

## LA LUCE OGGETTO DI INDAGINE E MEZZO DI STUDIO

di Barbara Chierichetti \*

*In occasione del XII Convegno ScienzaFirenze 2015 l'autore con sette studenti del liceo classico in cui insegna, ha svolto un'attività sperimentale che declina il tema scelto in occasione dell'Anno Internazionale della Luce. L'esperimento è stato poi realizzato, spiegato nei contenuti teorici e discusso nei risultati davanti agli insegnanti e agli studenti presenti al Convegno, anche a scopo esemplificativo. Gli studenti hanno aderito con interesse alla proposta e con serietà hanno svolto le diverse fasi del lavoro sperimentale e della laboriosa presentazione (sempre in orari extrascolastici). Un fatto in netta controtendenza rispetto al luogo comune che al liceo classico lo studio della Fisica è snobbato dagli studenti e ridotto dagli insegnanti a mera informazione. Un esempio inoltre di collaborazione reale e non solo di consultazione, tra mondo liceale e mondo accademico.*

\* Insegnante di Matematica e Fisica al Liceo Classico "Giovanni Berchet" di Milano

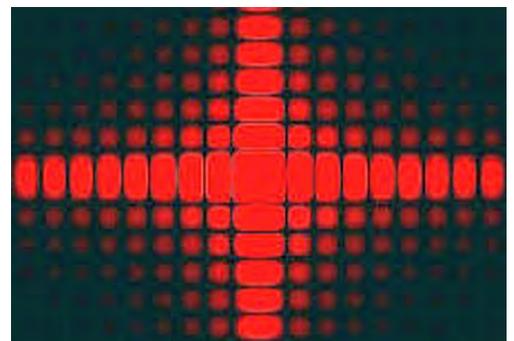
*Gli studenti che hanno partecipato al Convegno sono: Adriano Fazzo e Giacomo Gaffuri (III D), Valentina Casati (IV A), Alessandro Fiora, Federica Zonca e Martina Viggiano (IV F), Camilla Zurru (V G) del Liceo Classico "Giovanni Berchet" di Milano.*

Il 2015 è stato dichiarato Anno Internazionale della Luce e a questo fa riferimento il tema della XII edizione *ScienzaFirenze 2015*.

Il tema *La luce come oggetto di indagine* pone l'accento sull'interesse che il fenomeno *luce* ha esercitato su studiosi di ogni tempo. Domande sul suo comportamento, sulla sua natura e sui meccanismi che ci permettono di vedere e di distinguere ciò che ci circonda si sono presentate e intrecciate con accenti diversi durante tutta la storia. Di ciò si hanno testimonianze fin dal V secolo a.C. con i filosofi greci tra i quali Leucippo da Mileto, Democrito, senza dimenticare il contributo fondamentale di Euclide di Alessandria (III secolo a.C.) che fornì, insieme a Erone Alessandrino (I sec. a.C.), il primo nucleo di leggi secondo il modello della propagazione rettilinea della luce.

Lungo questa linea di ricerca, in un particolare periodo della storia che parte dalla seconda metà del Seicento, l'interesse sulla luce si focalizzò sul problema della sua natura, argomento sul quale si era acceso un dibattito che divideva il mondo dei filosofi della Natura in due fazioni: una sosteneva che la natura della luce fosse corpuscolare, ovvero che la luce fosse costituita da uno sciame di corpuscoli di varia massa che obbedivano alle leggi della dinamica, come ipotizzato da Isaac Newton (1642 – 1727). L'altra ne affermava il carattere ondulatorio secondo il modello di Christiaan Huygens (1629 – 1695) che considerava la luce come una perturbazione ondulatoria di un qualche mezzo materiale che pervade i corpi trasparenti e l'intero spazio. Questo dibattito sulla natura della luce si protrasse per più di un secolo e terminò solo dopo gli inizi del XIX secolo quando gli esperimenti di Thomas Young (1773 – 1829) e gli esperimenti e le teorie di Augustin-Jean Fresnel (1788 – 1827) mostrarono che anche per la luce è possibile osservare il fenomeno dell'interferenza caratteristico delle onde e quindi provarono in modo definitivo che la natura della luce è ondulatoria.

