

NUOVI E VECCHI STRUMENTI
PER INDAGARE I FENOMENI IN NATURA
Il laboratorio tra tradizione e innovazione

Firenze, 22 – 23 aprile 2026

SEZIONE TESINE TRIENNIO

Menzione d'onore

**Il linguaggio segreto della luce.
Tra fisica e percezione**

Studenti

Carone Gaia - De Riggi Giovanni – Dattero Paola – Curcio Michele

Classe 4B

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo scientifico Carlo Pisacane

Padula (SA)

Docente Coordinatore

Paradiso Enza

Gli studenti affrontano il tema della natura della luce. Verificano la propagazione rettilinea, studiando con strumenti tradizionali la rifrazione di luce laser rossa e verde. Per verificare la natura ondulatoria della luce, determinano la lunghezza d'onda delle due sorgenti laser con l'esperimento classico di Young. Assemblano e testano un sensore per l'analisi cromatica della luce riflessa, basato sul legame tra lunghezza d'onda e colore. La tesina, talora di non facile lettura, mostra buona comprensione delle tecniche utilizzate.

Relazione docente alla tesina 'IL LINGUAGGIO SEGRETO DELLA LUCE: TRA FISICA E PERCEZIONE'

È il primo anno che io insegno in questo liceo scientifico, per cui ho accettato con entusiasmo, ma non senza timore, la proposta di partecipare a questo concorso. I motivi sono molteplici, ma essenzialmente è prevalsa la necessità di non far mancare agli alunni possibilità di confrontarsi con altre realtà del tutto diverse, di guidarli in un percorso scientifico-sperimentale emozionante, promuovendo e sviluppando l'empatia, che è indispensabile nel rapporto docente-allievi.

Il tema è stato scelto in tutta autonomia dagli allievi. La programmazione, progettazione ed esecuzione delle esperienze non è stata semplice né per l'esiguità del tempo a disposizione, sia per la mancanza di strumentazione. Abbiamo dovuto scegliere dunque tre esperimenti significativi per poter soddisfare i quesiti posti sull'indagine della natura della luce.

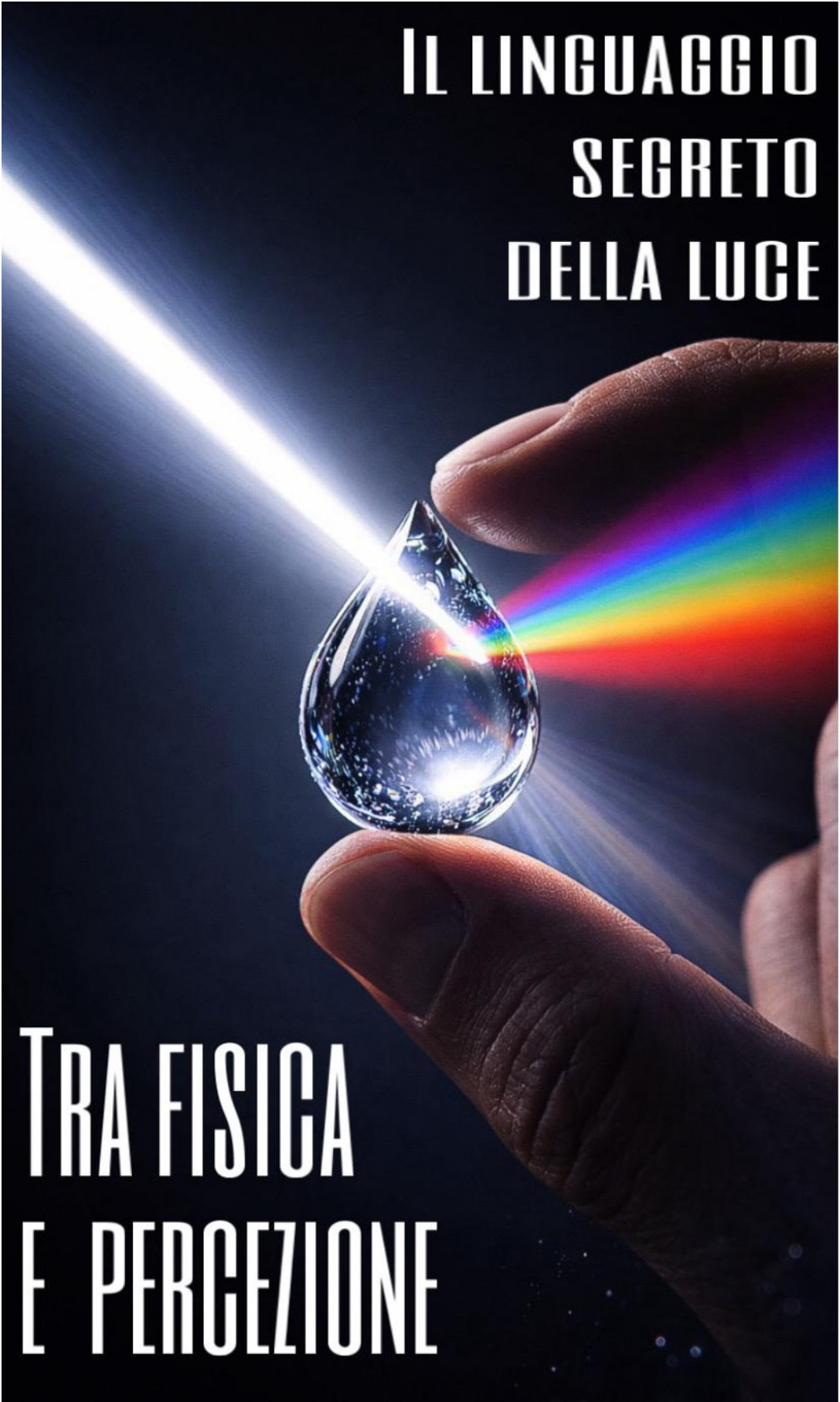
A me è sembrato utile però offrire loro un metodo di "indagine scientifica": scegliere un modello, fare sperimentazione, verificare o scoprire delle leggi, saper riconoscere i limiti del modello adottato.

Sia durante l'attività di ricerca sia durante quella di laboratorio ho messo in evidenza che un risultato negativo è importante quanto quello positivo, poiché quello negativo ci porta a fare nuove ipotesi, adottare nuovi modelli di studio e nella parte sperimentale nuove metodologie e nuovi strumenti.

I ragazzi hanno partecipato con interesse ed entusiasmo, superando nell'esecuzione delle esperienze difficoltà notevoli, anche perché era la prima volta che essi partecipavano a un "lavoro sperimentale".

Spero che questo interesse per l'indagine scientifica: osservare, riflettere, cercare di capire i fenomeni che avvengono in natura, sia sempre più forte. È questo l'obiettivo principale del nostro lavoro.

IL LINGUAGGIO SEGRETO DELLA LUCE

A hand holds a single, clear water droplet between its thumb and index finger. A bright, white beam of light enters the droplet from the left. As the light passes through the droplet, it is refracted and dispersed into a vibrant rainbow spectrum that arcs out to the right. The background is a deep, dark blue, and the overall image has a high-contrast, scientific feel.

TRA FISICA E PERCEZIONE

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Dall'osservazione fenomenologica all'algoritmo: il nostro percorso ricerca	3
2	Collacazione Teorica	3
3	Modello del raggio luminoso per interpretare l'interazione della luce con la materia	4
4	Indagine sulla natura della luce	5
4.1	Grandezze caratteristiche delle onde sinusoidali	6
4.2	Il fenomeno dell'interferenza e determinazione di λ	7
5	Nuova metodologia e nuovi dispositivi	8
5.1	Il sensore RGB	9
6	Il nostro percorso da Young ai sensori RGB	10
7	Conclusioni	10
A	Allegato A: Rifrazione	11
A.1	Materiale	11
A.2	Esecuzione:	12
B	Allegato B: Esperimento di Young	15
B.1	Materiale	15
B.2	Esecuzione	16
B.3	Raccolta Dati	17
C	Allegato C: Spettrometro	19
C.1	Esecuzione	19

1 Introduzione

Quando ci è stato presentato il progetto “ScienzAfirenze”, il tema proposto non è stato subito facile da comprendere. L’idea del nostro lavoro nasce durante un pomeriggio trascorso a scuola, al termine delle lezioni. Il tempo era incerto: il cielo alternava nuvole scure a improvvisi squarci di luce. Dopo un breve temporale, affacciandoci dalle finestre dell’aula, abbiamo notato un arcobaleno che si stagliava nel cielo.

