



VEDERE L'INVISIBILE

Lo sguardo dello scienziato dentro le cose.

Firenze, 18-19 aprile 2024

MENZIONE D'ONORE
SEZIONE TESINE BIENNIO

«Riflettiamo» sulla luce nel visibile per vedere l'invisibile

Studenti

Ermoli Vittorio – Kubiak Hubert

Classe 1K

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo Scientifico Istituto Marcelline Tommaseo

Milano

Docente Coordinatore

Lazzati Angela

Chiarezza nell'esposizione e nello sviluppo del percorso, anche se si tratta del normale percorso svolto nel corso di fisica. Gli esperimenti, qualitativi, sono ben condotti e ben descritti; apprezzabile la scelta di verificare le leggi dell'ottica geometrica in due applicazioni particolari come i catarifrangenti e le fibre ottiche. Con le simulazioni, eseguite col software Phet Colorado, gli studenti arrivano alla verifica quantitativa, chiara e ordinata.

Relazione Scienza Firenze 2024: “Vedere l’invisibile. Lo sguardo dello scienziato dentro le cose”

“RIFLETTIAMO” SULLA LUCE NEL VISIBILE PER VEDERE L’INVISIBILE

Sezione Biennio

Il tema del Convegno di quest’anno si presta a interpretazioni sul significato delle parole usate ed in particolare sul verbo “vedere” che può assumere significati diversi a seconda dei contesti. E’ interessante notare che, nel sottotitolo, si richiami l’attenzione sullo “sguardo” dello scienziato come a suggerire che esso sia particolare rispetto ad altri sguardi.

In questo lavoro si è cercato di sviluppare questi spunti ed anche ci si è soffermati sulla parola “riflettere”, intesa nei suoi due diversi significati che assume in campo dell’ottica e del linguaggio comune.

Gli studenti coinvolti in questo lavoro sono di prima liceo scientifico, quindi all’inizio del loro percorso di studio della Fisica. Per loro è una materia nuova, per la quale è importante percepire la stretta e reciproca relazione tra teoria e esperimenti, tra osservazione, misure, analisi dati ed individuazione di leggi, dove la parola “vedere” può essere utilizzata in diversi modi a seconda dei casi.

Questo progetto si inserisce nello studio dell’ottica geometrica, limitatamente alle leggi della riflessione/rifrazione. Si è proceduto parallelamente nello studio teorico e nell’osservazione sperimentale, anche se nella tesina si è preferito concentrare la teoria nei primi due capitoli e gli esperimenti qualitativi e le misure effettuate nei successivi.

Si è cercato di stimolare la “riflessione” degli studenti sulle conoscenze di base, su come funziona il mondo del “visibile” così come è comunemente inteso ed infine su come funziona lo sguardo dello scienziato nel “vedere” le leggi che descrivono i fenomeni.

Ed è proprio sfruttando opportunamente tali leggi che si creano i presupposti per riuscire a vedere anche “l’invisibile”, che nel nostro caso si riferisce a oggetti opachi nel buio, grazie ai catarifrangenti, o a corpi non raggiungibili con un percorso rettilineo di un raggio luminoso, ma grazie alle fibre ottiche.

Questo progetto ha rappresentato per gli studenti un’ottima occasione di approccio al *metodo sperimentale* ed è stato accolto e sviluppato con entusiasmo, partecipazione e collaborazione. Il lavoro di stesura della tesina ha rappresentato la parte più impegnativa anche in termini di tempo. Da notare che gli studenti non sono di madre lingua italiana.

Il Convegno ScienzaAfirenze resta, a mio parere, un’importante opportunità per i ragazzi di mettersi in gioco, di allargare i loro orizzonti e di rivelare a loro stessi aspetti ancora invisibili.

La referente del progetto

“RIFLETTIAMO” SULLA LUCE NEL VISIBILE PER VEDERE L’INVISIBILE

Abstract

In questo lavoro presentiamo il percorso di conoscenza, sperimentazione e analisi che abbiamo compiuto in ambito di ottica geometrica, ossia limitatamente ad alcuni fenomeni riguardanti “la luce” nell’approssimazione della sua propagazione rettilinea, avendo cercato di mettere a fuoco il significato fisico di visibile/invisibile.

Siamo partiti chiedendoci cosa fosse la luce e come funzionasse l’apparato visivo negli umani. Poi abbiamo studiato il comportamento della luce nella sua propagazione quando incontra “ostacoli” ed in particolare le leggi della riflessione e rifrazione.

Abbiamo inoltre osservato e verificato, mediante semplici esperimenti, alcuni fenomeni legati alla “visibilità” della luce. Ci siamo infatti chiesti: ma la luce si vede? La luce ci fa vedere il mondo intorno a noi, ma in quali condizioni è possibile osservare un raggio luminoso? E’ possibile “curvare” la luce?

Rispondere a queste domande, che già qualcun altro, molto prima di noi, si era posto, ci ha permesso di conoscere alcuni apparati che sono stati costruiti sfruttando le leggi della “riflessione”, rendendo visibile ciò che non è visibile all’occhio umano, in particolare abbiamo studiato il catarifrangente e la fibra ottica.