L'altro aspetto richiamato nel titolo del convegno è *La luce mezzo di studio*. A partire dai contributi di James Clerk Maxwell (1831 - 1879) e di Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1894), grazie ai quali la luce è stata identificata come una particolare onda elettromagnetica, si è osservato un sempre più crescente e variegato utilizzo della luce come mezzo di studio delle proprietà di sistemi fisici: a titolo d'esempio ricordiamo il ruolo che ha avuto la spettroscopia nello sviluppo della teoria atomica.



**La luce oggetto di indagine**

Per quanto riguarda questo primo aspetto abbiamo studiato il fenomeno della *diffrazione da fenditura singola*; questa scelta è stata motivata dal fatto che l'osservazione di tale fenomeno permette di evidenziare il carattere ondulatorio della luce e, nel caso di luce monocromatica, di determinarne una grandezza caratteristica, la lunghezza d'onda.

Nella figura 1 sono riportate immagini ottenute proiettando su uno schermo la luce di un puntatore laser di colore rosso. Nella prima immagine dall'alto, la luce è stata indirizzata direttamente sullo schermo mentre nelle altre tra la sorgente e lo schermo, a 344 cm da quest'ultimo, è stata inserita una fenditura, con apertura di dimensioni  $a$  variabile: le foto, a partire dal secondo riquadro dall'alto, fissano il fenomeno osservato quando  $a = 0,6$  mm,  $a = 0,4$  mm,  $a = 0,2$  mm rispettivamente.

Il primo fotogramma presenta un punto luminoso centrale che è, come prevedibile, l'immagine sullo schermo formata dalla luce del puntatore. Nel secondo e nei seguenti, dove è stata inserita la fenditura, la luce *invade* anche la zona che prima corrispondeva all'ombra geometrica: questo significa che la luce è stata diffratta. Da questa sequenza di immagini si può anche notare che, variando l'ampiezza della fenditura, cambia anche l'ampiezza della frangia centrale e più precisamente, al diminuire dell'ampiezza della fenditura si ha un allargamento della frangia.

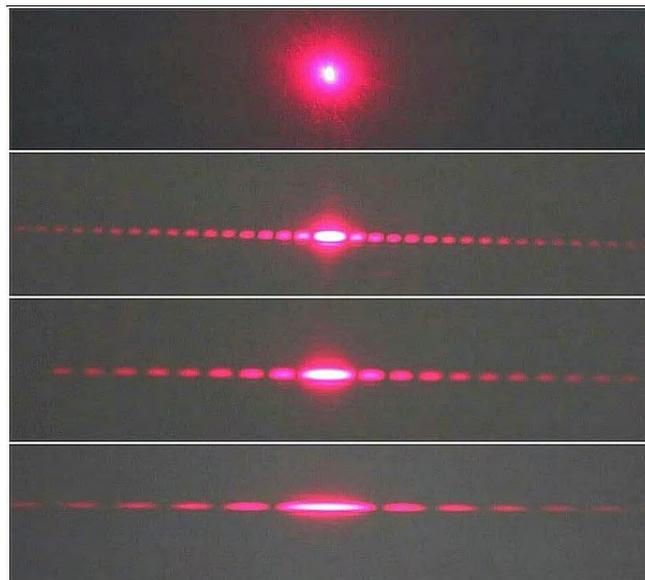


Figura 1 – Nel primo fotogramma il raggio del puntatore laser non è diffratto. Il secondo fotogramma dall'alto riporta la figura di diffrazione ottenuta con apertura della fenditura  $a = 0,6$  mm, il terzo con  $a = 0,4$  mm, il quarto con  $a = 0,2$  mm

In figura 2 è riportata la fotografia della figura di diffrazione corrispondente a una larghezza della fenditura di 0,2 mm. Una semplice costruzione geometrica mostra che la posizione di una frangia sullo schermo e le sue caratteristiche, quali la semilarghezza, possono venire caratterizzate dall'angolo sotto cui la frangia stessa è vista dalla fenditura. La figura di diffrazione è simmetrica rispetto all'asse AB della fenditura.

