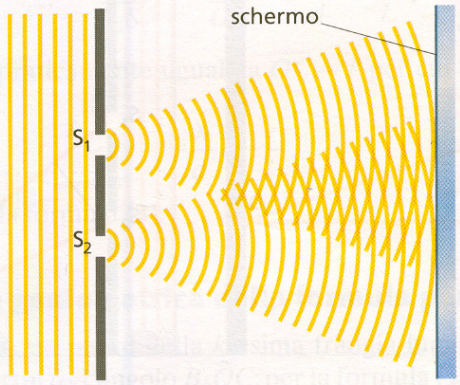
3. L'esperimento di Young

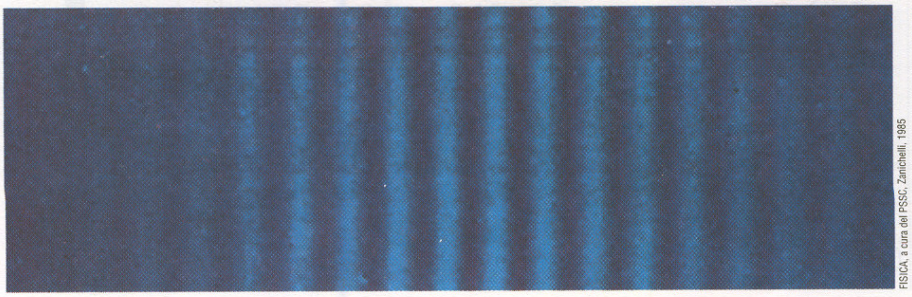
L'esperimento che mostra l'interferenza della luce fu eseguito la prima volta nel 1801 da Thomas Young; grazie al suo apparato sperimentale egli riuscì anche a misurare la lunghezza d'onda della luce di vari colori.

L'idea fondamentale è che le due fenditure S_1 e S_2, colpite da un'onda piana, si comportano come sorgenti di luce e generano due onde circolari (in realtà cilindriche, visto che le fenditure hanno una lunghezza) che sono sempre in fase, perché sono dovute alla stessa onda luminosa che arriva in S_1 e S_2.



Queste due onde formano una figura di interferenza (➔figura sotto) che è visibile là dove la luce colpisce uno schermo.

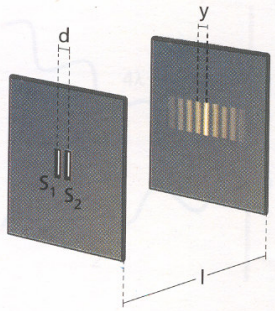
Lo schermo non è illuminato in modo uniforme, ma presenta una serie di *frange d'interferenza*: una striscia centrale più brillante e, ai suoi fianchi, altre striscè buie e brillanti alternate.



FISICA, a cura del PSSC, Zanichelli, 1985

FILM
- *Interferenza dei fotoni*

Thomas Young (1773-1829) fisico e medico inglese. Descrisse per primo il funzionamento del cristallino e propose che la percezione visiva sia dovuta alla sovrapposizione di tre colori fondamentali. In fisica è ricordato per le sue ricerche sulla natura della luce e sull'elasticità dei materiali.



Come è mostrato nella ➔figura a lato, indichiamo con y la distanza tra la fascia luminosa centrale e la prima frangia luminosa laterale, con d la distanza tra le due fenditure e con l la distanza tra lo schermo e la parete dove si trovano le fenditure.

Allora la lunghezza d'onda λ della luce monocromatica impiegata nell'esperimento è data dalla formula