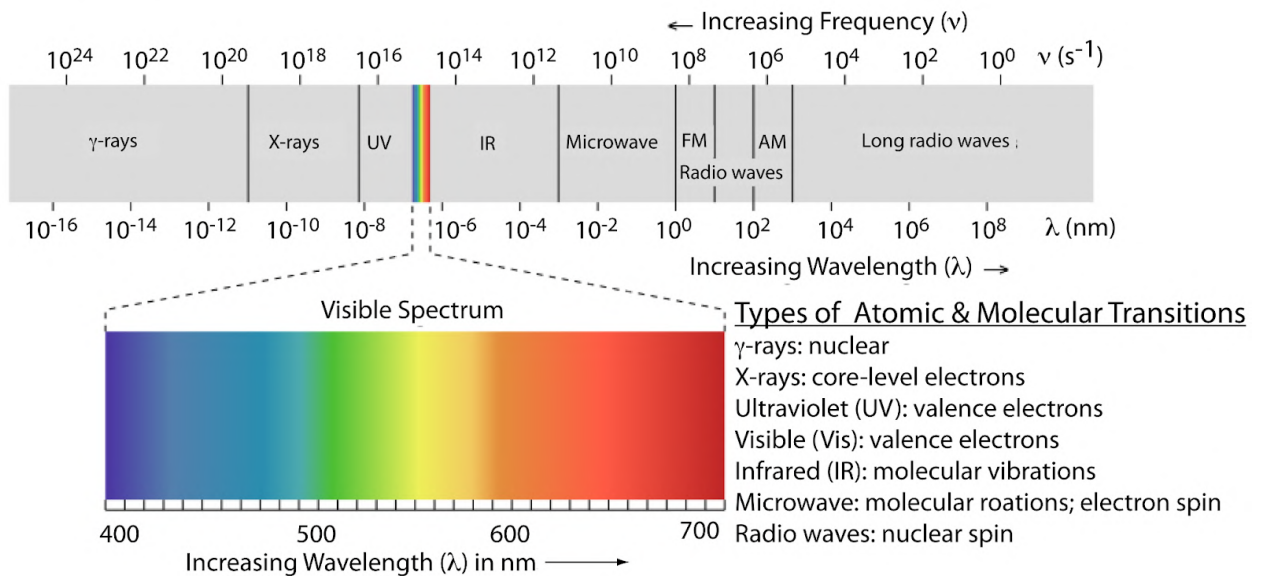
Quindi, “riflettendo” su queste tematiche, abbiamo compreso come anche lo “sguardo” dello scienziato sia fondato sull’osservazione (“occhio”) e sulla conoscenza (“cervello”), sempre mirato a “vedere” le leggi che descrivono i fenomeni osservati. In questo modo è stato possibile, nel corso dei secoli, ampliare di molto lo “spettro del visibile”.

1. Cos’è la luce e come si comporta: assorbimento/ riflessione/ rifrazione

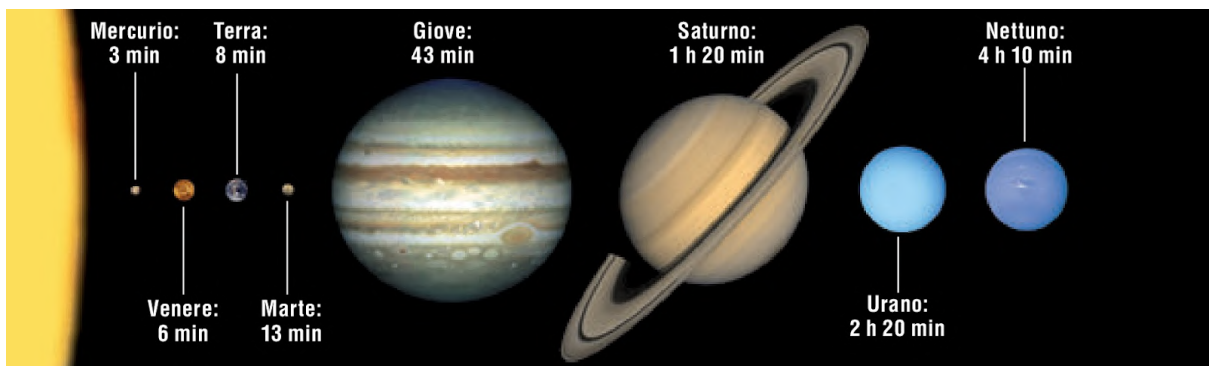
La luce è un tipo di radiazione elettromagnetica che permette all’occhio umano di vedere o meglio rende visibili gli oggetti agli umani. Ma che cos’è una radiazione? Con radiazione si intende il processo di emissione di energia radiante sotto forma di onde. Come possiamo dividere i diversi tipi di radiazione? Ogni tipo di onde differisce dall’altro in base alla frequenza d’onda e all’energia rilasciata. E importante notare che la frequenza (ν) di oscillazione delle onde è direttamente proporzionale alla quantità di energia emessa e inversamente proporzionale alla lunghezza d’onda (λ). Messe in ordine crescente rispetto a λ , come si osserva in figura, l’insieme di queste onde viene chiamato lo spettro elettromagnetico.

In questo spettro e.m. quello che noi chiamiamo “luce” sono l’insieme delle onde “visibili” all’occhio umano, detto appunto intervallo visibile.

Consideriamo in buona approssimazione che la luce si propaghi in linea retta come raggi luminosi. La luce si propaga anche nel vuoto, viaggiando a una velocità di circa $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.



Nella seguente immagine, non in scala, sono riportati i tempi impiegati dalla luce emessa dal sole a raggiungere i pianeti del sistema solare.

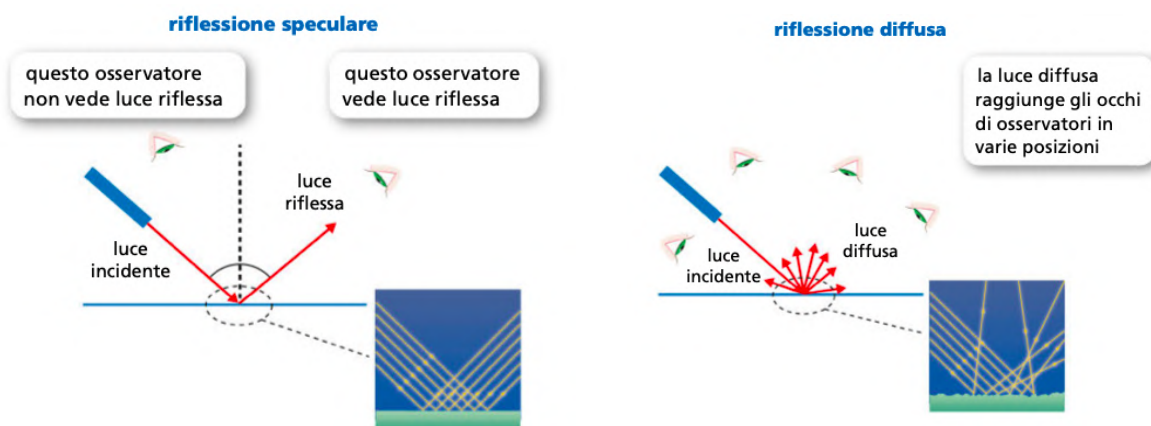


Quando la luce si propaga in un mezzo, invece che nel vuoto, cede parte della sua energia secondo un fenomeno che si chiama **“assorbimento”**, in base al quale le sostanze vengono distinte fra **“opache”** o **“trasparenti”** alla luce.