In particolare, da un punto di vista quantitativo si può caratterizzare una figura di diffrazione mediante una relazione che lega la lunghezza d'onda  $\lambda$  all'ampiezza della fenditura  $a$  e al valore dell'angolo  $\theta$  sotto cui viene visto il primo minimo, cioè la prima zona di buio, rispetto alla posizione centrale illuminata; l'angolo  $\theta$  corrisponde cioè alla metà dell'angolo sotto cui viene osservata la frangia luminosa centrale. La relazione in questione è:

$$\lambda = a \sin\theta$$

che può essere scritta come:

$$\sin\theta = \lambda/a$$

In questo modo si evidenzia la dipendenza di proporzionalità inversa tra l'ampiezza della fenditura  $a$  e il seno dell'angolo  $\theta$  corrispondente al primo minimo.

La lunghezza d'onda è stata determinata utilizzando questa relazione.

L'ampiezza della fenditura  $a$  è stata ottenuta direttamente dalle caratteristiche, note, del dispositivo utilizzato; per la misura dell'angolo  $\theta$ , invece, è stato necessario servirsi della relazione goniometrica:  $\theta = \arctg(\Delta x/D)$  dove  $\Delta x$  rappresenta la distanza tra il punto centrale e la posizione del primo minimo e  $D$  la distanza tra la fenditura e lo schermo (si veda la figura 2).

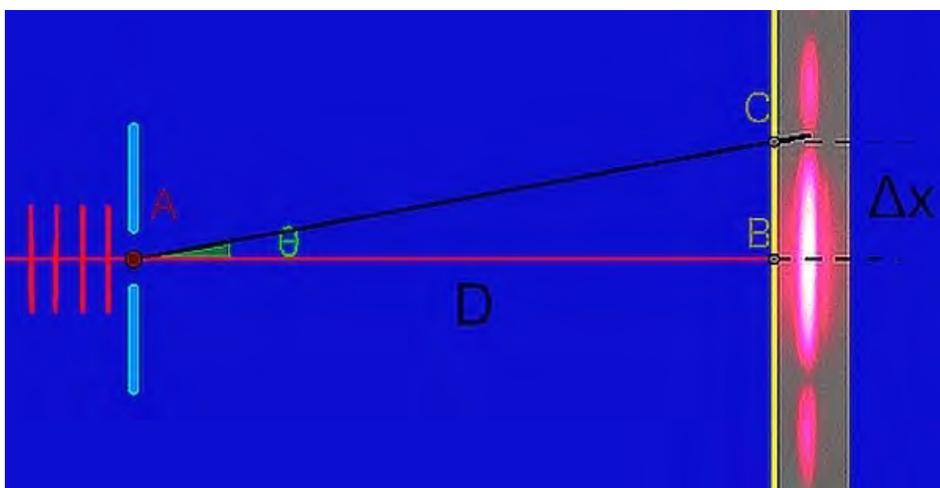


Figura 2

Nella tabella che segue sono raccolti i dati ricavati dalle figure di diffrazione ottenute utilizzando due puntatori, uno rosso e l'altro verde, in corrispondenza dei diversi valori di apertura della fenditura.

Puntatore rosso				Puntatore verde			
D = 344 cm				D = 344 cm			
$\alpha$ (mm)	1/a (1/mm)	$\Delta x$ (cm)	Sen $\vartheta$	$\alpha$ (mm)	1/a (1/mm)	$\Delta x$ (cm)	sen $\vartheta$
0,6	1,7	0,39	0,00113	0,6	1,7	0,33	0,00096
0,4	2,5	0,58	0,00169	0,4	2,5	0,45	0,00131
0,2	5	1,14	0,00331	0,2	5	0,96	0,00279

