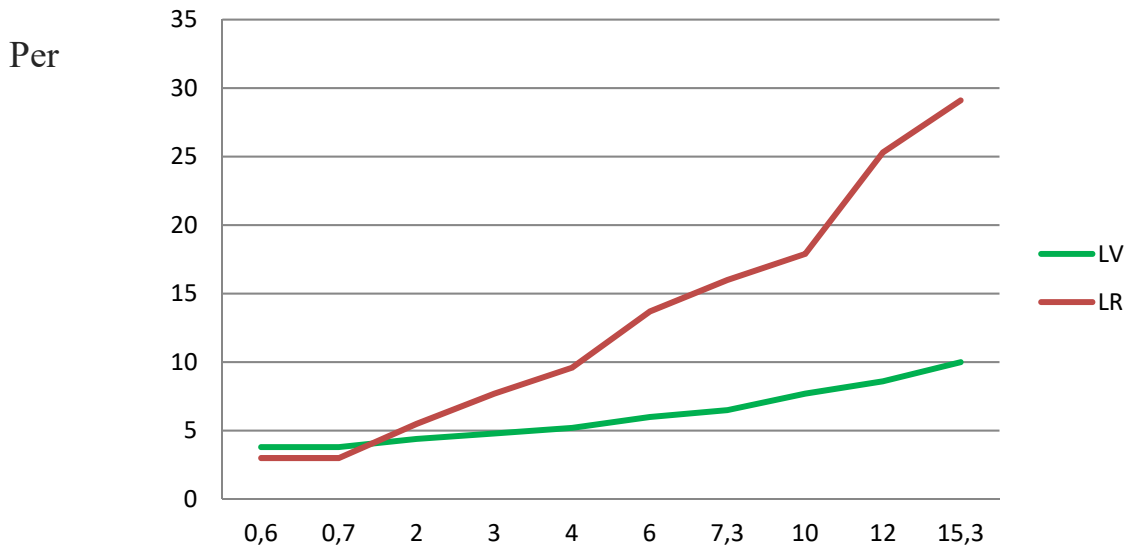
Per ogni distanza e il suo diametro abbiamo applicato la formula:

$$\text{Divergenza in rad} = \text{Diametro} / \text{Distanza}$$

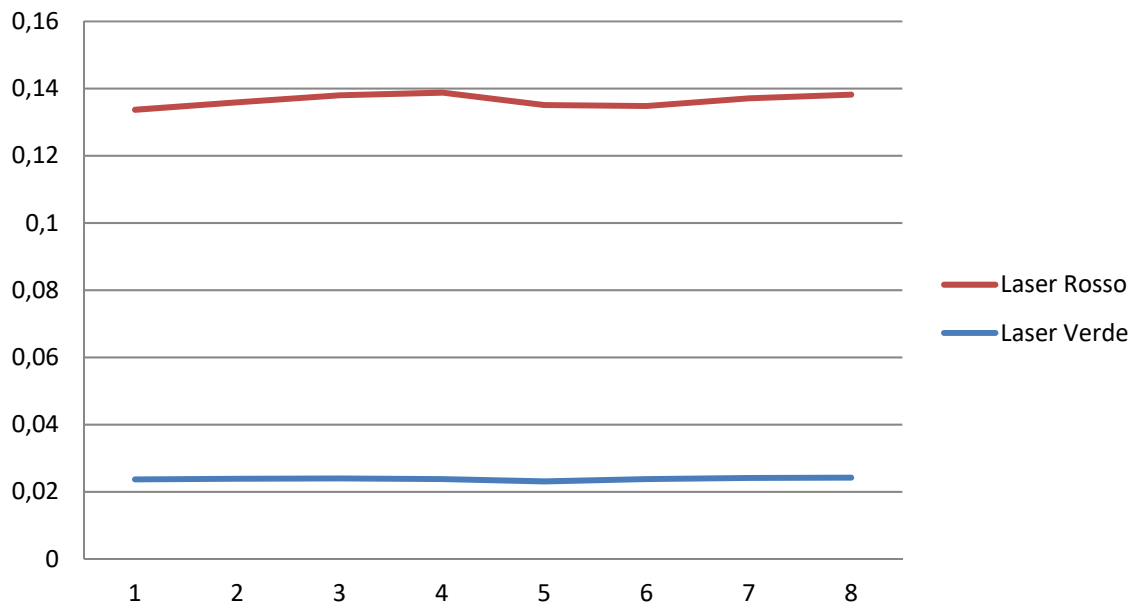




I risultati tornano, visto che l'angolo risulta molto simile in tutte le prove. Per capire meglio quanto un laser si differenzi da quell'altro abbiamo creato un grafico che ci desse una idea della situazione.



renderci conto della linearità dei risultati, abbiamo infine tracciato un grafico rappresentante i valori degli angoli ottenuti.

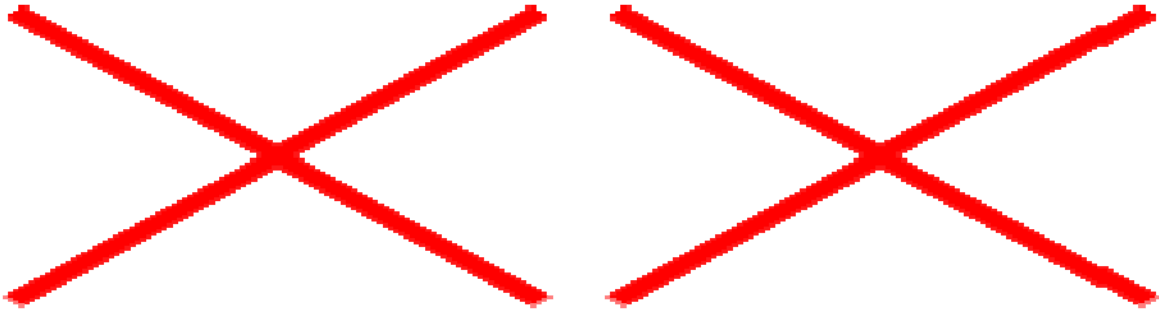


Come ci aspettavamo il grafico rappresenta 2 linee quasi rette, un'altra dimostrazione a favore dell'esperimento ben riuscito.

Fatto ciò siamo passati a calcolare l'errore standard (l'incertezza) e la regressione per entrambi i laser.

Con il termine “R al quadrato” invece vedremo quanto tra 0 e 1 (0-100%) i nostri dati risulteranno precisi. Con questo calcolo infatti chiediamo al computer di stimare l'angolo perfetto di divergenza e di dirci quanto i nostri dati risultino precisi in confronto a quelli reali, ovviamente impossibili da calcolare a causa degli errori e delle incertezze.

Per farlo usiamo i risultati della regressione.



Il così detto “**errore standard**” sarebbe l'incertezza che influenza le nostre misure.

“R al quadrato” risulta invece vicino al 100% (0,98-0,99), confermandoci che i risultati da noi ottenuti sono praticamente vicini alla perfezione.

L'ultimo passaggio consiste nel costruire la retta di regressione.  
Per fare ciò dobbiamo partire dall'equazione base di tutte le rette:

$$y=a+bx$$

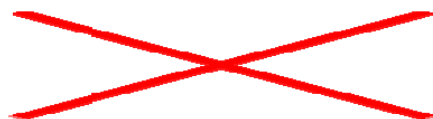
“y” sarà ovviamente la retta.

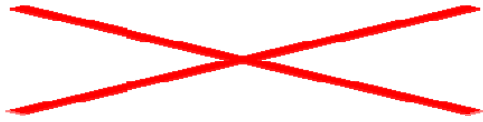
“a” è l'intercetta.

“b” è l'angolo.

“x” è invece la distanza.