Quando invece la luce incontra una superficie di un corpo viene **“riflessa”**, ossia in pratica **“rimbalza”** sulla superficie con un angolo di riflessione congruente all’angolo di incidenza. Gli angoli sono formati dal raggio luminoso e dalla normale alla superficie nel punto di incidenza. (Legge di riflessione su superficie piana)

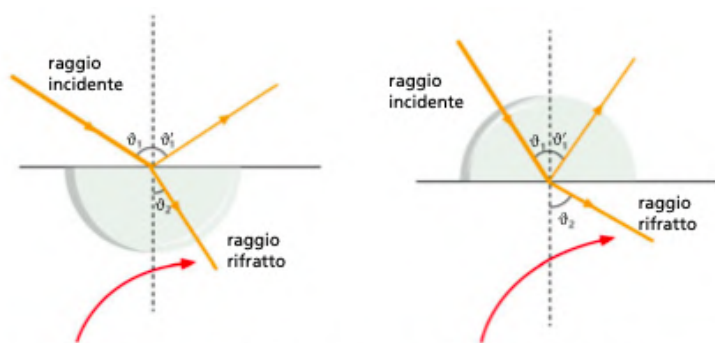
Se la superficie è liscia un fascio incidente di raggi paralleli rimane tale anche dopo la riflessione (riflessione speculare) ed è quindi visibile in una sola direzione.

Se invece la superficie è irregolare il fascio incidente viene **“diffuso”** dopo la riflessione in tutte le direzioni, raggiungendo gli occhi di osservatori in varie posizioni, come mostrato nelle due figure seguenti:



Quindi la luce che arriva ai nostri occhi proviene o da “sorgenti luminose” (sole, stelle, lampade, fuoco, schermi luminosi ...) o da corpi opachi illuminati che riflettono o diffondono la luce in tutte le direzioni.

Il fenomeno che rende visibile gli oggetti intorno a noi è proprio quello della riflessione diffusa. Infatti “vediamo” un oggetto solo se da ogni suo punto rimanda all’occhio un po’ di luce, come schematizzato nella figura a fianco:



Se $n_1 < n_2$, allora $\theta_2 < \theta_1$: passando da un mezzo otticamente meno denso a uno più denso, il raggio si avvicina alla normale.

Se $n_1 > n_2$, allora $\theta_2 > \theta_1$: passando da un mezzo otticamente più denso a uno meno denso, il raggio si allontana dalla normale.

Infine quando un raggio di luce incontra una superficie di separazione fra due mezzi (aria/acqua, aria/vetro vetro/acqua,) modifica la sua velocità e la sua direzione di propagazione. Tale fenomeno illustrato schematicamente nelle figure a fianco, viene detto di “rifrazione” ed è descritto dalla legge di Snell:

Legge di Snell:

$$n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2$$

dove: $n_1 = \frac{c}{v_1}$ e $n_2 = \frac{c}{v_2}$ sono gli indici di rifrazione del mezzo 1, da cui proviene il raggio luminoso e del mezzo 2, dove viene deviato.

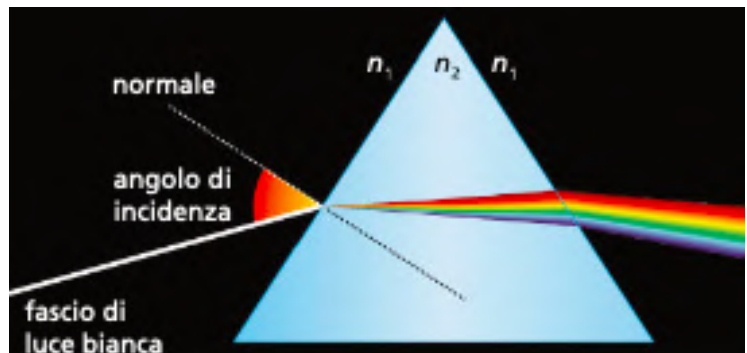
Come si osserva dalla figura, parte della radiazione viene comunque riflessa, in base al potere riflettente della superficie, ed il resto viene rifratto.

Nel caso in cui il raggio luminoso provenga da un mezzo otticamente più denso, ossia con indice di rifrazione maggiore rispetto a quello del secondo mezzo, ($n_1 > n_2$), per esempio dall'acqua all'aria, il raggio rifratto si allontana dalla normale. Solo in questi casi, esiste un angolo limite di incidenza ($\sin \theta_L = \frac{n_2}{n_1}$) oltre il quale il raggio incidente viene completamente riflesso, dando luogo a quello che si chiama fenomeno di "riflessione totale".



E' esperienza di tutti aver osservato questo fenomeno nelle calde giornate estive, quando la strada asfaltata davanti a noi sembra bagnata, come se ci fossero delle pozzanghere. In questi casi si parla di "miraggi", dovuti appunto dalla riflessione totale che subiscono i raggi di luce quando incontrano uno strato di aria più calda (otticamente meno densa), in prossimità dell'asfalto, rispetto a quelli sovrastanti

Bisogna ancora richiamare un altro esempio importante legato al fenomeno della rifrazione e cioè quello della **dispersione** della luce in un **prisma** di vetro. In questo caso si osserva la "dispersione" della luce bianca nelle sue componenti di diversa frequenza e quindi diverso colore. Questo fenomeno è dovuto al fatto che l'indice di rifrazione delle sostanze hanno una lieve dipendenza dalla frequenza dell'onda e.m., quindi dal colore, e quindi, nella doppia rifrazione del prisma di vetro, i diversi colori subiscono una deviazione differente (dal rosso al violetto), come mostrato in figura.