L’immagine, intensa e luminosa, ha attirato la nostra attenzione non solo per la sua bellezza, ma soprattutto per il fenomeno fisico che rappresenta. Ci siamo chiesti come fosse possibile che la luce, apparentemente bianca, si scomponesse in una successione ordinata di colori e, soprattutto, se fosse possibile riprodurre il fenomeno che stavamo osservando e dare una spiegazione scientificamente; nello stesso tempo associare ad ogni colore una grandezza fisica da misurare. Quell’arcobaleno, nato da una situazione quotidiana e semplice, è diventato il punto di partenza di una riflessione più ampia sulla natura della luce.

In seguito, durante una lezione di filosofia, la professoressa ci ha invitati a riflettere sugli strumenti che l’uomo utilizza per conoscere la realtà. Il telefono, ad esempio, è stato presentato come uno strumento che, secondo un’idea riconducibile a Francis Bacon, può essere considerato una sorta di “terza mano” dell’uomo contemporaneo: un’estensione delle sue capacità percettive e operative.

L’unione tra l’esperienza concreta dell’arcobaleno osservato dalla finestra della nostra scuola e la riflessione filosofica sugli strumenti ci ha portato a sviluppare un percorso di ricerca sull’evoluzione degli strumenti di misura della luce: dai dispositivi ottici tradizionali, come il prisma, fino ai moderni sensori RGB integrati negli smartphone.

1.1 Dall’osservazione fenomenologica all’algoritmo: il nostro percorso ricerca

Il nostro lavoro si è snodato lungo un filo conduttore che unisce i secoli, mettendo a confronto l’ingegno manuale dei padri della fisica con le potenzialità del calcolo computazionale moderno. Attraverso questo percorso, inoltre, intendiamo dimostrare come gli strumenti moderni non rappresentino una rottura rispetto al passato, ma costituiscano un’evoluzione dei principi fisici già individuati dalla scienza classica, confermando il ruolo della tecnologia come estensione e potenziamento delle capacità percettive e di misura dell’uomo.

2 Collacazione Teorica

Fin dall’antichità l’uomo ha osservato i fenomeni naturali cercando di comprenderne le cause. Tra questi, la luce e le sue manifestazioni hanno sempre suscitato grande interesse, in particolare l’arcobaleno, fenomeno suggestivo e apparentemente misterioso. In assenza di spiegazioni scientifiche, le civiltà antiche ne diedero interpretazioni mitiche e religiose: nella cultura greca, ad esempio, l’arcobaleno era associato a Iris, messaggera degli dèi, e rappresentava un ponte tra cielo e terra ed ancora oggi è simbolo di pace e di tranquillità.

Con il tempo si iniziò a osservare che l’arcobaleno compare quando luce solare e pioggia sono presenti contemporaneamente, interpretandolo come un segno di armonia tra forze naturali

diverse. In epoca moderna, infine, l'arcobaleno ha assunto un valore simbolico, diventando emblema di pace, convivenza e speranza.

Per vedere un arcobaleno bisogna avere il Sole alle spalle e dirigere lo sguardo verso una zona in cui piove. Quest'ultimo è prodotto dalla dispersione della luce solare da parte delle gocce di pioggia. Ogni goccia si comporta come un prisma.

La luce solare si rifrange una volta all'ingresso della goccia, si riflette al suo interno dalla parte opposta e si rifrange una seconda volta all'uscita. La componente rossa della luce, deviata in misura minore rispetto alla direzione dei raggi solari incidenti, giunge all'osservatore da gocce che si trovano più in alto e la componente violetta gli giunge da gocce che si trovano più in basso. Per questo motivo l'arcobaleno è violetto in basso, sul bordo interno, e rosso in alto, sul bordo esterno.

3 Modello del raggio luminoso per interpretare l'interazione della luce con la materia

Diversi fenomeni legati alla luce, per esempio, la produzione delle immagini da parte di specchi e lenti, sono descritti dal modello dei raggi. Secondo questo modello la luce attraversa lo spazio colpisce gli oggetti e arriva ai nostri occhi viaggiando sempre in linea retta. Obiettivo della nostra attività, in questa prima parte, è stato comprendere e verificare sperimentalmente i fenomeni di rifrazione e dispersione della luce, utilizzando il modello del raggio luminoso e riproducendo in laboratorio alcuni esperimenti fondamentali sul comportamento della luce.

A tal proposito abbiamo studiato ed interpretato alcuni comportamenti della luce quando interagisce con altri corpi, opachi, trasparenti e riflettenti, che interpreteremo con il modello "raggio luminoso". Successivamente abbiamo osservato e sperimentato in laboratorio il fenomeno della rifrazione.

Nella seconda metà del Seicento, Isaac Newton approfondì sperimentalmente lo studio della luce, presentando i suoi risultati alla Royal Society. Nel celebre esperimento del 1666 fece passare un sottile fascio di luce solare attraverso un prisma in una stanza oscurata. Sullo schermo apparve una striscia colorata continua, dal rosso al violetto, che egli chiamò spettro.

Newton dimostrò che il prisma non "crea" i colori, ma separa quelli già presenti nella luce bianca. Isolando infatti un singolo colore e facendolo attraversare un secondo prisma, osservò che esso non si scomponesse ulteriormente. Inoltre, ricomponendo con una lente i raggi colorati, ottenne nuovamente luce bianca. Da questi esperimenti concluse che la luce bianca è una miscela di radiazioni diverse.

Abbiamo verificato sperimentalmente quanto affermato da Isaac Newton in merito alla scomposizione della luce bianca. In laboratorio abbiamo fatto incidere un fascio di luce solare su un prisma ottico, osservando il fenomeno della dispersione. L'esperimento ha evidenziato la separazione della luce nei diversi colori dello spettro visibile, gli stessi che si possono osservare nel fenomeno naturale dell'arcobaleno.

Prendendo spunto da questo esperimento e dalle osservazioni fatte, abbiamo riproposto in laboratorio l'esperienza della rifrazione, facendo incidere un laser di colore rosso e un laser di colore verde su un semicilindrico di plexiglass. In appendice l'esperimento di laboratorio con la deter-

minazione dell'indice di rifrazione rispetto all'area è descritta in modo dettagliato nell'allegato **A**. Grazie alla nostra esperienza in laboratorio abbiamo interpretato e capito perché un fascio di luce bianca che incide sul prisma triangolare, si suddivide nei diversi colori che costituiscono lo spettro della luce. Abbiamo 'scoperto' che fisicamente l'indice di rifrazione di un materiale trasparente non è costante per tutti i colori. Questo fenomeno si chiama dispersione. Ed ecco perché la luce bianca è la sovrapposizione di diversi colori dello spettro e l'indice di rifrazione dipende dal colore. L'arcobaleno è prodotto dalla dispersione e dalla riflessione interna dei raggi solari da parte delle goccioline di pioggia. Il modello del raggio di luce non permette di dare una risposta relativa alla natura fisica della luce! Non sappiamo quale "grandezza fisica" associare ad un determinato colore!! Ma il modello usato ci ha permesso di saper interpretare fenomeni importanti (riflessione, rifrazione, dispersione); di costruire strumenti ottici utilissimi nella ricerca, nello sviluppo tecnologico e migliorare il livello della vita degli esseri umani (camera oscura, lenti, macchina fotografica, microscopio, telescopio).



Figura 1: A sinistra l'arcobaleno osservato dalla finestra della nostra scuola, a destra l'esperimento di dispersione della luce con il prisma effettuato in laboratorio

4 Indagine sulla natura della luce

Nel modello corpuscolare proposto da Isaac Newton nel XVII secolo la luce è considerata un insieme di particelle che si propagano a velocità costante, seguendo traiettorie rettilinee. Tale modello spiega, in accordo con l'ottica geometrica, la propagazione rettilinea e i fenomeni di riflessione e rifrazione.

Il modello ondulatorio venne proposto nello stesso secolo da Christian Huygens (e discusso anche da Robert Hooke), secondo il quale la luce è un'onda, analoga alle onde elastiche del suono. In questa visione, le onde luminose avrebbero avuto bisogno di un mezzo per propagarsi, chiamato "etere".

Nel corso del XIX secolo alcuni fenomeni, come interferenza e diffrazione, poterono essere spiegati solo attraverso la teoria ondulatoria. Il problema dell'etere fu superato quando si chiarì la natura elettromagnetica della luce: le onde luminose non necessitano di un mezzo materiale per

propagarsi.

Secondo il modello ondulatorio, i colori corrispondono a onde che differiscono per lunghezza d'onda e frequenza: il rosso ha lunghezza d'onda maggiore, il violetto quella minore. Nei mezzi dispersivi le diverse lunghezze d'onda subiscono deviazioni differenti. Poiché la velocità della luce in un mezzo è $v = \frac{c}{n}$, dove n è l'indice di rifrazione assoluto del mezzo rifrangente introdotto nell'esperienza di laboratorio.