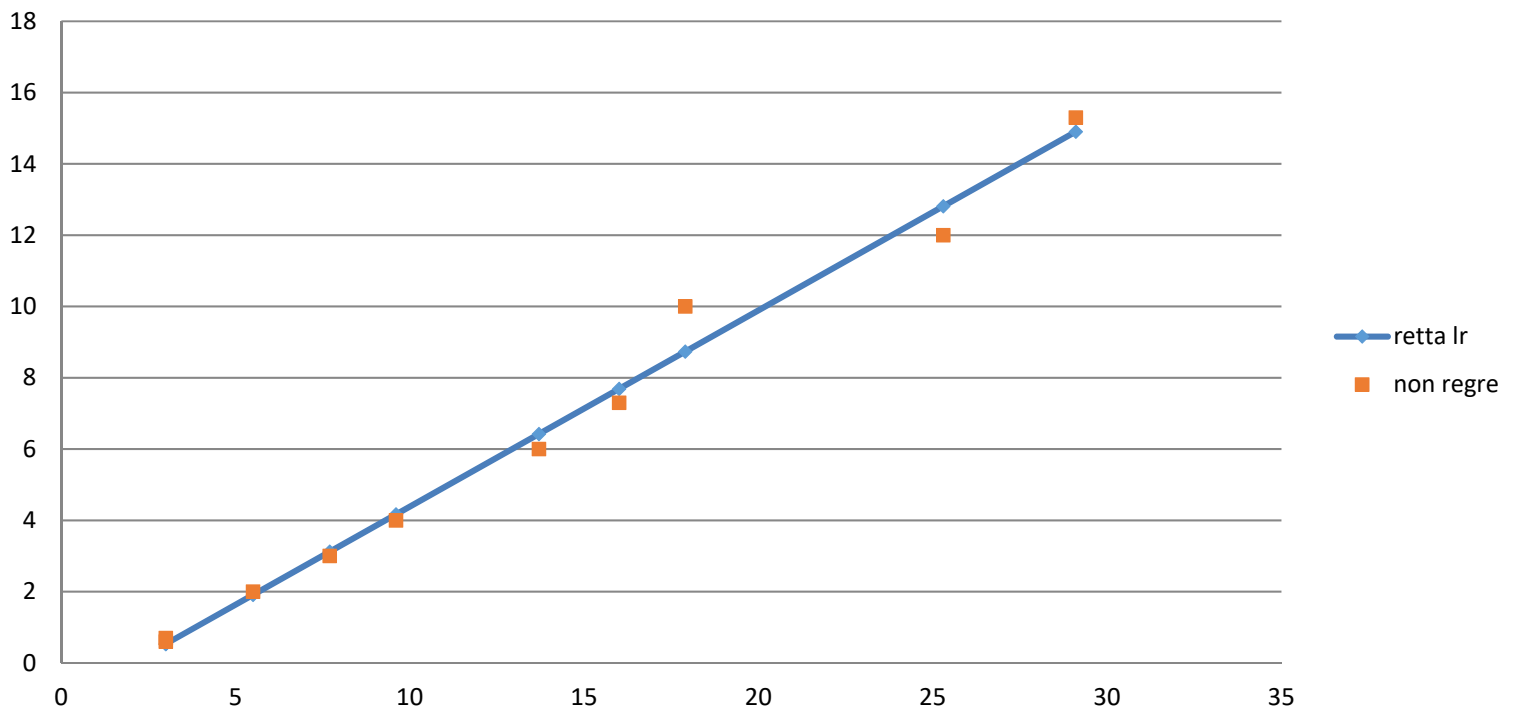
Insieme ai calcoli della regressione abbiamo notato che l'intercetta risulta essere:





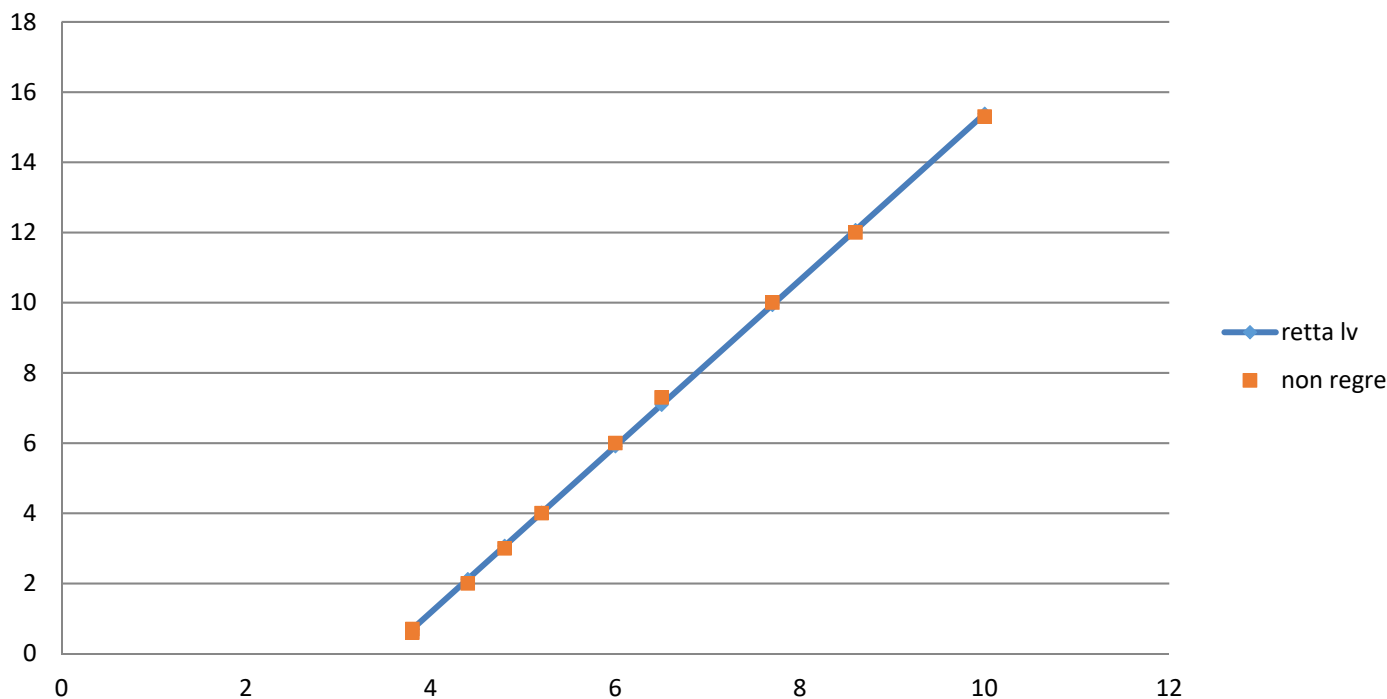
Con questi dati possiamo poi calcolare la retta di regressione che ci dirà quanto i nostri dati siano vicini alla realtà.

I grafici ottenuti sono i seguenti.  
Per il Laser Rosso.



La retta blu rappresenta la retta di regressione cioè i dati di un esperimento eseguito perfettamente. I nostri dati invece sono quelli rappresentati dai triangolini azzurri.

Per il Laser Verde



Stessa situazione per il Laser Verde.

Ciò è molto positivo, ci dimostra che entrambi i laser e i loro risultati non solo sono quasi coincidenti alla perfezione, bensì adesso siamo sicuri di aver fatto un buon lavoro.

## 8. Conclusioni dell'Esperimento

Dopo aver visto e analizzato i dati raccolti possiamo giungere alle nostre conclusioni.

-Ogni laser ha una sua divergenza.

-Un raggio laser ha un'incidenza che può dipendere da 2 cose:

-il voltaggio

-la lente

Più il voltaggio è alto più il laser tende a essere concentrato, ma richiede delle lenti apposite in modo da non subire un effetto contrario.