$$\lambda = \frac{yd}{l} \qquad (3)$$

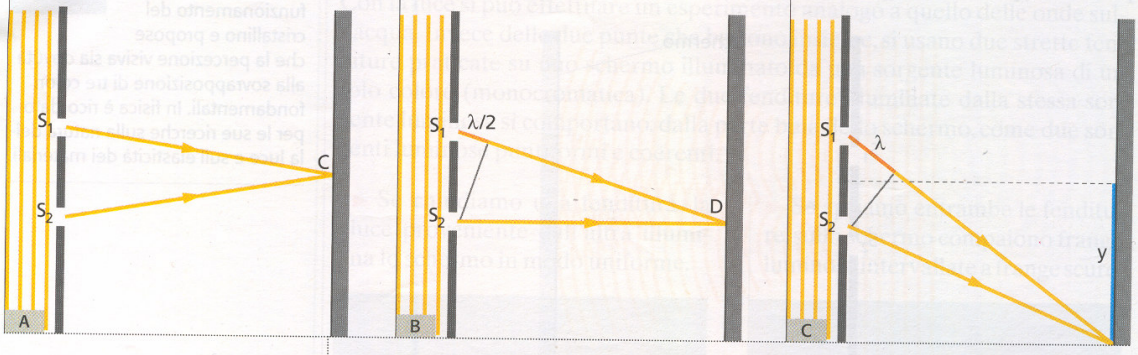
Analisi dell'esperimento di Young

La struttura geometrica dei punti ove si ha interferenza costruttiva e distruttiva nell'esperimento di Young è analoga a quella che abbiamo visto nel paragrafo precedente per le onde sull'acqua. Esaminiamo, per esempio, le frange d'interferenza nel centro e alla destra di esso.

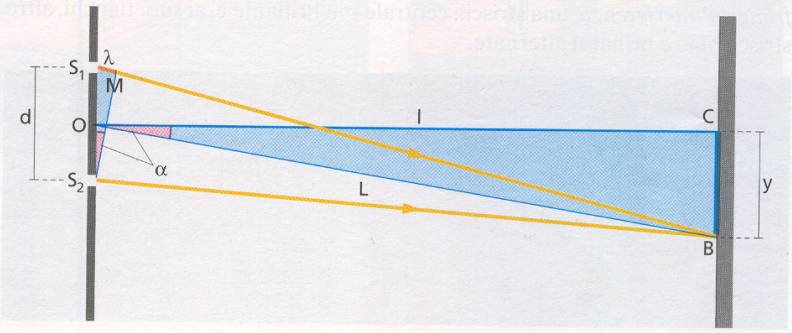
▶ La striscia brillante centrale è equidistante da S_1 e S_2: le due onde luminose sono in fase perché i loro massimi sono partiti dalle sorgenti nello stesso istante.

▶ I punti della prima frangia oscura hanno una distanza da S_1 che è uguale a quella da S_2, più mezza lunghezza d'onda. Così si ha interferenza distruttiva.

▶ La distanza dei punti della prima frangia luminosa da S_1 è uguale alla distanza da S_2, più una lunghezza d'onda. In questo modo le due onde sono in fase.

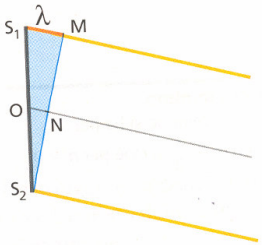


La ➔figura sotto mostra con più dettagli la situazione geometrica che porta i raggi di luce a formare la prima frangia luminosa al fianco della fascia centrale.



La figura non è in scala, perché negli esperimenti la distanza $\overline{OC} = l$ è molto più grande della distanza d tra le fenditure (per dei valori realistici, vedi il Problema alla fine del paragrafo).

Per questa ragione i due raggi S_1B e S_2B si possono considerare paralleli tra loro e anche paralleli al segmento OB. La ➔figura a lato mostra un ingrandimento della zona delle fenditure che illustra questa situazione.



Tenendo conto delle condizioni appena illustrate si possono fare alcune considerazione geometriche.

- Il triangolo MS_2B della figura a pagina precedente è isoscele di base S_2M, perché è stato costruito con $S_2B = MB$. Quindi i due angoli $M\hat{S}_2B$ e $S_2\hat{M}B$ sono uguali tra loro.
- Visto che d è molto piccolo rispetto a l, l'angolo $S_2\hat{B}M$ è circa uguale a 0°. Allora i due angoli $M\hat{S}_2B$ e $S_2\hat{M}B$ si possono considerare retti e, di conseguenza è retto anche l'angolo $S_2\hat{M}S_1$.
- Siccome abbiamo ammesso che S_2B è parallelo a OB, anche l'angolo $S_2\hat{N}O$ (➔figura accanto) è retto.
- Quindi abbiamo $OB \perp S_2M$ e $OC \perp S_1S_2$. Per un teorema di geometria piana, l'angolo $C\hat{O}B$ formato da OC e OB è uguale all'angolo $S_1\hat{S}_2M$ formato da S_2M e S_1S_2; questi due angoli sono indicati con α nella figura a pagina precedente.
- Allora i due triangoli COB e MS_2S_1 sono simili per il primo criterio, in quanto hanno ciascuno un angolo retto e gli angoli α uguali. Usando il simbolo $\overline{OB} = L$, possiamo scrivere la proporzione

$$\frac{\overline{S_1M}}{\overline{S_1S_2}} = \frac{\overline{CB}}{\overline{OB}} \rightarrow \frac{\lambda}{d} = \frac{y}{L}.$$

- Ma $\overline{OB} = L$ è praticamente uguale a $\overline{OC} = l$, per cui l'ultima proporzione diventa

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{y}{l}, \qquad (4)$$

da cui si ricava la formula (3).