I colori tendenti al violetto (che hanno indice di rifrazione maggiore) si propagano con velocità minore rispetto a quelli tendenti al rosso. Un raggio di luce monocromatico è costituito da luce di un'unica frequenza. L'interpretazione ondulatoria dell'indice di rifrazione ha il suo fondamento teorico nel principio di Huygens, per cui è opportuno fare un esperimento per misurare λ . La seconda legge di Snell si può scrivere:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = n_{1,2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

Siccome la velocità della luce nell'aria è quasi uguale a quella nel vuoto, l'indice di rifrazione dei mezzi trasparenti relativi all'aria, si considerano circa uguali ai loro indici assoluti. Se il raggio luminoso passa da un mezzo rifrangente (acqua, plexiglass) all'aria, si allontana dalla normale; l'angolo d'incidenza per il quale l'angolo rifratto è 90° diconsi angolo limite. Per angoli maggiori si ha il fenomeno della riflessione totale, fenomeno che trova importanti applicazioni nelle fibre ottiche, alla base dell'endoscopia (in medicina), delle comunicazioni telefoniche e digitali. Riportiamo di seguito le grandezze caratteristiche delle onde sinusoidali:

4.1 Grandezze caratteristiche delle onde sinusoidali

Riportiamo le grandezze caratteristiche delle onde sinusoidali:

- T è l'intervallo di tempo per compiere un'oscillazione completa
- f è la frequenza, il numero di oscillazione al secondo
- A è l'ampiezza delle oscillazioni
- v è la velocità di propagazione
- λ è la lunghezza d'onda, la distanza percorsa dall'onda in un periodo

La relazione fondamentale:

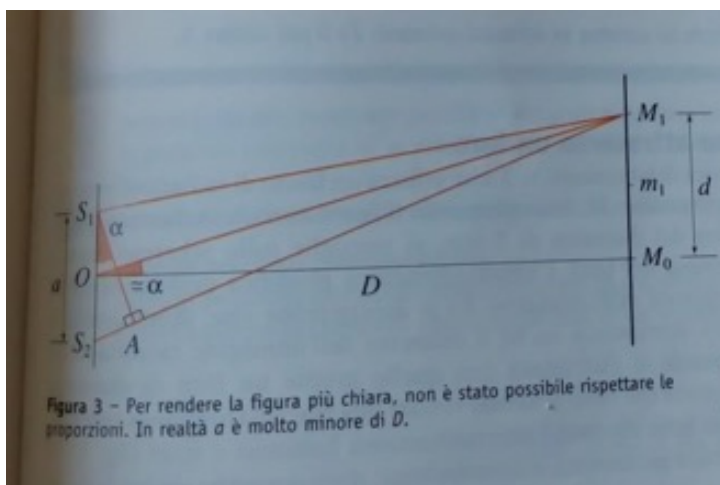
$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} \quad (2)$$

Il "fronte d'onda" (superficie d'onda) è qualunque superficie i cui punti godono della proprietà per cui l'onda impiega lo stesso tempo per propagarsi dalla sorgente fino ad essi; rappresenta dunque il luogo dei punti che vibrano in concordanza di fase. Il raggio ("direzione di propagazione") è perpendicolare al fronte d'onda. L'interferenza è il fenomeno che si verifica quando un mezzo è sede di propagazione di due onde contemporaneamente. Per verificarsi, è necessario che la luce interagisca con oggetti microscopici, le cui dimensioni siano paragonabili alle loro lunghezze d'onda; in tal caso la natura ondulatoria non può essere trascurata. Mentre per le onde

meccaniche il fenomeno si manifesta facilmente, per la luce la difficoltà è dovuta all'impossibilità che le sorgenti comuni (proiettori, lampadine) emettano onde con la stessa frequenza e con sfasamento costante tra loro. Il fisico Thomas Young pensò di inviare la radiazione proveniente da una sorgente su uno schermo opaco sul quale erano state praticate due fenditure. Per il principio di Huygens, le fenditure diventano sorgenti di onde coerenti, cioè che producono onde con la medesima frequenza e che mantengono nel tempo lo sfasamento costante. (Come succede con l'ondoscopio, quando si collegano al vibratore due punte che producono sulla superficie dell'acqua onde circolari). Le onde luminose provenienti dalle fenditure raggiungono lo schermo percorrendo cammini ottici diversi, dando luogo a fenomeni di interferenza. Sullo schermo, impiegando una radiazione monocromatica prodotta da un laser, si ottiene una successione di righe luminose, intervallate da righe oscure.

4.2 Il fenomeno dell'interferenza e determinazione di λ

L'interferenza, effetto del principio di sovrapposizione, si verifica quando il mezzo è sede di propagazione di due onde che si propagano contemporaneamente ma si verifica soltanto quando la luce interagisce con oggetti microscopici, le cui dimensioni sono paragonabili alle loro lunghezze d'onda, poiché in questo caso la natura ondulatoria non può essere trascurata. Mentre per le onde meccaniche il fenomeno si manifesta facilmente, per la luce la difficoltà è dovuta all'impossibilità che le sorgenti comuni (proiettori, lampadine) emettano onde con la stessa frequenza e con sfasamento costante tra loro.



- a = distanza tra le fenditure
- D = distanza tra le fenditure e lo schermo
- d = distanza tra M_0 e M_1
- M_0 = massimo centrale
- M_1 = primo massimo (del primo ordine)
- A = piede della perpendicolare condotta da S_2 a M_1

Figura 2: Figura di interferenza della doppia fenditura

con $a \ll d \implies \hat{\alpha}$ è piccolo e $d \ll D$

quindi possiamo approssimare: $OM_1 \cong OM_0 \cong D$

considerando il triangolo con vertici $S_1, S_2, A \implies \sin \alpha = \frac{S_2 A}{a}$

e nel triangolo di vertici $M_1, M_0, O \implies \sin \alpha = \frac{d}{OM_1}$

La differenza di cammino percorso dalla radiazione:

$$S_2 \cdot M_1 - S_1 \cdot M_1 \cong S_2 \cdot A = a \cdot \sin \alpha$$

Se la differenza di cammino è un multiplo intero della lunghezza d'onda, $(n \cdot \lambda)$ si ha il massimo dell'intensità pari a 1 e tenendo conto che $\sin \alpha = \frac{d}{D}$ si ottiene $S_2 \cdot M_1 - S_1 \cdot M_1 \approx a \cdot \frac{d}{D} = \lambda$ con $n = 1$, dunque:

$$\lambda = \frac{a \cdot d}{D} \quad (3)$$

Sulla base di questi fondamenti teorici in laboratorio abbiamo misurato la lunghezza d'onda λ mediante il famoso esperimento di Young. Si veda allegato in appendice. **B**

L'esperimento di Young evidenzia in modo inequivocabile il comportamento ondulatorio della luce.

La cosa sorprendente è che anche le particelle elementari, come l'elettrone, si comportano di fronte a due fenditure esattamente come la luce, da qui il dualismo onda-corpuscolo della materia: le particelle elementari evidenziano comportamenti corpuscolari oppure ondulatori, a seconda delle condizioni sperimentali alle quali sono sottoposte.

È importante notare che, come le onde sonore di diversa frequenza $f = \frac{1}{T}$, sono percepite dall'orecchio come suoni di diverse altezze, così le onde luminose di diversa frequenza sono percepite dall'occhio come luci di diverso colore.

L'orecchio umano è in grado di percepire suoni con frequenze comprese tra 20 Hz e 20.000 Hz, mentre l'occhio umano è sensibile a onde luminose con lunghezze d'onda comprese tra circa 400 nm (violetto) e 700 nm (rosso). La percezione del colore da parte dell'occhio umano è il risultato dell'interazione tra le onde luminose e i recettori presenti nella retina, chiamati coni.

Le radiazioni esterne, ad esempio i raggi infrarossi, ultravioletti, le onde radio, i raggi X etc, sono invisibili. Tuttavia, nonostante queste analogie, le onde sonore e quelle luminose sono del tutto diverse tra di loro.

Abbiamo visto che la luce bianca è costituita da diversi colori, per cui se un corpo trattiene tutti i colori tranne il rosso, ci appare rosso; invece quelli che diffondono tutti i colori in eguale misura ci appaiono bianchi, mentre se un corpo assorbe tutte le radiazioni luminose ci appare nero (assenza di colore).

Il colore non è, dunque, una proprietà caratteristica di un corpo perché cambia al cambiare della luce che lo colpisce, così come il peso non lo è, poiché esso varia e dipende da dove il corpo si trova. La massa invece è una proprietà caratteristica.

