

Diffrazione della luce in aria e in acqua

(Ricevuto il 3.5.88)

È ben noto che i fenomeni di diffrazione rivestono un ruolo di particolare importanza nella fisica, e che l'impiego dei laser in questo campo permette di effettuare dimostrazioni molto convincenti, dalla cattedra.

In particolare, la diffrazione data da una fenditura trova posto in tutti i corsi moderni, per la sua importanza concettuale nell'ambito della teoria ondulatoria della radiazione elettromagnetica. Quasi ognuno di noi l'avrà presentata ai suoi studenti, in più di una occasione. Può essere interessante comunque proporre lo stesso esperimento in due maniere diverse: in un primo tempo, come al solito, cioè in aria, mentre in un secondo tempo lo si può presentare in acqua o in un altro liquido. Dal

punto di vista pedagogico, infatti, è molto importante presentare situazioni in cui varia un solo parametro alla volta, per metterne in risalto la sua influenza.

Nel caso specifico, sappiamo dalla teoria ondulatoria che la velocità di propagazione della luce nell'acqua è notevolmente inferiore a quella nell'aria, quindi la lunghezza d'onda è minore, e più precisamente vale $\lambda' = \lambda/n$, dove λ rappresenta la lunghezza d'onda della luce in aria ed n l'indice di rifrazione assoluto dell'acqua, considerando quello dell'aria pari all'unità. Perciò, se noi inviamo la luce di un laser He-Ne su una fenditura abbastanza stretta, ci aspettiamo di ottenere una figura di diffrazione più estesa in aria che in acqua. La

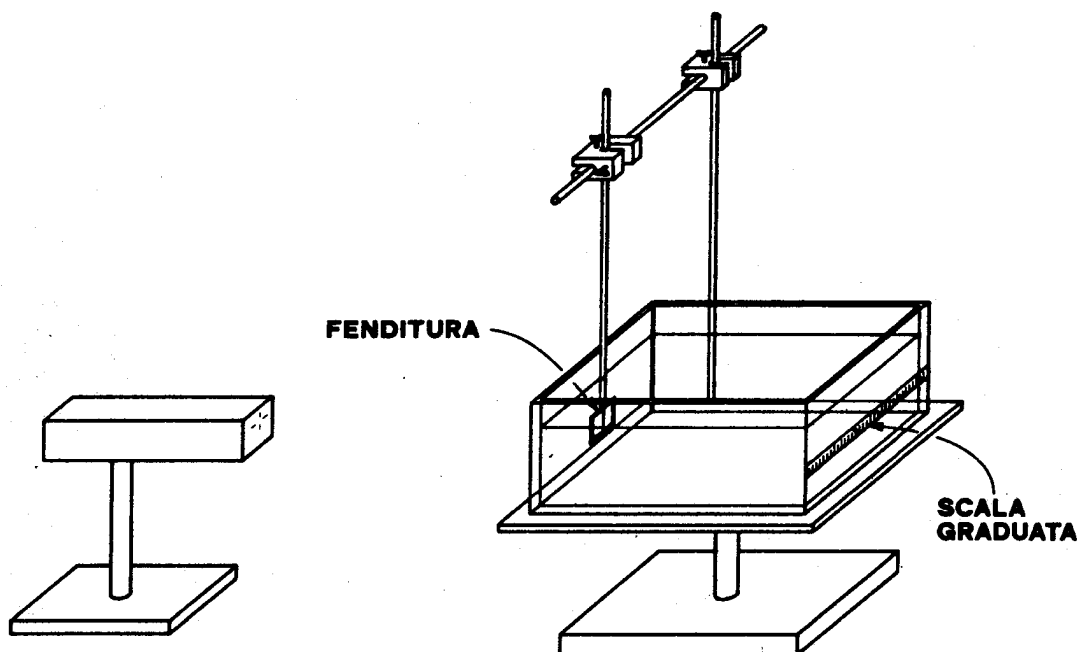


Fig. 1 - Apparato sperimentale. Le frange di diffrazione possono risaltare chiaramente, in un ambiente parzialmente oscurato, se la scala graduata è traslucida.

figura 1 schematizza il semplice dispositivo sperimentale: si noti in particolare che la fenditura è completamente immersa nell'acqua, così come la scala graduata su cui si formano le righe di diffrazione. Le figure 2 e 3 mostrano i risultati ottenuti rispettivamente in aria ed in acqua.

L'esperimento può venire proposto all'attenzione dei ragazzi con scopo puramente qualitativo, per far notare come gioca la lunghezza d'onda nei fenomeni di diffrazione. Oppure può essere portato avanti in maniera quantitativa, per calcolare la larghezza della fenditura (nei due casi si deve ovviamente ottenere lo stesso risultato), o per calcolare l'indice di rifrazione dell'acqua rispetto all'aria, in base al rapporto tra le lunghezze d'onda rispettivamente nell'aria e nell'acqua, ottenute dal disegno di diffrazione nei due casi considerati.