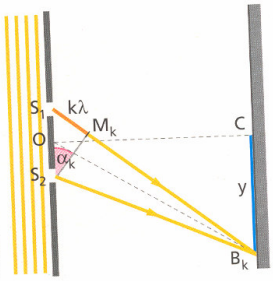
Espressione goniometrica della formula per l'interferenza

Indichiamo con B_k un punto della k-esima frangia luminosa a fianco della striscia centrale e con α_k l'angolo $B_k\hat{O}C$; per la formula (1) si ha

$$\overline{S_1B_k} - \overline{S_2B_k} = k\lambda. \qquad (5)$$

Ma, come abbiamo mostrato nella trattazione precedente, anche l'angolo $S_1\hat{S}_2M_k$ della ➔figura a lato è uguale a α_k; inoltre sappiamo che l'angolo $S_2\hat{M}_kS_1$ è retto, per cui vale

$$\overline{S_1B_k} - \overline{S_2B_k} = \overline{S_1M_k} = d \text{ sen } \alpha_k.$$



Sostituendo questo risultato al primo membro della formula (5) troviamo

$$d \text{ sen } \alpha_k = k\lambda,$$

da cui otteniamo la formula che permette di trovare la lunghezza d'onda partendo dall'angolo α_k che individua una generica frangia luminosa:

$$\lambda = \frac{d}{k} \text{ sen } \alpha_k. \qquad (6)$$

Primo minimo
Il primo minimo si ha per $d \text{ sen } \alpha = \frac{1}{2}\lambda$, cioè per $n = 0$.

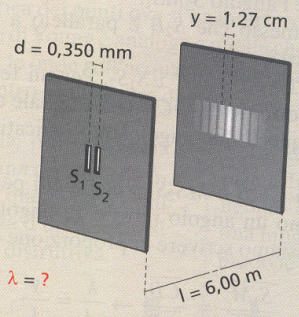
Con un ragionamento del tutto analogo, in cui si considera la formula (2) al posto della formula (1), si dimostra che per la n-esima riga *scura* della figura di diffrazione (individuata dall'angolo α_n) valgono le formule

$$d \text{ sen } \alpha_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \rightarrow \lambda = \frac{2d}{2n+1} \text{ sen } \alpha_n. \quad (7)$$

PROBLEMA

Un esperimento di interferenza è eseguito, con luce rossa, mediante due fenditure separate da 0,350 mm. La distanza tra le fenditure e lo schermo è 6,00 m e si osserva che la distanza tra la fascia luminosa centrale e la prima frangia luminosa laterale è 1,27 cm.

▶ Calcola la lunghezza d'onda della luce utilizzata.



■ **Strategia e soluzione**

- Per risolvere il problema basta usare la formula (3), con d e y espressi come $d = 3{,}50 \times 10^{-4}$ m e $y = 1{,}27 \times 10^{-2}$ m. Quindi troviamo

$$\lambda = \frac{yd}{l} = \frac{(1{,}27 \times 10^{-2}\text{ m}) \times (3{,}50 \times 10^{-4}\text{ m})}{6{,}00\text{ m}} = 7{,}41 \times 10^{-7}\text{ m}.$$

■ **Discussione**

L'ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce rossa impiegata nell'esperimento è 10^{-6} m, cioè 1 μm. Il valore, così piccolo, della lunghezza d'onda spiega come mai è difficile riconoscere la natura ondulatoria della luce nei fenomeni fisici quotidiani.
È abituale esprimere la lunghezza d'onda della luce in nm (nanometri: 1 nm = 10^{-9} m). Così la lunghezza d'onda misurata nell'esperimento precedente si può esprimere come

$$\lambda = 7{,}41 \times 10^{-7}\text{ m} = 741 \times 10^{-9}\text{ m} = 741\text{ nm}.$$

DOMANDA

Si ripete l'esperimento del Problema precedente utilizzando una luce gialla che ha $\lambda = 549$ nm.

▶ Qual è, in questo caso, la separazione tra la fascia luminosa centrale e la prima frangia chiara?

→ Esercizio simile: 16 a pag. 390.