5 Nuova metodologia e nuovi dispositivi

Agli inizi degli anni 2000 i sensori RGB vengono integrati stabilmente nelle fotocamere dei telefoni cellulari, grazie alla diffusione dei sensori CMOS a colori, che hanno reso possibile la miniaturizzazione e il miglioramento delle prestazioni dei sistemi di acquisizione delle immagini. Un sensore RGB è un dispositivo optoelettronico progettato per rilevare il colore di una superficie misurando l'intensità delle tre componenti fondamentali della luce: rosso, verde e blu. Il suo funzionamento si basa sul principio della riflessione della luce: una sorgente luminosa illumina l'oggetto e la radiazione riflessa viene intercettata da fotodiodi interni, ciascuno dotato di un filtro ottico selettivo per una specifica banda spettrale (R, G o B). Ogni fotodiodo converte la luce ricevuta in un segnale elettrico proporzionale alla sua intensità.

I segnali ottenuti vengono successivamente elaborati dal sistema elettronico, che li trasforma in

una terna numerica (R, G, B) rappresentativa del colore rilevato. L'analisi combinata di questi valori consente di identificare con precisione la tonalità dell'oggetto osservato.

Per comprendere meglio la struttura e il funzionamento del sensore, abbiamo smontato una fotocamera non funzionante, analizzando il modulo fotografico. In questo modo abbiamo potuto individuare il sensore di immagine e osservare la sua integrazione con la lente e il circuito elettronico, collegando così i principi teorici alla configurazione reale del dispositivo.

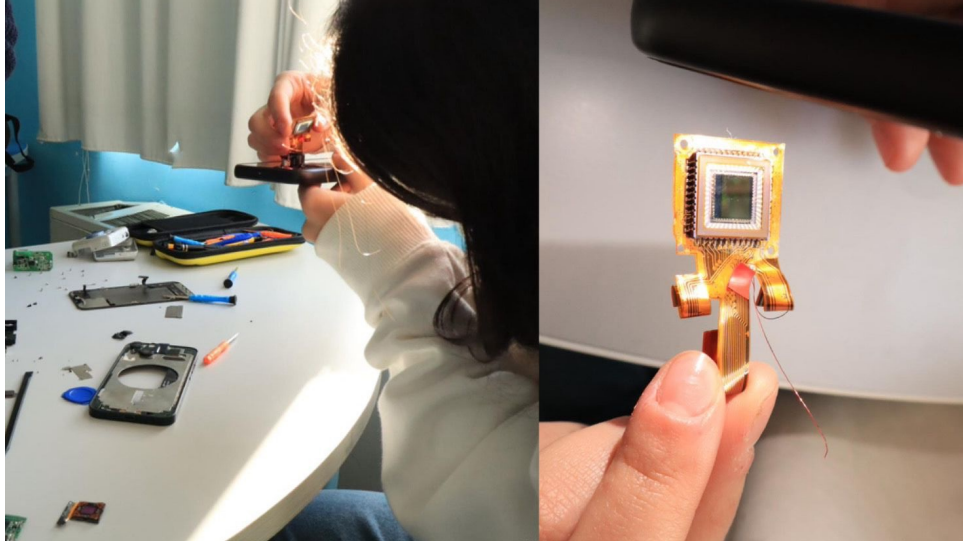


Figura 3: A sinistra il modulo fotografico smontato, a destra un'immagine ingrandita del sensore RGB.

5.1 Il sensore RGB

Nel nostro progetto abbiamo costruito un sensore RGB, cioè un dispositivo capace di riconoscere il colore di una superficie analizzando la luce che essa riflette. Il termine RGB deriva dalle tre componenti fondamentali della luce visibile: Red (rosso), Green (verde) e Blue (blu). Tutti i colori che percepiamo possono essere descritti come una combinazione di queste tre componenti con intensità diverse.

Il sensore RGB funziona illuminando l'oggetto con una luce controllata e misurando quanta parte di quella luce viene riflessa nei tre canali rosso, verde e blu. Nel nostro caso, il sistema utilizza un LED RGB per illuminare la superficie e un elemento fotosensibile per rilevare la quantità di luce riflessa. Quando il LED emette luce rossa, ad esempio, il sensore misura quanta luce rossa viene riflessa; lo stesso procedimento viene ripetuto per il verde e per il blu.

In questo modo si ottengono tre valori numerici che rappresentano l'intensità relativa delle componenti RGB del colore osservato. Confrontando questi valori, il microcontrollore è in grado di determinare quale colore è predominante e di descriverlo in modo quantitativo.

Il principio fisico su cui si basa il sensore è quello della riflessione della luce: un oggetto appare di un certo colore perché riflette maggiormente alcune lunghezze d'onda e ne assorbe altre. Misurando l'intensità della luce riflessa nei tre canali fondamentali, il sensore riesce quindi a trasformare una percezione visiva in un dato misurabile ed elaborabile elettronicamente. Costruire un sensore RGB ci ha permesso di comprendere concretamente come la tecnologia riesca a tra-

durre il colore, che per noi è una sensazione, in un'informazione numerica basata sui principi della fisica della luce.

6 Il nostro percorso da Young ai sensori RGB

OBIETTIVO Mettere a confronto l'analisi della lunghezza d'onda dal passato al presente.

- **Passato:** Esperimento di Thomas Young della doppia fenditura. I dati ottenuti in laboratorio nella determinazione del valore di λ con un laser di colore rosso e verde (Vedi allegato [B](#)):

Laser rosso: $\lambda = (651 \pm 173) \cdot 10^{-9}m$

Laser verde: $\lambda = (499 \pm 171) \cdot 10^{-9}m$

Sono in accordo, entro gli errori sperimentali con il presente.

- **Presente:** Creazione di uno spettrometro (Vedi allegato [C](#))

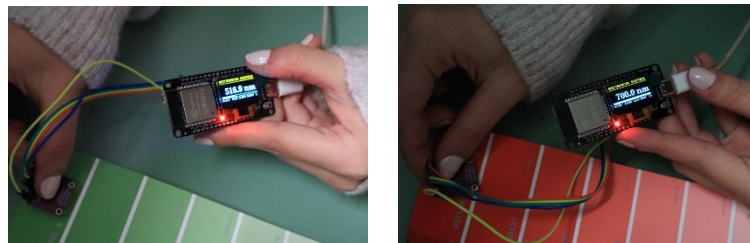


Figura 4: Spettrometro costruito in laboratorio.

Video dell'esperimento spettrometro: <https://drive.google.com/file/d/1GDrZPhC69HZoqNRHvkZt0aebIx5/view?usp=sharing>

7 Conclusioni

Il progetto è nato con l'obiettivo di indagare la natura della luce, passando dall'osservazione dei fenomeni naturali all'applicazione del metodo scientifico. Attraverso questo percorso, abbiamo imparato a formulare indagini, ragionare per modelli, interpretare grafici e confrontare i dati teorici con quelli sperimentali.

Inizialmente abbiamo utilizzato il modello del "raggio di luce" per sperimentare le leggi della riflessione e della rifrazione, determinando gli indici di rifrazione per diversi mezzi trasparenti. Tuttavia, abbiamo riscontrato un limite fondamentale: l'ottica geometrica non permette di associare una grandezza fisica specifica a ogni singolo colore. Questa lacuna ci ha spinto a indagare la natura della luce come moto ondulatorio, tracciando analogie con le onde del mare e quelle acustiche. Con l'esperimento di Young, abbiamo confermato in modo inequivocabile il comportamento ondulatorio della luce attraverso il fenomeno dell'interferenza. Abbiamo compreso che il colore non è una proprietà intrinseca dell'oggetto, ma una 'percezione' legata alla frequenza e alla lunghezza d'onda della radiazione. Se un corpo appare rosso, è perché assorbe gli altri colori e diffonde solo quella specifica lunghezza d'onda; invece quelli che diffondono tutti i colori in ugual misura ci appaiono bianchi, mentre se un corpo assorbe tutte le radiazioni

luminose ci appare nero (assenza di colore). Possiamo dunque concludere che "il colore" non è una proprietà caratteristica del corpo, poiché cambia al cambiare della luce che lo colpisce (proprio come accade in contesti particolari come le luci di una discoteca).

La lunghezza d'onda, dunque, ha rappresentato la vera protagonista del nostro percorso. Attraverso lo studio di questo parametro siamo riusciti a comprendere come i diversi colori che percepiamo siano in realtà il risultato di differenti lunghezze d'onda appartenenti allo spettro visibile. Questo ci ha permesso di collegare concetti fondamentali della fisica ondulatoria a fenomeni che osserviamo quotidianamente, rendendo l'apprendimento più concreto e significativo. Abbiamo progettato una strumentazione che ci permette di interpretare l'esperimento di Young delle doppie fenditure con un uno degli oggetti simbolo della vita moderna: il cellulare. È stato sorprendente scoprire come principi fisici studiati oltre due secoli fa siano alla base del funzionamento di tecnologie che utilizziamo ogni giorno.