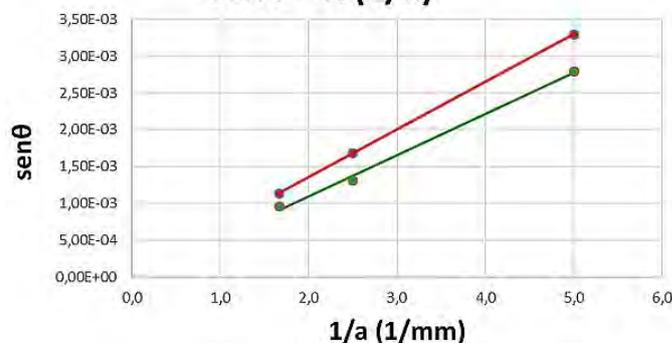
Questi dati sono stati quindi utilizzati per costruire il grafico qui a fianco in cui sono messi a confronto i valori ottenuti per i due tipi di luce. All'asse delle ascisse sono stati associati i valori del reciproco della fenditura  $a$  e a quella delle ordinate i valori di  $\text{sen}\theta$ .

In questo modo il grafico che rappresenta la relazione  $\text{sen}\theta = \lambda / a$  risulta essere una retta la cui coefficiente angolare è la lunghezza d'onda della luce impiegata.

Dall'analisi delle equazioni delle rette si è ottenuto per la luce rossa  $\lambda = 666 \text{ nm}$  e per la luce verde  $\lambda = 553 \text{ nm}$ .

Per concludere, utilizzando il fenomeno della diffrazione abbiamo calcolato la lunghezza d'onda della luce monocromatica incidente e quindi evidenziato una caratteristica del fenomeno luce, cioè la sua natura ondulatoria.

**Confronto verde - rosso**  
 $\text{sen}\theta = \lambda (1/a)$



### La luce mezzo di studio

Per evidenziare il secondo aspetto suggerito nel titolo del convegno, abbiamo realizzato una misura assoluta dell'indice di rifrazione di due liquidi sfruttando fenomeni connessi con la natura ondulatoria della luce. Siamo stati guidati da due docenti del Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università di Milano-Bicocca sia nell'impostazione sia nell'esecuzione dell'esperimento; su loro suggerimento abbiamo deciso di seguire una via sperimentale poco convenzionale, in quanto normalmente l'indice di rifrazione viene determinato mediante la misura dell'angolo di rifrazione.

L'indice di rifrazione è una grandezza che caratterizza le proprietà ottiche dei materiali; il suo valore è infatti legato alla velocità con cui la luce si propaga nei materiali trasparenti dalla relazione  $n = c / v$  dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto e  $v$  è quella della luce nel mezzo preso in esame.

In funzione di questo indice è possibile spiegare non solo la deviazione del cammino ottico nel passaggio della luce da un mezzo a un altro, ma anche molti altri effetti, quali per esempio

- la corrispondente modifica della lunghezza d'onda legata alla velocità di propagazione secondo la relazione di proporzionalità diretta:  $\lambda = f v$  dove  $f$  è la frequenza dell'onda;
- la visibilità di oggetti trasparenti che è determinata dall'intensità della luce riflessa dalle loro superfici che dipende a sua volta dall'indice di rifrazione del mezzo con cui gli oggetti sono costruiti e del mezzo in cui gli oggetti sono immersi.

### L'esperimento

Per eseguire l'esperimento è stato utilizzato un *reticolo di diffrazione*.

La luce trasmessa o riflessa da un reticolo di diffrazione produce un'immagine formata da una serie di frange molto strette, dovute alla combinazione dei fenomeni dell'interferenza e della diffrazione. Esistono relazioni matematiche che descrivono le

posizioni di queste frange. In particolare la posizione angolare  $\theta$  della prima frangia, che corrisponde al primo massimo di diffrazione, è data dall'equazione:

$$\lambda = d \sin \theta \quad [1]$$

dove  $\lambda$  indica la lunghezza d'onda della luce,  $d$  il passo del reticolo e  $\theta$  l'angolo sotto cui si osserva la frangia rispetto alla posizione del massimo centrale.