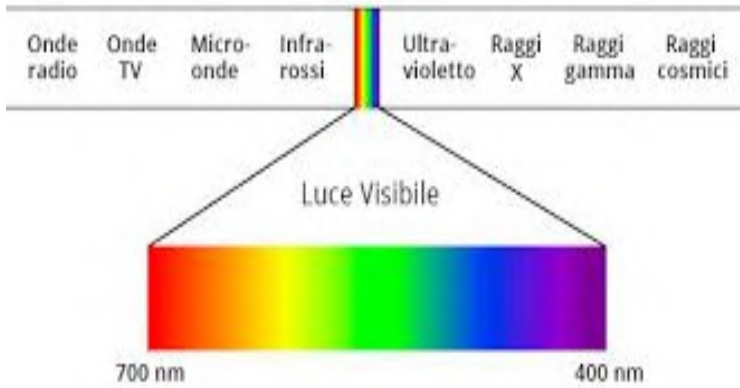
Questo è ciò che si verifica con l'arcobaleno, dove le goccioline di acqua fungono da prisma.

I raggi luminosi generalmente non sono visibili nel loro propagarsi fino a che non colpiscono il nostro occhio.



Nella seguente foto sono visibili i raggi luminosi poiché le particelle di umidità dell'aria diffondono la luce in tutte le direzioni, raggiungendo anche i nostri occhi. Se così non fosse non li vedremmo. Nella medesima immagine è anche visibile la traiettoria rettilinea del raggio luminoso

2. Cosa significa “visibile” e come si “vede”?



Che cos'è “il visibile”? Parlando del “visibile”, come abbiamo già detto, parliamo della parte dello spettro elettromagnetico che noi, gli umani, possiamo vedere e cioè di frequenza compresa tra $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz e $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz . (È una parte molto piccola rispetto all'intero spettro e.m.).

Solamente le onde in questo intervallo sono in grado di attivare i recettori presenti sulla retina che inviano segnali nervosi al cervello, il quale li elabora e costruisce le immagini e i colori che vediamo (dal rosso al violetto).

Gli umani possono vedere il mondo grazie all'apparato visivo, costituito dagli occhi e dal cervello, il cui funzionamento è molto complesso, basti pensare, per esempio, che il nervo ottico trasmette al cervello 400 Mbyte/s di impulsi da elaborare.

In prima approssimazione l'occhio può essere paragonato ad una camera oscura poiché la formazione dell'immagine sulla retina avviene allo stesso modo che sullo schermo della camera.

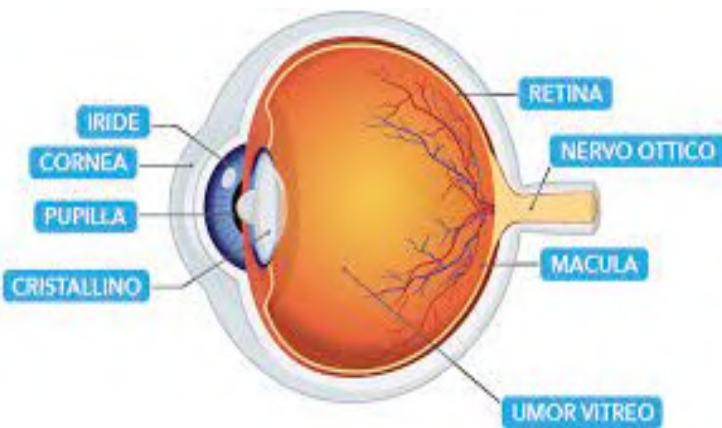
In modo molto semplificato possiamo considerare l'occhio formato dalla cornea, dal cristallino, dall'iride e dalla retina, le cui funzioni possono essere schematizzate così:

La cornea è una sottile membrana la cui funzione è di “concentrare” la luce dall'esterno per farla arrivare sulla retina.

La pupilla è un foro circolare al centro dell'iride che, allargandosi e restringendosi, regola la quantità di luce che entra nell'occhio

Il cristallino è una lente convergente e il suo compito è di mettere a fuoco le immagini vicine e lontane, modificando la sua curvatura.

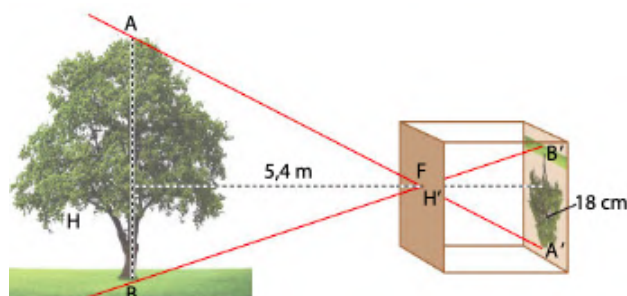
La retina è una membrana costituita da cellule sensibili alla luce, dette “fotorecettori”, che trasformano il segnale luminoso in impulso nervoso.



Oltre alle parti dell'occhio sopracitate, dentro l'occhio c'è anche una sostanza in forma liquida che serve a mantenere la forma dell'occhio, il vitreo.

I raggi luminosi riflessi/diffusi dall'oggetto attraversano cornea, pupilla, cristallino e vitreo e raggiungono infine la retina, dove si generano gli stimoli visivi che tramite il nervo ottico vengono inviati al cervello. L'immagine che arriva al cervello è "capovolta", come quella formata sullo schermo di una camera oscura, ed il compito del cervello è di raddrizzarla.

Per analogia con la camera oscura, vediamo nella figura a fianco come avviene la formazione di un'immagine sulla retina. La "camera oscura" è una scatola/stanza completamente buia con un piccolo foro su uno dei lati, da cui entrano i raggi luminosi, e senza nessuna altra fessura o sorgente di luce interna. Sulla parete opposta al foro si trova lo schermo dove si forma l'immagine capovolta. L'immagine si forma dove i raggi diffusi dall'oggetto, posto davanti al foro fuori la camera, colpiscono lo schermo. Si tratta di un'immagine "reale", formata cioè dagli stessi raggi diffusi dall'oggetto, le cui dimensioni sono proporzionali alla dimensione dell'oggetto, alla sua distanza dal foro ed alla lunghezza della camera.