Materiale utilizzato ed esecuzione dell'esperimento

Il principale materiale da noi utilizzato è stato il seguente.

- Un laser He-Ne di bassa potenza (tipicamente, 1 mW).
- Una vaschetta in vetro o plexiglas, di dimensioni circa 25 cm x 18 cm, altezza 11 cm, con pareti otticamente di buona qualità, parallele tra di loro.

- Una striscia di plastica graduata in millimetri, applicata su una parete interna della vaschetta, come mostra la figura 1, per poter misurare la distanza tra le frange di diffrazione senza errore né di parallasse né di rifrazione attraverso la parete, come si verificerebbe se questa scala fosse applicata all'esterno. Affinché le frange siano ben visibili, occorre che la striscia faccia anche da schermo, cioè sia traslucida.

- Una fenditura di circa 1/3 di decimo di mm, che possa essere immersa in acqua senza deteriorarsi. Noi l'abbiamo realizzata servendoci di due mezze lame da barba, fissate trasversalmente mediante altre due porzioni di lame, il tutto saldato assieme mediante un collante a presa rapida, ad esempio il "Super Attak" della Loctite. Si ponga l'attenzione a che i bordi delle due lame siano paralleli, cosa che si può ottenere servendosi di un distanziatore formato da carta di alluminio per alimenti, piegata in due o tre strati, a seconda del suo spessore. (Onde avere un'idea di quanto sia lo spessore di un foglio di alluminio per alimenti, basta servirsi di un calibro e misurare lo spessore corrispondente a 10-20 fogli). Per ottenere una figura di diffrazione simmetrica rispetto al massimo centrale, occorre che le due lame siano ben complana-

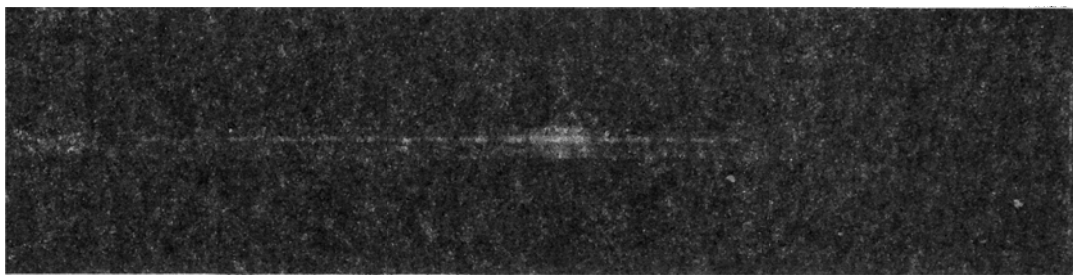


Fig. 2 - Figura di diffrazione generata da una fenditura di circa $24 \mu\text{m}$, in aria. Fotografia ripresa con pellicola Ilford HP5, 400 ASA, $f = 135 \text{ mm}$, apertura 4.5, esposta per 9 secondi (il tempo di esposizione non è critico).

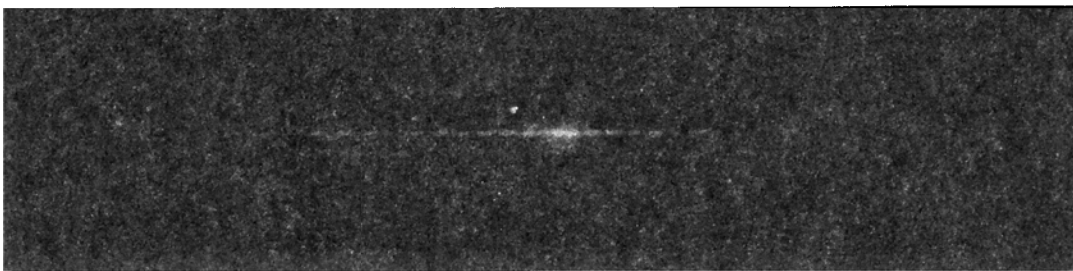


Fig. 3 - La stessa figura di diffrazione, ottenuta immergendo la fenditura in acqua. Fotografia come sopra.

ri, e che la luce laser incida perpendicolarmente al piano da esse individuato.

Abbiamo poi montato la fenditura così ottenuta su un telaietto da diapositiva, per poterla maneggiare più comodamente.

Un accorgimento pratico molto importante, per ottenere l'immagine di diffrazione nitida, consiste nel far sì che il fascio laser entri perpendicolarmente rispetto alle pareti della vaschetta: in questa maniera le doppie riflessioni date dalle pareti stesse si sovrappongono. Facciamo notare inoltre che conviene eseguire prima l'esperimento in aria, con la fenditura dentro la vaschetta vuota, poi si aggiunge l'acqua, senza muovere assolutamente alcunché, e si procede alla seconda misura. Il confronto tra i due casi, in questa maniera, risulta di una evidenza estrema.