Sfruttando questa relazione è possibile determinare l'indice di rifrazione del mezzo in cui si propaga la luce. Infatti, dalla relazione [1] si deduce che, a parità di passo del reticolo, variando la lunghezza d'onda della luce incidente varia anche  $\theta$  e quindi la distanza tra la frange. La lunghezza d'onda della luce può essere variata, a parità di frequenza, cioè di colore della sorgente, variando la sua velocità di propagazione, ovvero il mezzo che la luce attraversa, secondo la relazione:

$$\lambda = \lambda_0/n \quad [2]$$

dove  $\lambda_0$  è la lunghezza d'onda in aria della luce utilizzata. La [2] si può ottenere combinando le relazioni  $n = c/v$  e  $\lambda = f v$ .

Possiamo quindi concludere che se si cambia mezzo in cui la luce si propaga, utilizzando lo stesso reticolo e la stessa sorgente, la luce darà origine a un'immagine le cui caratteristiche geometriche dipenderanno dalla lunghezza d'onda che è a sua volta determinata anche dall'indice di rifrazione del mezzo considerato.

Nel nostro esperimento, i cui dettagli sperimentali sono descritti nel paragrafo che segue, ci siamo serviti di una vaschetta di vetro all'interno della quale abbiamo fissato il reticolo che è stato parzialmente immerso nel liquido di cui si voleva determinare l'indice di rifrazione. In seguito abbiamo inviato su questo la luce, la cui lunghezza d'onda in aria era nota, in modo che investisse sia la parte del reticolo immersa sia la parte in aria e quindi abbiamo osservato sulla parete opposta della vaschetta l'immagine che si veniva a formare.

Nella figura 3, che rappresenta lo schema geometrico dell'esperimento, i punti D e C corrispondono alla posizione delle frange formate dalla luce che si propaga in aria e i punti E ed F la posizione delle frange formate dalla luce che attraversa il liquido.

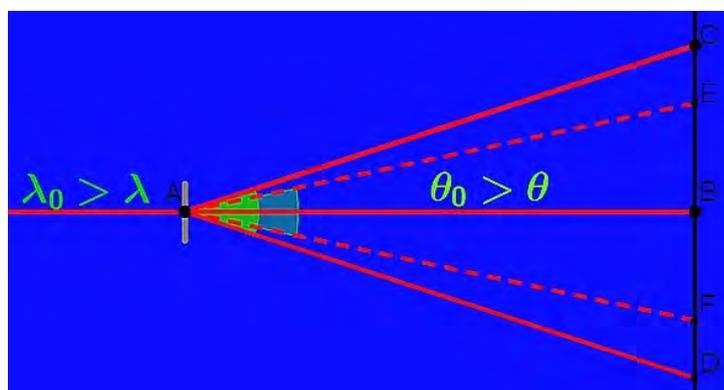


Figura 3

Dalla misura delle distanze delle suddette frange dalla posizione del massimo centrale, rispettivamente BC e BE, è possibile calcolare l'indice di rifrazione.

La distanza BC del primo massimo dal massimo centrale si può esprimere mediante la distanza AB tra il reticolo e la parete della vaschetta e l'angolo  $\theta_0$  mediante la relazione :

$$BC = AB \operatorname{tg} \theta_0$$

Poiché gli angoli considerati sono piuttosto piccoli (con il reticolo utilizzato l'angolo massimo osservato è di  $19^\circ$ ) e tenendo conto che le nostre misure presentano soltanto due cifre significative, è lecito assimilare il valore di  $\operatorname{tg} \theta_0$  a quello di  $\sin \theta_0$  e quindi riscrivere la relazione precedente nella forma:

$$BC = AB \sin \theta_0$$

Infine ricordando la [1] si ha:

$$BC = AB (\lambda_0/d) \quad [3]$$

Ripetendo questo ragionamento per BD si ottiene:

$$BD = AB (\lambda/d)$$

Che possiamo riscrivere utilizzando la [2] come:

$$BD = AB (\lambda_0/n)/d \quad [4]$$

Infine, dividendo membro a membro la [3] e la [4] si ottiene:

$$BC/BD = (AB \lambda_0/d) (d n/AB \lambda_0) = n \quad [5]$$

Quest'ultima è la relazione che ci permette di esprimere l'indice di rifrazione assoluto

del mezzo  $n$  in funzione delle distanze BC e BD delle prime frange in aria e nel liquido dal massimo centrale.