Il modello di quella camera veniva usata già dai pittori medievali, ed è anche lo stesso utilizzato dall'inventore della macchina fotografica. Il nome "fotocamera" rappresenta il prodotto finale dell'evoluzione della camera oscura. Il foro d'ingresso è il diaframma e l'immagine viene proiettata sui sensori.

3. **I nostri esperimenti:**

In questo paragrafo descriviamo gli esperimenti realizzati da noi, con semplici materiali, per "vedere" quanto studiato sul libro riguardo al "visibile".

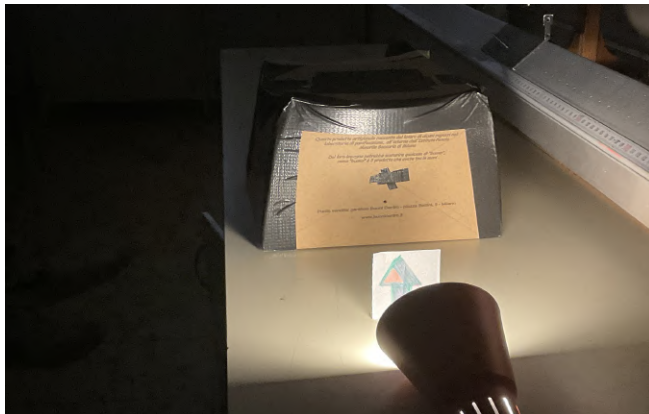
❖ **Camera oscura:**

Obiettivo: osservare come si forma l'immagine sullo schermo di una camera oscura.

Materiale: scatola di cartone, scotch nero, carta da lucido, pennarelli, forbici, punteruolo, lampada

Procedimento: abbiamo preso una scatola di cartone su cui abbiamo fatto un foro su uno dei lati poi abbiamo chiuso con uno scotch tutte le fessure in modo che non entrasse luce dall'esterno se non dal foro. Sul lato opposto del foro abbiamo costruito lo schermo con la carta da lucido.

Abbiamo disegnato una freccia colorata in modo da poter riconoscere alto- basso, destra-sinistra. Dopo averla illuminata con una sorgente di luce bianca, l'abbiamo posta di fronte al foro, ad una distanza tale da vedere, a fuoco, l'immagine sullo schermo. Come si vede dalle due foto, i raggi luminosi entrando dal foro costruiscono l'immagine capovolta sullo schermo.

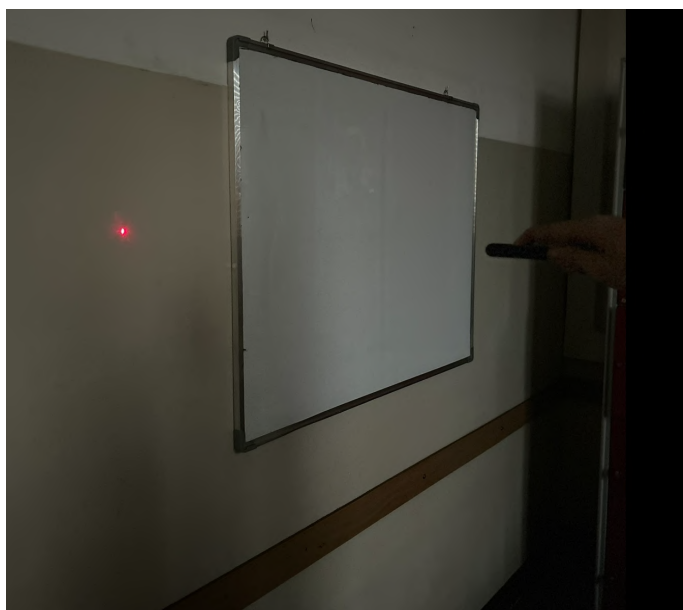


❖ **Rendere visibile la luce**

Obiettivo: osservare un raggio luminoso

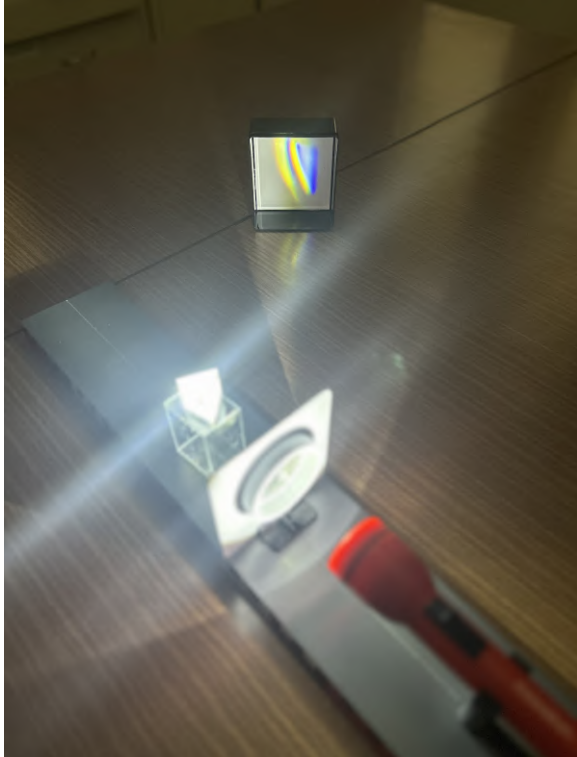
Materiale: borotalco e puntatore laser

Procedimento: abbiamo proiettato sulla parete della nostra classe semibuia il raggio laser (rosso) e abbiamo osservato cosa si vedesse. Abbiamo sperimentato la visibilità del raggio luminoso. Come si può vedere dalla foto di sinistra il raggio laser non è visibile se non quando incide sul muro. Nella foto di destra invece, il raggio laser è visibile grazie al fenomeno di diffusione delle particelle di borotalco che abbiamo sparso dall'alto sul raggio luminoso.



❖ **Il prisma di dispersione e i colori dell'arcobaleno**

Obiettivo: osservare la “suddivisione” della luce bianca nello spettro dei colori visibili attraverso il fenomeno della doppia rifrazione del prisma.