In particolare, abbiamo analizzato con attenzione la fotocamera dello smartphone, soffermandoci sul sensore RGB. Questo sensore, suddiviso nei tre canali Rosso, Verde e Blu, sfrutta proprio il principio secondo cui ogni colore corrisponde a una specifica lunghezza d'onda. Ogni immagine che scattiamo è il risultato della combinazione di queste tre componenti fondamentali, che ricostruiscono digitalmente i colori della realtà. Comprendere questo meccanismo ci ha permesso di vedere la tecnologia non più come qualcosa di "magico", ma come l'applicazione diretta di leggi fisiche ben precise.

Il lavoro si è svolto con grande fluidità e collaborazione all'interno del gruppo. Nonostante le difficoltà tecniche iniziali dovute al reperimento delle apparecchiature in laboratorio, abbiamo affrontato questo percorso con entusiasmo, curiosità e spirito critico. In conclusione, questa esperienza non solo ha consolidato le nostre conoscenze sulla natura della luce, ma ci ha anche fatto comprendere quanto la fisica sia profondamente intrecciata con la tecnologia moderna. Studiare la luce non è stato soltanto un esercizio teorico, ma un modo per osservare con occhi nuovi il mondo che ci circonda e gli strumenti che utilizziamo ogni giorno.

A Allegato A: Rifrazione

Obiettivo dell'esperimento: verificare la legge di Snell e determinare l'indice di rifrazione del plexiglass.

Il fenomeno della rifrazione è una proprietà della luce, tale fenomeno avviene quando il raggio luminoso passa da un mezzo ad un altro (aria-acqua, aria-vetro, olio-aria etc...). La verifica sperimentale delle leggi di rifrazione si possono stabilire con apparecchi specifici. L'esperimento può essere eseguito in modo semplice, così come descritto.

A.1 Materiale

- Puntatore laser di colore rosso/verde
- Carta millimetrata
- Semicilindro di plexiglass
- Goniometro (sensibilità di 1°)

- Matita e penne colorate
- Doppio decimetro (sensibilità 1mm)

A.2 Esecuzione:

Su un foglio di carta millimetrata sono stati tracciati due assi cartesiani perpendicolari tra loro, individuando un sistema di riferimento con origine nel punto O.

Il semicilindro di plexiglass è stato posizionato con il centro del diametro coincidente con l'origine O.

La faccia piana del semicilindro è stata allineata con uno degli assi cartesiani.

Il puntatore laser è stato disposto in modo che il raggio incidente colpisce la superficie piana nel punto O.

Mediante un goniometro con sensibilità di 1° . A ciascuna misura è stato associato un errore strumentale pari a $\pm 1^\circ$, trascurando eventuali errori casuali.

L'esperimento è stato ripetuto variando l'angolo di incidenza. Indicando con i l'angolo di incidenza e con r l'angolo di rifrazione, abbiamo ripetuto l'esperimento variando i , di seguito i dati ottenuti:

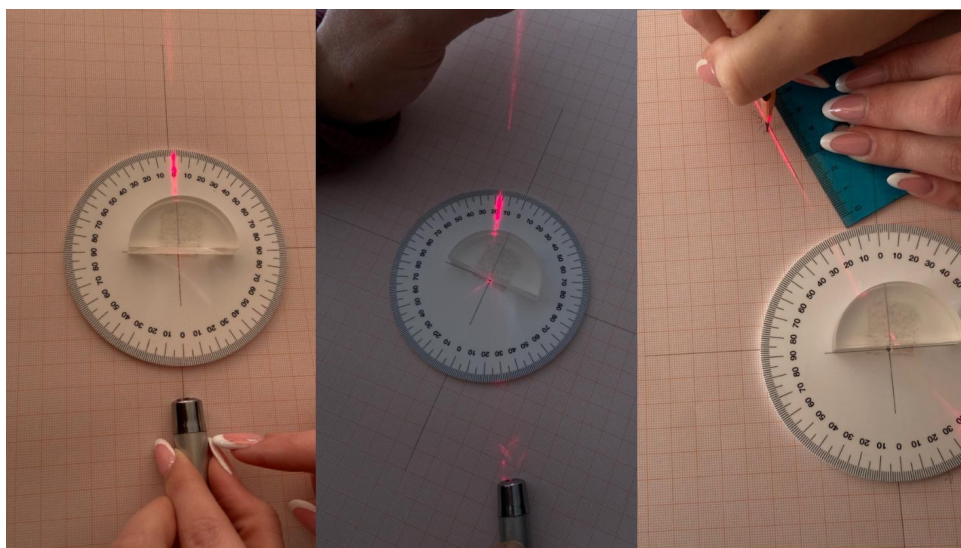


Figura 5: Dati sperimentali ottenuti per la verifica della legge di Snell

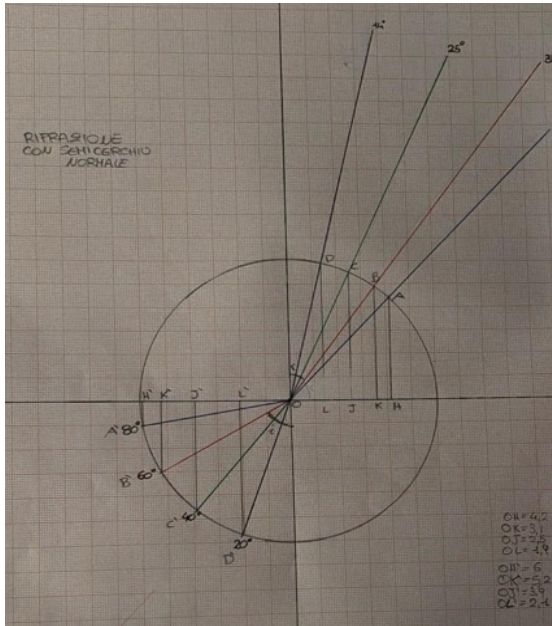


Figura 6: Rappresentazione grafica del fenomeno della rifrazione

Angolo incidente i	Angolo rifratto r
$0^\circ \pm 1^\circ$	$0^\circ \pm 1^\circ$
$20^\circ \pm 1^\circ$	$14^\circ \pm 1^\circ$
$40^\circ \pm 1^\circ$	$25^\circ \pm 1^\circ$
$60^\circ \pm 1^\circ$	$35^\circ \pm 1^\circ$
$80^\circ \pm 1^\circ$	$40^\circ \pm 1^\circ$

Tabella 1: Misure dell'angolo incidente e dell'angolo rifratto

Dall'analisi dei dati sperimentali abbiamo osservato che, all'aumentare dell'angolo di incidenza, aumenta anche l'angolo di rifrazione, ma in misura non proporzionale. In particolare, abbiamo verificato che il rapporto tra le grandezze geometriche OH e OK (proporzionali rispettivamente al seno dell'angolo di incidenza e al seno dell'angolo di rifrazione) risulta pressoché costante. I segmenti OH e OK sono rappresentati nel disegno seguente:

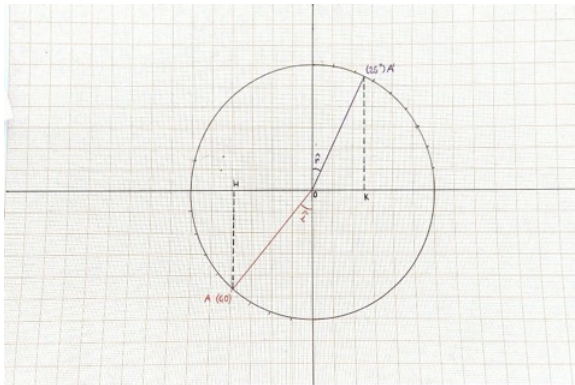


Figura 7: Rappresentazione grafica del fenomeno della rifrazione, nel terzo quadrante raggio incidente e nel primo il raggio rifratto

$(OH \pm \Delta OH)$ cm	$(OK \pm \Delta OK)$ cm	$n = \frac{OH}{OK}$
$5,2 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$	$1,48 \pm 0,05$
$4,5 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$	$1,60 \pm 0,07$
$3,3 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$	$1,57 \pm 0,09$
$1,8 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	$1,50 \pm 0,15$

Tabella 2: Misure dell'angolo incidente e dell'angolo rifratto

Abbiamo calcolato l'errore associato ad "n" con la formula della propagazione degli errori per il quoziente:

$$\Delta n = n \sqrt{\left(\frac{\Delta OH}{OH}\right)^2 + \left(\frac{\Delta OK}{OK}\right)^2} \quad (4)$$

Facendo la media dei valori trovati di OH/OK , abbiamo trovato il valore $n = 1,54 \pm 0,09$. Successivamente abbiamo riportato su un piano cartesiano i valori di OH e OK , come si evince

dalla foto seguente:

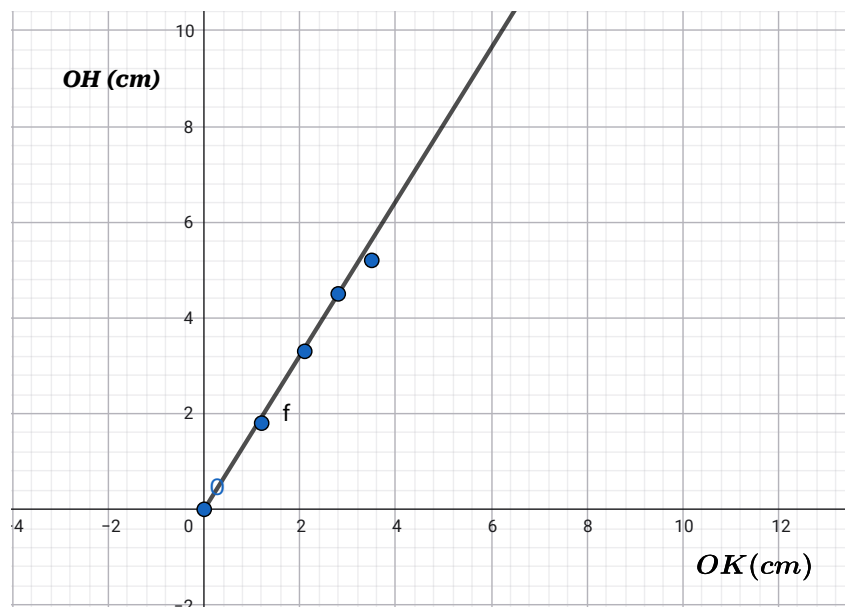


Figura 8: Grafico di OH in funzione di OK del laser rosso

La pendenza della retta tracciata è una costante $n_{1,2}$ viene denominata indice di rifrazione relativo del mezzo 2 rispetto al mezzo 1. Introducendo un indice di rifrazione assoluto come quello relativo al vuoto, per ogni sostanza trasparente è possibile definire un valore, per l'aria è prossimo ad 1, per altre sostanze è sempre maggiore di 1, maggiore è n tanto maggiore è la deviazione subita dal raggio di luce. Il valore di n da noi trovato è in accordo entro gli errori sperimentali al valore teorico dell'indice di rifrazione del plexiglass solitamente compreso tra 1,49 e 1,56. L'esperienza è stata rifatta facendo incidere sul semi cilindro un laser di colore verde.

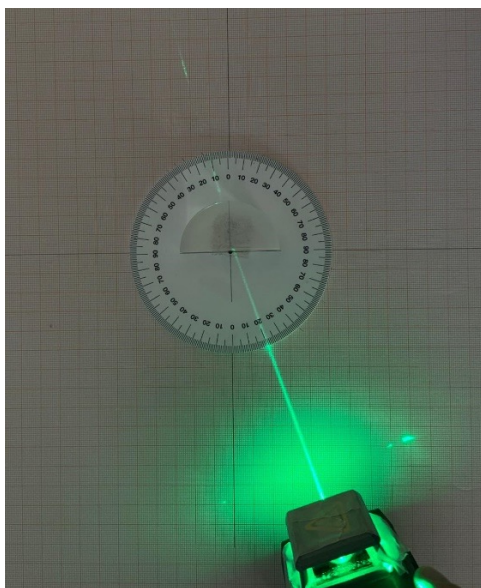


Figura 9: Prima immagine

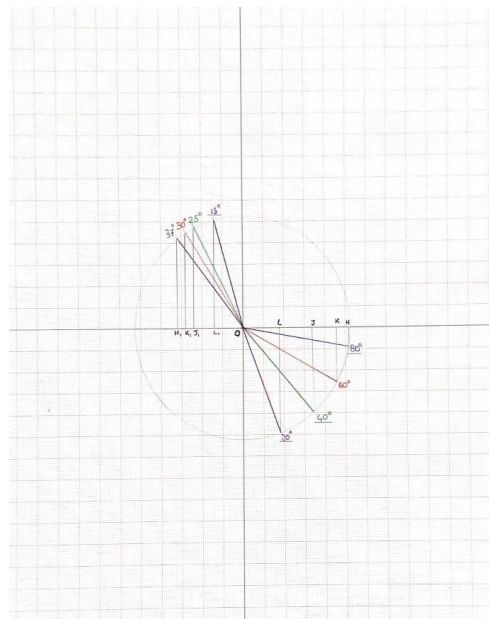


Figura 10: Seconda immagine

Angolo incidente i	Angolo rifratto r
$0^\circ \pm 1^\circ$	$0^\circ \pm 1^\circ$
$20^\circ \pm 1^\circ$	$14^\circ \pm 1^\circ$
$40^\circ \pm 1^\circ$	$25^\circ \pm 1^\circ$
$60^\circ \pm 1^\circ$	$30^\circ \pm 1^\circ$
$80^\circ \pm 1^\circ$	$37^\circ \pm 1^\circ$

(a) Misure degli angoli

$(OH \pm \Delta OH)$ cm	$(OK \pm \Delta OK)$ cm	$n = \frac{OH}{OK}$
$5,2 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$	$1,62 \pm 0,06$
$4,7 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$	$1,68 \pm 0,07$
$3,4 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,1$	$1,48 \pm 0,08$
$1,8 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	$1,64 \pm 0,17$

(b) Calcolo dell'indice di rifrazione

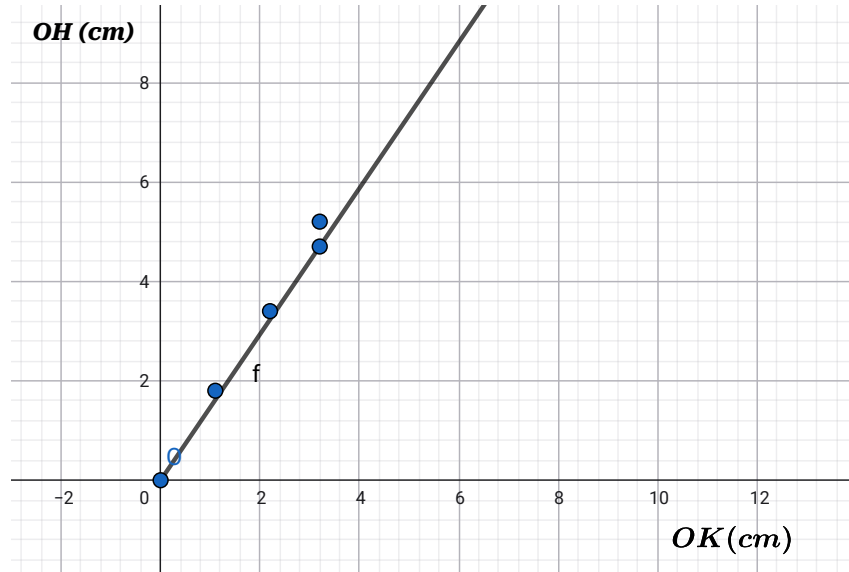


Figura 12: Grafico di OH in funzione di OK per il laser verde

Cosa abbiamo notato: Notiamo che facendo un confronto con le misure precedenti fatte usate un laser rosso, l'indice di rifrazione è leggermente diverso:

$$n_{rosso} = 1,54 \pm 0,09 < n_{verde} = 1,60 \pm 0,10$$

Si nota come l'angolo di rifrazione del laser verde è leggermente inferiore all'angolo di rifrazione ottenuto facendo incidere il semicilindro con il laser di colore rosso.

B Allegato B: Esperimento di Young

L'obiettivo dell'esperimento è osservare direttamente il fenomeno dell'interferenza luminosa, verificare sperimentalmente la natura ondulatoria della luce e determinare la lunghezza d'onda di una luce monocromatica secondo la relazione vista nella tesina:

$$\lambda = \frac{a \cdot d}{D} \quad (5)$$

B.1 Materiale

- Sorgente di luce monocromatica (laser di colore rosso e verde)

- Diapositiva con due fenditure parallele
- Carta millimetrata
- Schermo su cui si rifrange
- Rullina (sensibilità 1mm)
- Vetrino da laboratorio
- Candela
- Micrometro