Osserviamo infine che, vista la simmetria della geometria dell'esperimento per ottenere l'indice di rifrazione  $n$ , abbiamo calcolato il rapporto tra le distanze CD ed EF dei primi due massimi nel liquido e in aria, in modo da diminuire l'errore relativo.

#### *L'apparato sperimentale*

Le figure 4a e 4b mostrano la strumentazione che abbiamo utilizzato per eseguire l'esperimento. Nella figura 4a si può vedere la vaschetta di vetro di dimensioni 20cm x 25cm x 9cm al cui interno è stato fissato un piedino in cui è inserito il reticolo di diffrazione; nella figura 4b si vede in primo piano il supporto che alloggia un puntatore laser e un cilindro di vetro che ha avuto la funzione di lente cilindrica come verrà illustrato in seguito.

Le sostanze che abbiamo utilizzato e di cui abbiamo determinato l'indice di rifrazione sono l'acqua e la glicerina.

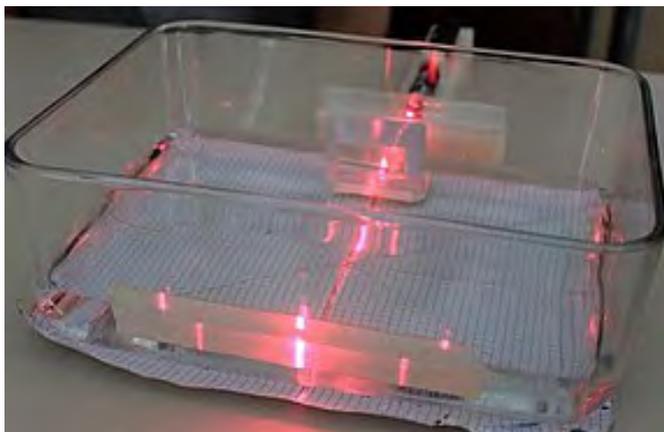


Figura 4a

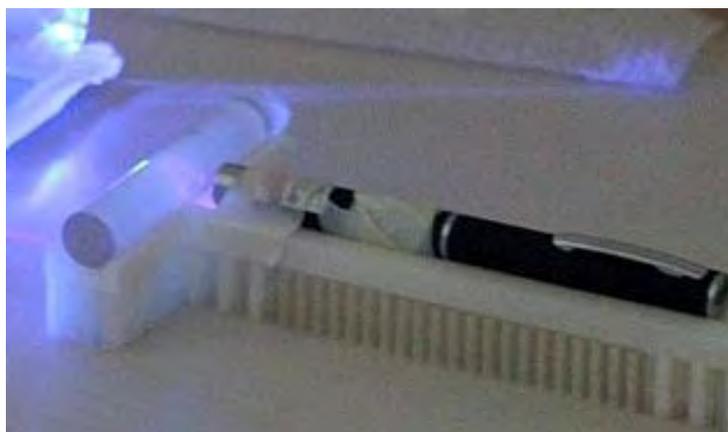


Figura 4b

La scelta delle dimensioni della vaschetta nasce da un compromesso tra due fattori: la necessità di realizzare un apparato che potesse essere trasportato facilmente nel viaggio in treno da Milano a Firenze sia per il peso sia per le dimensioni; l'esigenza di poter lavorare, per non avere un errore relativo troppo alto, con distanze dell'ordine di almeno 10 cm, tenuto presente che le nostre misure sono affette da un errore assoluto, come vedremo, di circa 1 mm.

Considerazioni analoghe ci hanno portato a decidere di far incidere il raggio del laser sulla parete corrispondente al lato maggiore della base della vaschetta e di posizionare il piedistallo per il reticolo a 3 cm dalla prima parete e quindi alla distanza di 17 cm dalla seconda parete che funge da schermo.