Materiali: la torcia, lente convergente, supporto su cui montare l'apparato, prisma a dispersione di vetro, schermo bianco.

Procedimento: fissare sulla base di plastica la torcia, la lente convergente, il prisma. Orientare il prisma in modo che il fascio incida su una delle sue facce oblique e, a seguito della doppia rifrazione aria/vetro - vetro/aria, colpisca lo schermo dove osservare i colori dello spettro.

Conclusione: sullo schermo a destra del prisma, sono visibili i diversi colori dal rosso al violetto (che risulta aver subito una maggiore deviazione) in cui risulta costituita la luce bianca della torcia.

❖ Catarifrangente: riflessione doppia di specchi piani

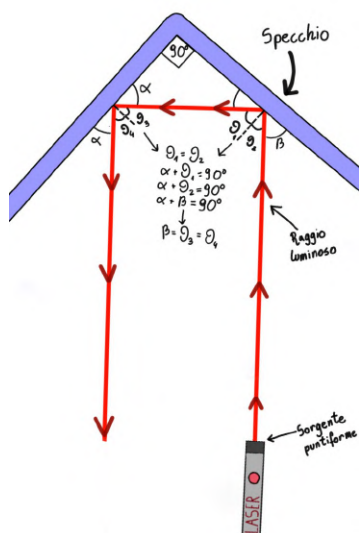


Obiettivo: Verificare il modo in cui funzionano i catarifrangenti;

Materiali: specchi piani, il laser, la base per sistemare gli specchi , borotalco

Procedimento: sistemare due specchi piani, in modo che aderiscano l'uno all'altro formando un angolo di 90 gradi. Puntare il laser in modo che la luce arrivi sulla superficie dello specchio. Spargendo il borotalco dall'alto, per effetto della diffusione delle particelle sospese, osservare la propagazione del raggio incidente e riflesso.

Conclusione: Si può vedere che il raggio laser incidente, per effetto di una doppia riflessione sui due



specchi, in base alle leggi di riflessione di specchi piani, torna indietro alla sorgente, nella stessa direzione. Questa situazione si verifica indipendentemente dall'angolo di incidenza del laser sullo specchio, purché i due specchietti formino un angolo di 90° .

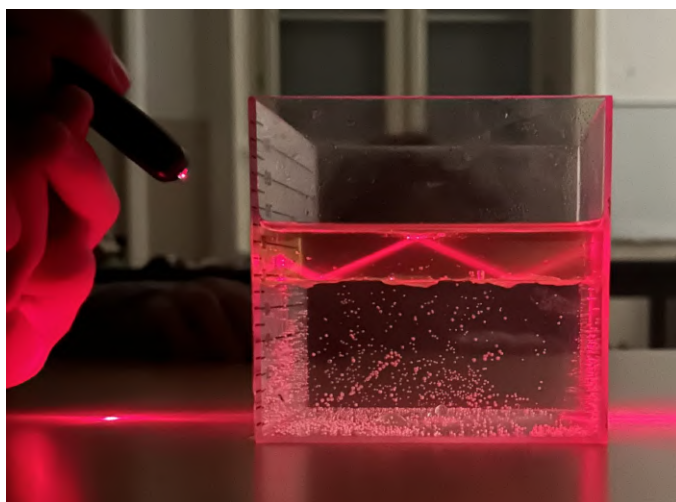
Il catarifrangente viene molto utilizzato in tutte le situazioni in cui bisogna rendere visibile nel buio un corpo opaco, illuminato da fanali e/o altre sorgenti luminose. Per esempio viene applicato nei mezzi di trasporto o nella segnaletica stradale per motivi di sicurezza.

La caratteristica del catarifrangente è di riflettere a 180 gradi la luce incidente che quindi torna indietro, parallelamente, verso la sorgente luminosa iniziale, incontrando l'occhio di chi l'ha emessa. Sul disegno viene rappresentato il catarifrangente dall'alto.

❖ Riflessione totale di un raggio luminoso

Obiettivo: osservare il fenomeno della riflessione totale.

Materiale: acqua, olio dei semi, contenitore in forma cubica, borotalco, laser



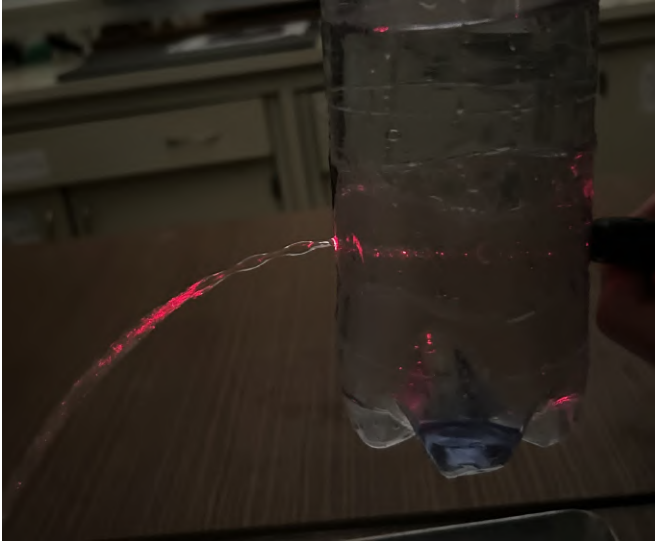
Procedimento: Versare nel contenitore dell'acqua e poi sopra uno strato di 2-3 centimetri di olio. Mettere il contenitore in un locale al buio. Accendere il laser e trovare l'angolo in cui il laser passa per lo strato d'olio e rimbalza creando uno "zig-zag" nell'olio. Dopo aver trovato l'angolazione giusta, spargere il talco alla traiettoria dell'uscita del contenitore, in modo da poter osservare la luce che esce dall'olio.

Conclusione: come è ben visibile dalla fotografia realizzata da noi in classe, sapendo che l'indice di rifrazione dell'olio

(1,47) è maggiore di quello dell'acqua (1,33) si verifica il fenomeno della riflessione totale, poiché l'angolo di incidenza supera l'angolo limite. Tale fenomeno si osserva solamente puntando il laser nell'olio e per angoli d'incidenza maggiori dell'angolo limite.