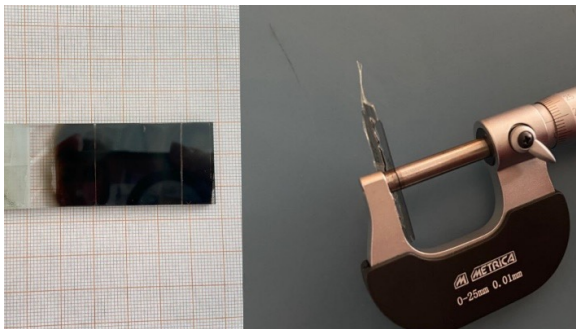


Figura 13: Apparato sperimentale per l'esperimento di Young

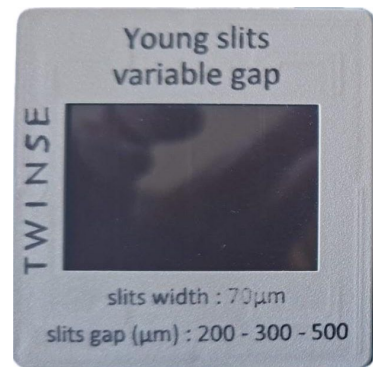


Figura 14: Figura di interferenza ottenuta con il laser rosso

B.2 Esecuzione

Per l'apparato sperimentale è stato utilizzato un laser a luce rossa montato su un treppiede. Il fascio luminoso è stato orientato verso una diapositiva contenente delle fenditure. La procedura eseguita è stata la seguente:

- Il laser è stato posizionato frontalmente alla diapositiva in modo che il fascio attraversasse una coppia di fenditure, di cui è nota la larghezza (a)
- La figura di interferenza risultante è stata proiettata sulla parete del laboratorio, posta ad una distanza (D)
- Per misurare la distanza tra i massimi di interferenza (frange luminose) è stata utilizzata della carta millimetrata fissata alla parete
- E' stata quindi misurata la distanza tra il centro della frangia centrale e il centro della frangia immediatamente successiva (d)



Figura 15: Immagine dell'apparato sperimentale per l'esperimento di Young

B.3 Raccolta Dati

In base alla procedura di calcolo degli errori menzionata precedentemente:

D (m)	d (m)	a (m)	λ (m)
$2,80 \pm 0,05$	$300 \cdot 10^{-6}$	$(6 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(640 \pm 118) \cdot 10^{-9}$
$2,80 \pm 0,05$	$500 \cdot 10^{-6}$	$(4 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(714 \pm 191) \cdot 10^{-9}$
$2,80 \pm 0,05$	$200 \cdot 10^{-6}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(600 \pm 211) \cdot 10^{-9}$

Tabella 3: Determinazione sperimentale della lunghezza d'onda λ (laser rosso)

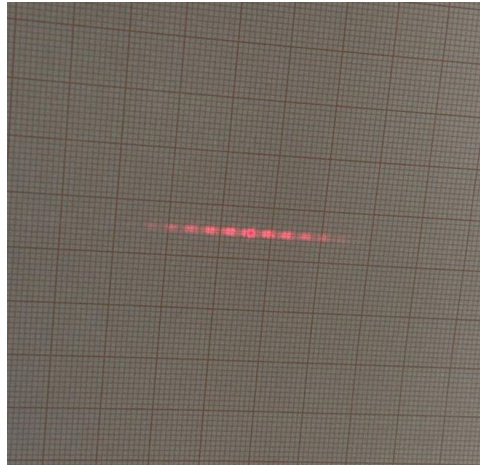


Figura 16: Figura di interferenza ottenuta con il laser rosso

La distanza D è stata rilevata con una rullina metrica con sensibilità di 1 cm. Tuttavia, considerando che la misura non potrebbe essere accurata a causa di fattori esterni, come eventuale flessione del nastro o un posizionamento non perfettamente non perpendicolare alla parete si è scelto di associare a questa grandezza un errore di 5 cm. Per quanto riguarda l'incertezza sulle fenditure (d), sulla diapositiva non sono riportate indicazioni specifiche da parte della casa costruttrice circa la tolleranza delle misure. Tuttavia l'errore lo abbiamo ritenuto trascurabile,

in quanto molto inferiore rispetto alle altre grandezze misurate nell'esperimento. La distanza tra le frange luminose (a) è stata ottenuta mediante una misura diretta su carta millimetrata, di conseguenza l'errore di misura è di 1 mm. Le misure riportate nell'ultima riga, come si può notare, si discostano dagli altri due valori probabilmente perché le fenditure sono state realizzate da noi in modo artigianale. Abbiamo annerito un vetrino da laboratorio con la fuliggine prodotta da una candela, creando così uno sfondo scuro. Successivamente abbiamo fissato due lamette parallele con del nastro adesivo e le abbiamo appoggiate sul vetro annerito, ottenendo due fenditure sottili e ravvicinate. La misura della distanza tra le lamette è stata effettuata con un micrometro, ottenendo un valore di 2 mm. Calcolando la media aritmetica dei valori di λ e degli errori ad essa associata otteniamo:

$$\lambda = (651 \pm 173) \cdot 10^{-9} m \quad (6)$$

Si è scelto di associare a tale misura l'errore medio derivante dalla propagazione delle incertezze sugli strumenti che è più grande della semidispersione massima. Il valore trovato è in accordo con quelli ritrovati in letteratura. Le misure sono state effettuate anche con un laser di colore verde, di seguito la tabella con le misure effettuate

D (m)	d (m)	a (m)	λ (m)
$2,80 \pm 0,05$	$300 \cdot 10^{-6}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(535 \pm 188) \cdot 10^{-9}$
$2,80 \pm 0,05$	$500 \cdot 10^{-6}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(535 \pm 117) \cdot 10^{-9}$
$2,80 \pm 0,05$	$200 \cdot 10^{-6}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(428 \pm 150) \cdot 10^{-9}$

Tabella 4: Determinazione sperimentale della lunghezza d'onda λ



Figura 17: Figura di interferenza ottenuta con il laser verde

Calcolando la media aritmetica dei valori di λ e degli errori ad essa associata otteniamo:

$$\lambda = (499 \pm 171) \cdot 10^{-9} m \quad (7)$$

Anche questo valore considerando l'incertezza è compatibile con i laser di colore verde. Anche in questo caso, l'ultima misura si discosta dalle altre, la nostra giustificazione sta nel fatto che

la fenditura è stata fatta in modo artigianale. L'uso del vetrino annerito e inciso introduce necessariamente delle variabili critiche come irregolarità ai bordi o incertezza nella misura di rispetto ad una fenditura calibrata(industriale).

C Allegato C: Spettrometro

Per realizzare concretamente il sensore RGB descritto in precedenza, abbiamo costruito un sistema capace di misurare separatamente le tre componenti fondamentali della luce e di trasformarle in valori numerici. Per eseguire l'esperimento, abbiamo fatto passare un fascio di luce monocromatica attraverso una barriera con due fenditure molto vicine. La luce che attraversa le fenditure si comporta come un'onda, generando due sorgenti coerenti che si sovrappongono nello spazio tra la barriera e lo schermo. Sul lo schermo abbiamo osservato la comparsa di frange luminose e scure alternate, chiamate frange di interferenza.

C.1 Esecuzione

Il sistema è stato realizzato utilizzando una scheda Arduino (Nano o Uno), un LED RGB a anodo o catodo comune, una fotoresistenza, resistenze da $220\ \Omega$ per limitare la corrente nei tre canali del LED e una resistenza da $10\ \text{k}\ \Omega$ per creare un partitore di tensione con la LDR, oltre a una breadboard per il montaggio sperimentale. Il LED RGB e la fotoresistenza sono stati posizionati molto vicini tra loro e orientati verso la superficie da analizzare, in modo che la luce emessa dal LED venga immediatamente riflessa sull'oggetto e captata dal sensore. Dal punto di vista elettrico, i tre pin del LED (rosso, verde e blu) sono stati collegati ai pin PWM di Arduino tramite le rispettive resistenze, così da poter controllare l'accensione di ciascun colore separatamente. La fotoresistenza è stata collegata a un ingresso analogico attraverso un partitore di tensione, permettendo di leggere le variazioni di luce sotto forma di valori numerici. Il funzionamento prevede una fase di calibrazione iniziale: il programma accende un colore alla volta (prima rosso, poi verde, poi blu) e registra il valore analogico restituito dalla fotoresistenza. In questo modo si ottengono tre misurazioni distinte che rappresentano l'intensità della luce riflessa per ciascun canale. Durante la misurazione effettiva, il sistema confronta l'intensità relativa dei tre valori RGB e determina quale componente è predominante, identificando così il colore osservato. Nella cartella di consegna della relazione, sotto il nome di "Spettrometro.pdf", è presente il codice implementato in linguaggio di programmazione C. Questo codice è stato sviluppato per permettere il funzionamento di uno spettrometro digitale artigianale, uno strumento capace di riconoscere il colore di un oggetto e convertirlo in un valore scientifico espresso come lunghezza d'onda della luce, misurata in nanometri. Il progetto si basa su una scheda di prototipazione elettronica, come Arduino o simili, e utilizza un sensore di colore prodotto da Adafruit Industries, insieme a un display OLED e a LED RGB che svolgono sia la funzione di illuminazione sia quella di visualizzazione del colore rilevato.