L'apparato sperimentale che abbiamo alla fine utilizzato è il risultato di un percorso di riflessione sulle difficoltà incontrate e di accorgimenti introdotti per cercare di superarle o minimizzarle al fine di rendere il fenomeno che stavamo studiando maggiormente chiaro e visibile e quindi migliorare la qualità dei risultati.

Nelle prime prove abbiamo utilizzato, come reticolo di diffrazione, un CD, che può essere considerato come un *reticolo di diffrazione per riflessione*; poiché i solchi del CD sono concentrici, la figura che si viene a formare è costituita da archi di circonferenza, il che rendeva molto delicate le operazioni di allineamento, dilatando i tempi di preparazione. Questo ci ha portato a prendere in considerazione la possibilità di sostituirlo con un *reticolo di diffrazione per trasmissione* a tratti rettilinei, spesso disponibile in un laboratorio didattico. Il dispositivo da noi utilizzato era costituito da una pellicola, su cui sono tracciate le linee del reticolo, montata su un telaio di cartoncino; il telaio, che in parte doveva restare immerso in acqua, è stato impermeabilizzato con uno strato di smalto per le unghie.

Un altro aspetto che abbiamo preso in considerazione riguarda, in particolare per la misura dell'indice di rifrazione dell'acqua, la qualità del liquido. Inizialmente ci siamo serviti dell'acqua del rubinetto, ma le impurità e l'aria in essa presenti causavano il fenomeno della diffusione della luce, che rendeva meno nette le frange e quindi meno precise le nostre misure. Per questo motivo abbiamo sostituito l'acqua del

rubinetto con quella distillata che, non presentando impurità e aria in sospensione, ci ha permesso di ottenere risultati migliori.

Un salto di qualità decisivo, è stato poi compiuto con l'introduzione della *lente cilindrica*, un'idea questa che ci è stata suggerita dai due docenti universitari con cui abbiamo lavorato.

Inizialmente la misura veniva eseguita in due fasi: rilevazione sulla parete della vaschetta della distanza tra le prime frange in aria e poi, dopo aver riempito la vaschetta con il liquido da esaminare, rilevazione della stessa distanza in presenza del liquido.

La lente cilindrica, che modifica la forma del fascio di luce allungandolo in un tratto verticale, permette di illuminare contemporaneamente la parte del reticolo immersa in acqua e la parte del reticolo che rimane in aria. In questo modo è possibile osservare sulla parete della vaschetta contemporaneamente le frange formate dal passaggio della luce in aria e quelle formate dal passaggio della luce nell'acqua, rendendo così possibile l'esecuzione una misura simultanea della distanza tra le frange prodotte dalla luce che si propaga nei due mezzi.

Infine per facilitare l'allineamento dell'apparato sperimentale, e quindi per ottimizzare i tempi di esecuzione dell'esperimento, abbiamo progettato e costruito, mediante una stampante 3D, un supporto che ospita la lente cilindrica e il puntatore in modo tale da far passare il raggio esattamente al centro della lente.

#### Fonti di errore

Le misure delle distanze sono state eseguite con un righello con sensibilità di 1 mm, ma per dare una stima dell'incertezza della misura, durante l'esecuzione e la lettura dei dati abbiamo dovuto prestare attenzione anche alla rifrazione del raggio luminoso all'interno della seconda parete della vasca e all'incremento della dimensione della frangia causato dal fascio poco collimato del laser.

Il raggio luminoso raggiungeva la seconda parete della vaschetta non incidendo perpendicolarmente su di essa; quindi, per rifrazione, veniva spostato lateralmente. Lo spessore del vetro della parete era 0,5 cm; abbiamo stimato che nelle nostre condizioni sperimentali lo spostamento laterale della frangia era inferiore al millimetro, e quindi trascurabile, in quanto minore della sensibilità del righello utilizzato per la misura delle distanze.

Infine, abbiamo stimato che l'allargamento della frangia a seguito della propagazione in acqua era pari a circa 1 mm, cioè anch'esso confrontabile con la sensibilità nel nostro righello.