Richiami teorici e risultati ottenuti

L'impostazione didattica da noi seguita è stata la seguente. Abbiamo determinato preliminarmente la larghezza della fenditura (vedi sotto), indi abbiamo elaborato i dati in maniera da ottenere la lunghezza d'onda della radiazione laser prima in aria, poi in acqua. Infine abbiamo calcolato il rapporto tra queste, per ottenere l'indice di rifrazione assoluto dell'acqua.

Poiché questo è un esperimento di sintesi, in cui i ragazzi devono fare uso di molte conoscenze di ottica, il fatto di trovare un buon valore di n è fondamentale per mettere alla prova tutto l'edificio teorico-sperimentale dell'ottica stessa.

A proposito della determinazione della larghezza della fenditura, ci siamo serviti di un proiettore da diapositive, per proiettare su uno schermo l'immagine della fenditura, e misurarne la larghezza. Onde conoscere il fattore di ingrandimento introdotto dal proiettore, abbiamo poi proiettato un reticolo fotografico avente divisioni di 1/10 di mm, ottenendo il seguente valore della larghezza della fenditura: $d = (24 \pm 5) \mu\text{m}$. L'incertezza è dovuta essenzialmente alla non perfetta nitidezza dei bordi delle immagini proiettate.

Per quanto riguarda l'analisi delle figure di diffrazione in aria ed in acqua, abbiamo usato due metodi: il primo, basato sulla misura della larghezza $2 \cdot \Delta x$ del massimo centrale, che non richiede considerazioni trigonometriche, e che porta alla formula approssimata [1]: $\Delta x/L = \lambda/d$, dove L rappresenta la distanza della fenditura dalla scala graduata. Il secondo metodo, più preciso, si basa sul conteggio di N frange luminose a sinistra ed a destra del massimo centrale, indi si misura la distanza $2 \cdot x$ tra la ennesima frangia a destra e a sinistra, poi si applica la ben nota formula [2]:

$$d \cdot \sin \sigma = (2N + 1) \cdot \lambda/2$$

dove $\sin \sigma$ può essere ricavato dalla relazione $\tan \sigma = x/L$. (Si ricorda che questa formula è rigorosamente valida solo per distanza infinita tra fenditura e schermo. Inoltre, essa presuppone che i massimi siano esattamente a metà tra le linee nodali, cosa questa vera solo in maniera approssimata) [3].

Nel nostro caso, la distanza tra fenditura e schermo valeva $L = (23,1 \pm 0,1)$ cm, mentre il numero d'ordine N valeva 7 in aria, e 10 in acqua. La quantità $2 \cdot x$ valeva $(8,6 \pm 0,1)$ cm in aria e $(9,2 \pm 0,1)$ cm in acqua, mentre il massimo centrale era largo rispettivamente $(1,15 \pm 0,05)$ cm in aria e $(0,90 \pm 0,05)$ cm in acqua.

In conclusione, dai suddetti valori si ricava per l'indice di rifrazione dell'acqua:

$$n = \lambda'/\lambda = \Delta x/\Delta x' = 1,28 \pm 0,13$$

in base alla semilarghezza del massimo centrale.

$$n = \lambda'/\lambda = \frac{(\sin \sigma/2N + 1)}{(\sin \sigma'/2N' + 1)} = 1,31 \pm 0,07$$

con l'altro metodo.

Abbiamo volutamente esplicitato le relazioni finali che permettono di calcolare il valore di n , con i due metodi, per richiamare l'attenzione sul fatto che nella prima sparisce la dipendenza da L e da d , mentre nella seconda sparisce la dipendenza da d solamente. (Infatti, la dipendenza da L resta, nel calcolo di $\sin \sigma$). Quindi, per questo scopo, potevamo anche non conoscere la larghezza della fenditura utilizzata, così come non era necessario conoscere la lunghezza d'onda della luce usata.

Vogliamo richiamare l'attenzione sul fatto che abbiamo elaborato i dati di cui sopra, per controllo, anche in maniera da ricavare la larghezza della fenditura. Conoscendo la lunghezza d'onda della luce laser impiegata, $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ in aria e $\lambda' = (0,6328/n) \mu\text{m}$ in acqua, dove $n = 1,33$, e applicando una delle due formule sopra riportate, sia nel caso della misura in aria che in acqua abbiamo ottenuto per la larghezza d della fenditura un valore coincidente con quello trovato mediante il metodo di proiezione, entro gli errori sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Fisica*, a cura del PSSC, terza edizione italiana, p. 485, Zanichelli 1985.
- [2] Caforio, Ferilli: *Corso di fisica sperimentale*, vol. 2, par. 21.4, Le Monnier 1987.
- [3] P. Fleury, J.P. Mathieu: *Trattato di fisica generale e sperimentale*, vol. 4, par. 15.5, Zanichelli 1966.