La luce rimane "intrappolata" nello strato di olio trasportando tutta la sua energia. Questo principio è alla base del funzionamento delle fibre ottiche.

❖ Curvare la luce in un getto d'acqua



Obiettivo: osservare la curvatura di un raggio luminoso

Materiali: laser, bottiglia di plastica, acqua

Procedimento: bucare la bottiglia d'acqua circa metà altezza. Riempire la bottiglia, chiudere il tappo in modo che non esca acqua dal foro. Spegnerle le luci e puntare il laser, parallelamente al tavolo e all'altezza del foro, da dietro la bottiglia. Svitare il tappo e osservare che il raggio di luce seguirà il getto d'acqua, che risulta quindi illuminato.

Conclusione: Come si può vedere nella foto a fianco, realizzata da noi in classe, la traiettoria del raggio laser appare "curvata" in uscita dalla bottiglia. Questo è dovuto al fatto

che avviene una riflessione totale del raggio luminoso all'interno del getto d'acqua. Non è semplice trovare l'inclinazione giusta del raggio incidente affinché si verifichi questa condizione. Anche questo è quello che succede nelle fibre ottiche.



Una fibra ottica funziona come se fosse uno "specchio tubolare" dove il raggio luminoso rimane "intrappolato", per riflessione totale, per tutta la sua lunghezza, senza alcuna dispersione di energia luminosa. Le fibre ottiche sono composte da un nucleo cilindrico generalmente di fibra di

vetro o plastica, molto pura, e da un mantello avente indice di rifrazione minore a quella del nucleo. Il tutto è avvolto da una copertura che protegge dagli sbalzi termici e di umidità.

Le fibre ottiche nel mondo moderno vengono utilizzate nella medicina per scopi "ottici" ossia per illuminare e "vedere" apparati altrimenti non raggiungibili dalla vista (es: apparato respiratorio, digerente...) o nella telecomunicazione, per trasportare "energia" cioè informazione.

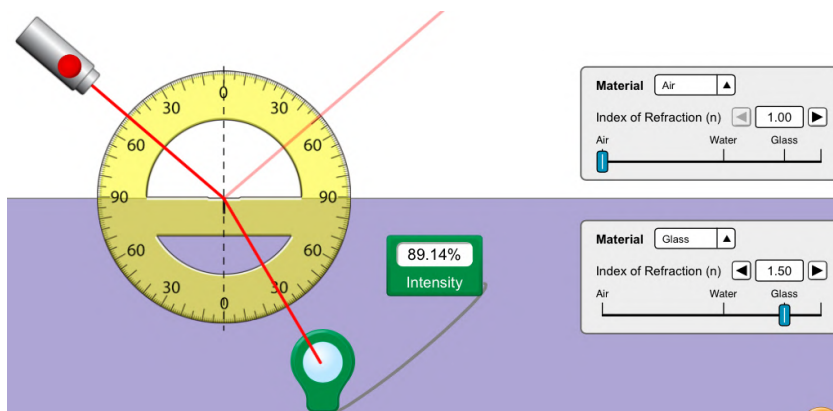
Il primo uso delle fibre ottiche è stato nella medicina - un gastroscopio - brevettato da Hirschowitz, Peters e Curtiss nel 1956. Invece Maurer, Keck, Schulz e Zimar nel 1970 hanno applicato le fibre ottiche nella telecomunicazione.

4. Lo “sguardo” dello scienziato: “vedere” le leggi che descrivono i fenomeni

Infine, utilizzando la simulazione Phet Colorado, abbiamo sperimentato diverse situazioni di riflessione/ rifrazione in modo da “vedere” quanto studiato sul libro.

Abbiamo inoltre effettuato una serie di misure degli angoli di incidenza/ rifrazione con lo scopo di verificare/ricavare la legge di Snell, ovvero determinare la relazione di proporzionalità diretta tra $\text{SEN}(\alpha)$ e $\text{SEN}(\beta)$

Come mostrato nelle seguenti figure, la simulazione Phet Colorado fornisce una sorgente laser, un goniometro, uno strumento per misurare l'intensità del raggio riflesso/rifratto (valore %), la possibilità di scelta dei mezzi a contatto con relativi indici di rifrazione. La sorgente di luce può essere inclinata a piacere rispetto alla superficie di separazione dei due mezzi.

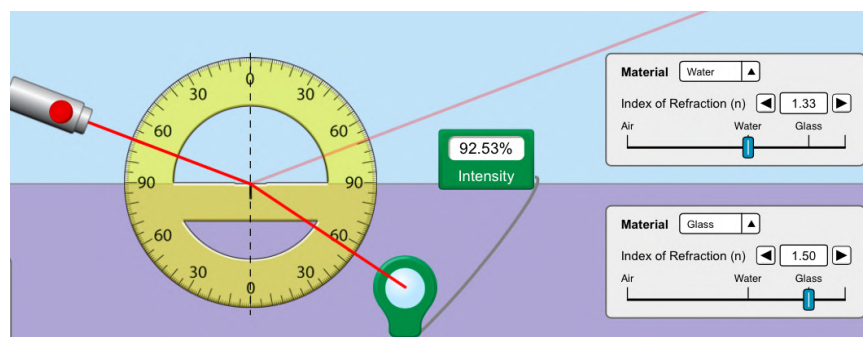


In questa prima figura il raggio incide dall'aria all'acqua, in parte (10,86%) viene riflesso con un angolo congruente all'angolo di incidenza (50°) e la parte restante (89,14%) viene rifratta con un angolo minore di quello di incidenza (30°) essendo $n_1 < n_2$. Il raggio rifratto si avvicina alla normale.

Applicando la legge di Snell otteniamo: $1 \times \text{sen}(50) = 1.5 \times \text{sen}(30)$

Uguaglianza che risulta verificata con un errore di circa il 2% ($0.766=0.750$).