#### La misura dell'indice di rifrazione

Per eseguire la misura dell'indice di rifrazione dell'acqua, abbiamo preparato la vaschetta e allineato il supporto con la lente cilindrica e il puntatore in modo tale che il raggio del laser incidesse perpendicolarmente sulla parete più lunga della vaschetta e la attraversasse a una quota tale da incidere sul reticolo sia nella parte immersa sia in quella in aria; con una penna abbiamo segnato sulla striscia di carta adesiva, che abbiamo fissato sulla parete-schermo della vaschetta per migliorare la visibilità dell'immagine (si veda la figura 5) dei tratti in corrispondenza delle frange indicate con i punti C, E, F, D e con un righello abbiamo misurato le distanze CD ed EF.

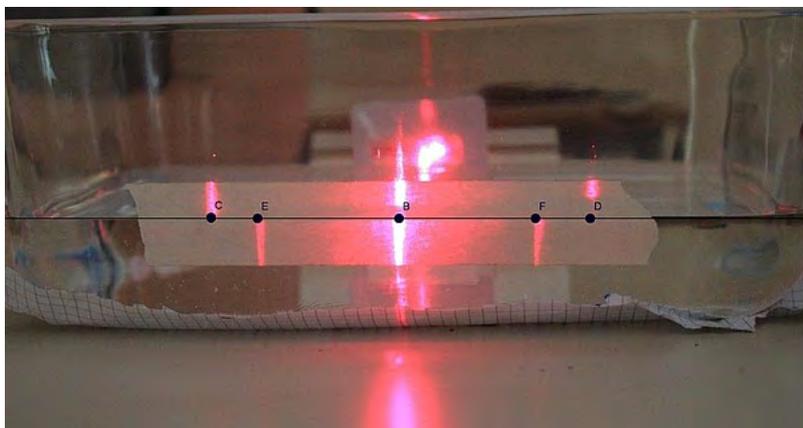


Figura 5

Come abbiamo dimostrato, il rapporto tra la distanza tra i primi due massimi nell'aria e la distanza tra i primi due massimi nell'acqua fornisce il valore dell'indice di rifrazione  $n$ . Nella tabella che segue, sono riportati i valori di tali rapporti per una serie di misure.

N° prova	1	2	3	4	5
$n = CD/EF$	1,35	1,318	1,333	1,341	1,333

Dall'analisi di questi risultati si è ottenuto il valore  $n = 1,335 \pm 0,008$  dove l'incertezza è stata stimata calcolando lo scarto semplice assoluto.

In modo del tutto analogo abbiamo eseguito la misura dell'indice di rifrazione della glicerina e in questo caso il valore che abbiamo ottenuto è  $n = 1,472 \pm 0,001$ .

#### *Visibilità di oggetti trasparenti*

All'inizio abbiamo ricordato che l'intensità della luce riflessa da un materiale trasparente, e quindi la sua visibilità, dipende dal valore dell'indice di rifrazione del materiale stesso e del mezzo in cui è immerso; in particolare se un oggetto è immerso in un mezzo caratterizzato da un indice di rifrazione che non differisce molto dal suo, risulta poco visibile.

Questo è quanto abbiamo infine verificato immergendo un oggetto di quarzo, il cui indice di rifrazione vale  $n = 1,544$ , in glicerina e in acqua. L'oggetto risulta molto più visibile quando è immerso in acqua che quando lo è nella glicerina dove a stento si riescono a distinguere i contorni. Questo si può giustificare confrontando il valore dell'indice di rifrazione di questi materiali: l'indice di rifrazione del quarzo infatti è molto più vicino a quello della glicerina che a quello dell'acqua.

*Barbara Chierichetti*

*(Insegnante di Matematica e Fisica al Liceo Classico "Giovanni Berchet" di Milano)*

#### **Ringraziamenti**

*L'insegnante, autore dell'articolo, e gli studenti del gruppo di lavoro ringraziano Mario Guzzi ed Emanuele Grilli del Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca.*