Risulta molto interessante anche la parte iniziale nella quale abbiamo notato un cambiamento quasi nullo nella distanza del raggio laser tra i 0 e i 60 cm.

Questo potrebbe essere però dovuto alla presenza della polvere o di alcuni corpi in aria che durante il tragitto del raggio tendono a deviarlo, rendendo la divergenza visibile solo dopo alcune decine di cm.

Un'altra ipotesi è che la parte iniziale abbia una divergenza diversa a causa dell'errore sia visivo che elettronico. Il raggio potrebbe espandersi talmente poco da far risultare nulla la divergenza anche all'Arduino.

La media finale della divergenza del Laser Verde risulta essere:  
 $-4,15 \cdot 10^{-4}$  rad ( $0,024^\circ$ )

Del Laser Rosso:  
 $-196,6 \cdot 10^{-3}$  rad ( $0,113^\circ$ )

Sono stati ovviamente esclusi i dati prima dei 60 cm (LV) e prima dei 70 cm (LR) visto che risultavano inutile per calcolare la divergenza del raggio.

Ogni laser ha una sua divergenza e non è possibile costruirne uno che manchi di tale proprietà.

Essa è proporzionale al raggio di luce, più grande sarà quest'ultimo, più esso divergerà e ciò è dovuto all'enorme quantità di fotoni che vengono "sparati".

Sono pochi i casi in cui questa proprietà si annulla, e solo alcuni strumenti in mano a scienziati o militari sono in grado di avere un fascio enorme con una divergenza addirittura nulla (come nel caso dei LAWS, cannoni laser sperimentali utilizzati nella marina USA che lavorano a migliaia di watt).

Un'ultima proprietà dei nostri laser che abbiamo notato è lo strano cambiamento improvviso di divergenza ad alcuni voltaggi.

Abbiamo infatti eseguito i nostri esperimenti come detto anche per altri voltaggi, con un numero di dati minori a causa del surriscaldamento (solo per il LV):

Abbiamo notato che il laser, all'aumentare del voltaggio, tendeva ad aumentare la concentrazione del raggio. Ciò fino a 18-22v.

Abbiamo però notato che dai 27v in poi esso iniziava a sfalsarsi, creando un raggio non molto concentrato ma incredibilmente più grande, con una divergenza quasi tripla rispetto a quella data dai voltaggi precedenti.

Con le nostre conoscenze purtroppo non possiamo dare risposta, ma solo avanzare delle ipotesi, e quella più ovvia sembra essere collegata al numero troppo grande di fotoni presenti nella camera.

Più aumentiamo il voltaggio infatti, più saranno il numero di fotoni presenti nella camera di lancio.

Se ne immettiamo troppi, invece di procedere lentamente, potrebbero riempire troppo velocemente la camera senza dare la possibilità agli atomi in essa presenti di cadere di livello energetico per tutti i passaggi di onde, sparando il raggio completamente sfalsato e surriscaldando i collegamenti interni alla camera.

## **9. Appendici**

Siamo giunti alla fine della nostra relazione e possiamo affermare di aver compiuto un ottimo lavoro sulla base strumentale e organizzativa.

Nonostante non siamo riusciti a dare una soluzione ad alcuni dubbi del nostro esperimento, abbiamo acquisito delle nuove conoscenze e siamo convinti di riuscire

ad estinguere tutte le nostre perplessità anche grazie a questo esperimento eseguito nel migliore dei nostri modi.

Nella relazione hanno lavorato Giacomelli alla sua stesura e correzione, Necaj all'inserimento e spiegazione dati, Qin a tutta la parte di Power Point e le conclusioni.

Ringraziamo il Prof. Donelli per l'aiuto da lui datoci, considerando la necessità di 2 stanze e diversi strumenti a disposizione della scuola.

Speriamo che la relazione risulti precisa e semplice da leggere, visto il tempo impiegato nell'esperimento e nella sua stesura.

Grazie per la lettura.

Giasis Giulio Giacomelli

Qin Wen Cheng

Necaj Dhionisios