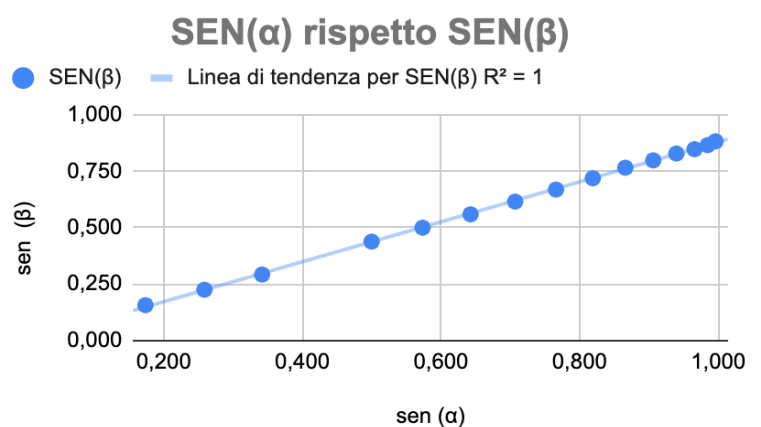
Nelle condizioni di rifrazione acqua/vetro (figura a fianco) sono state effettuate una serie di misure degli angoli di incidenza/rifrazione, i cui valori sono riportati in tabella, con l'incertezza di misura. Come si può vedere il raggio rifratto si avvicina alla normale essendo $n_1 < n_2$.



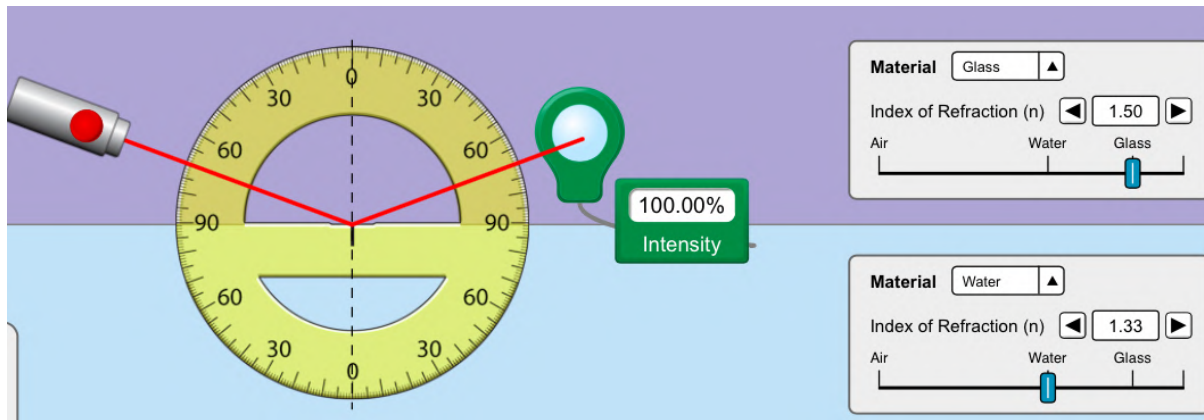
Nelle colonne successive si riporta il seno dei due angoli ed il valore del loro rapporto. Tale valore si mantiene costante, come indicato dalla semidispersione e dall'errore% <3% del suo valore medio ($\text{sen}(\alpha) / \text{sen}(\beta) = 1.140 = \frac{n_2}{n_1}$), confermando la relazione di proporzionalità diretta cercata.

ANGOLO INCIDENZA α (°)	ANGOLO RIFRAZIONE β (°)	Incertezza misura	SEN(α)	SEN(β)	sen(α) / sen(β)
10	9	$\pm 1^\circ$	0,174	0,156	1,110
15	13	1°	0,259	0,225	1,151
20	17	1°	0,342	0,292	1,170
30	26	1°	0,500	0,438	1,141
35	30	1°	0,574	0,500	1,147
40	34	1°	0,643	0,559	1,149
45	38	1°	0,707	0,616	1,149
50	42	1°	0,766	0,669	1,145
55	46	1°	0,819	0,719	1,139
60	50	1°	0,866	0,766	1,131
65	53	1°	0,906	0,799	1,135
70	56	1°	0,940	0,829	1,133
75	58	1°	0,966	0,848	1,139
80	60	1°	0,985	0,866	1,137
85	62	1°	0,996	0,883	1,128
				media	1,140
				semidispersione	0,030
				errore%	2,621

La legge di proporzionalità diretta fra SEN(α) e SEN(β) di Snell è ben "visibile" anche nella rappresentazione grafica a fianco, dove sono stati riportati i valori della tabella. Il grafico è una retta passante per l'origine, con indice di correlazione lineare $R^2=1$.



Nell'ultima immagine è visibile il fenomeno di riflessione totale, verificato fra vetro ($n=1.50$) e acqua ($n=1.33$) con un angolo di incidenza di 70° . La misura di intensità luminosa conferma che non c'è dispersione di energia (100%).



5. Conclusioni

Alla luce di questo percorso sul visibile e l'invisibile riportiamo alcune nostre riflessioni:

Lo sguardo dello scienziato è capace di osservare oltre che di vedere, attraverso non solo gli occhi ma anche grazie a strumenti.

Come avviene nell'apparato visivo, abbiamo individuato una corrispondenza tra vista e conoscenza. Per esempio, la conoscenza rende lo scienziato capace di "vedere" in una tabella di valori o in un grafico una legge fisica, così come il cervello elabora gli impulsi nervosi inviati dall'occhio.

L'osservazione della realtà fa crescere la conoscenza, e la conoscenza amplia il campo del visibile.

lo spettro del visibile è una piccolissima parte dello spettro delle onde e.m. così come il campo del visibile, cioè della realtà alla portata dell'occhio, è poca cosa rispetto a quanto oggi l'uomo riesce a "vedere". Questo gap, nel corso del tempo, è stato via via colmato grazie allo sguardo della scienza.

FONTI:

libro di testo: F.Bocci-G.Malegori- G. Milanesi - Sistema Fisica primo biennio ed. Deascuola /Petrini

Simulazione PhetColorado:

https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_all.html

<https://www.ocularisticaventurino.it/come-funziona-locchio/> ,

[LINK LINK LINK](#) *figure*