All'accensione, il sistema inizializza tutti i componenti elettronici e avvia una breve fase di calibrazione. Sul display compare un messaggio che segnala il controllo del sensore, così da verificare che funzioni correttamente. Nel caso in cui venga rilevata un'anomalia, il programma si blocca automaticamente per evitare misurazioni imprecise. Questa fase iniziale è fondamentale

per garantire l'affidabilità dei dati raccolti.

Una volta completata la calibrazione, il dispositivo entra in un ciclo continuo di funzionamento. A ogni ciclo viene acceso per un breve istante il LED che illumina l'oggetto da analizzare, in modo da ridurre l'influenza della luce esterna. Subito dopo, il sensore misura la quantità di luce rossa, verde e blu riflessa dall'oggetto, insieme alla luminosità complessiva. I valori ottenuti vengono poi normalizzati su una scala standard compresa tra 0 e 255, così da rendere il colore indipendente dall'intensità della luce e quindi confrontabile in modo coerente.

Successivamente il programma esegue un'elaborazione matematica calcolando la cosiddetta tonalità, o Hue, che rappresenta la posizione del colore nello spazio cromatico. Questo passaggio permette di determinare con maggiore precisione a quale zona dello spettro visibile appartenga il colore osservato. La tonalità viene quindi convertita in una lunghezza d'onda approssimativa: si tratta di una stima semplificata, non paragonabile a quella di uno spettrometro professionale, ma efficace in ambito didattico. In questo modo, per esempio, un colore tendente al rosso viene associato a un valore vicino ai 700 nanometri, il verde a circa 530 nanometri e il blu a circa 440 nanometri.

Contemporaneamente, il dispositivo fornisce un riscontro visivo immediato. Il LED RGB si illumina con lo stesso colore rilevato dal sensore, mentre sul display OLED viene mostrato in evidenza il valore numerico della lunghezza d'onda, accompagnato da una rappresentazione grafica della posizione del colore lungo lo spettro visibile e da alcuni dati tecnici aggiuntivi come i valori RGB, la tonalità e la luminosità.

Nel complesso, questo spettrometro digitale dimostra come sia possibile trasformare una semplice informazione visiva, cioè il colore, in un dato fisico misurabile attraverso l'uso combinato di elettronica, programmazione e principi di fisica della luce. Il progetto rende così concreto il legame tra percezione cromatica e lunghezza d'onda.

Si allega il video del funzionamento dello spettrometro: <https://drive.google.com/file/d/1GDrZPhC69HZoqNRHvkZt0aebIx5JZVDW/view?usp=sharing>

Riferimenti bibliografici

- [1] *Manuale di Fisica (Liceo Scientifico, Ottica)*. Editore sconosciuto, 2010.
- [2] Articoli su sensori gbr e filtri bayer, 2020. Consultabile online.
- [3] Amaldi. *Introduzione alla fisica*. Zanichelli, 1998.
- [4] Bacchelli and Gabrielli. *Capire la fisica*. Clio, Milano, 2003.
- [5] P. Marazzini, V. Pasquali, and C. Signorelli. *Sperimentare fisica*. Zanichelli, Bologna, 1995.
- [6] Isaac Newton. *Opticks*. Royal Society, 1704.
- [7] Parodi, Ostilli, and Mochi. *Fisica in evoluzione, vol. 2*. Zanichelli, 2000.
- [8] PSSC Physics. *Fisica a cura del PSSC*. Zanichelli, Bologna, 1970.
- [9] L. Serra and G. Olivieri. *Fisica in laboratorio*. Poseidonia, Bologna, 2005.
- [10] Hermann von Helmholtz. *Teoria tricromatica*. Teubner, 1852.
- [11] Thomas Young. *Lavori sulla visione*. Società Filosofica Britannica, 1802.
- [12] YouTube. Lezione su ottica e sensori. <https://youtu.be/ujG0mMzCW24?si=xmQtmaRRtfMrUjr6>, 2023.


```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_TCS34725.h>
#include <U8g2lib.h>

// --- PINOUT ---
#define SENSOR_LED_PIN 14
#define RGB_RED        25
#define RGB_GREEN      26
#define RGB_BLUE       27
#define I2C_SDA        21
#define I2C_SCL        22

// --- INIZIALIZZAZIONE ---
U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_F_HW_I2C u8g2(U8G2_R0, U8X8_PIN_NONE);
Adafruit_TCS34725 tcs = Adafruit_TCS34725(TCS34725_INTEGRATIONTIME_50MS,
TCS34725_GAIN_4X);

// Funzione per mappare lo Hue (0-360) in Lunghezza d'Onda (nm) in modo
non lineare
float mapFloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float
out_max) {
    return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) +
out_min;
}

float hueToWavelength(float h) {
    if (h >= 0 && h < 60)          return mapFloat(h, 0, 60, 700.0, 585.0);
    // Rosso -> Arancio/Giallo
    else if (h >= 60 && h < 120)    return mapFloat(h, 60, 120, 585.0,
530.0); // Giallo -> Verde
    else if (h >= 120 && h < 180)   return mapFloat(h, 120, 180, 530.0,
490.0); // Verde -> Ciano
    else if (h >= 180 && h < 240)   return mapFloat(h, 180, 240, 490.0,
440.0); // Ciano -> Blu
    else if (h >= 240 && h < 330)   return mapFloat(h, 240, 330, 440.0,
400.0); // Blu -> Violetto
    else return 700.0;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(SENSOR_LED_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(SENSOR_LED_PIN, LOW);

    Wire.begin(I2C_SDA, I2C_SCL);
    u8g2.setI2CAddress(0x3C * 2);
    u8g2.begin();

    // Schermata caricamento
    u8g2.clearBuffer();
    u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tr);
    u8g2.drawStr(10, 30, "Calibrazione TCS...");
    u8g2.sendBuffer();

    if (tcs.begin()) {
        Serial.println("Sensore TCS34725 OK");
    } else {
        Serial.println("Errore Sensore!");
        u8g2.drawStr(10, 50, "ERRORE SENSORE!");
    }
}

```

```

    u8g2.sendBuffer();
    while(1);
}

// PWM LED RGB
ledcAttach(RGB_RED, 5000, 8);
ledcAttach(RGB_GREEN, 5000, 8);
ledcAttach(RGB_BLUE, 5000, 8);

delay(500);
}

void loop() {
    // 1. Lettura Sensore (Accendo il LED solo durante la lettura)
    digitalWrite(SENSOR_LED_PIN, HIGH);
    delay(60); // Attesa per integrazione sensore
    uint16_t r, g, b, c;
    tcs.getRawData(&r, &g, &b, &c);
    digitalWrite(SENSOR_LED_PIN, LOW);

    if (c == 0) return;

    // 2. Calcolo dei canali RGB normalizzati (0-255)
    // Usiamo float per mantenere la precisione durante i calcoli
    float rf = (float)r / (float)c * 255.0;
    float gf = (float)g / (float)c * 255.0;
    float bf = (float)b / (float)c * 255.0;

    // 3. Calcolo HUE (Algoritmo standard RGB to HSV)
    float maxV = max(max(rf, gf), bf);
    float minV = min(min(rf, gf), bf);
    float diff = maxV - minV;
    float hue = 0;

    if (diff > 0) {
        if (maxV == rf) hue = 60.0 * fmod(((gf - bf) / diff), 6.0);
        else if (maxV == gf) hue = 60.0 * (((bf - rf) / diff) + 2.0);
        else if (maxV == bf) hue = 60.0 * (((rf - gf) / diff) + 4.0);
    }
    if (hue < 0) hue += 360.0;

    // 4. Conversione in Nanometri tramite funzione dedicata
    float wavelength = hueToWavelength(hue);

    // 5. Output LED RGB
    ledcWrite(RGB_RED, (int)rf);
    ledcWrite(RGB_GREEN, (int)gf);
    ledcWrite(RGB_BLUE, (int)bf);

    // 6. Aggiornamento Display OLED
    u8g2.clearBuffer();

    u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tr);
    u8g2.drawStr(0, 8, "SPETTROMETRO DIGITALE");
    u8g2.drawHLine(0, 11, 128);

    // Valore NM in grande
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB18_tr);
    u8g2.setCursor(15, 42);
    //u8g2.print(wavelength);

```

```
u8g2.printf("%.1f nm", wavelength);
//u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tr);
//u8g2.print(" nm");

// Barra grafica del colore
u8g2.drawFrame(0, 48, 128, 6);
int barWidth = map(wavelength, 400, 700, 0, 128);
u8g2.drawBox(0, 49, barWidth, 4);

// Dati tecnici piccoli in basso
u8g2.setFont(u8g2_font_5x7_tr);
u8g2.setCursor(0, 62);
u8g2.printf("H:%.0f  R:%d G:%d B:%d  L:%d", hue, (int)rf, (int)gf,
(int)bf, c);

u8g2.sendBuffer();

delay(5000);
}
```