

8. ONDE DI LUCE

8.1. È possibile osservare fenomeni di interferenza con la luce?

Nel precedente capitolo abbiamo studiato la figura d'interferenza prodotta in un ondoscopio da due sorgenti puntiformi. Vogliamo ora eseguire esperimenti simili con la luce, per vedere se essa possiede tutte le proprietà delle onde periodiche. Nel progettare un esperimento d'interferenza con la luce, occorre tener presenti alcune differenze importanti nel modo con cui è possibile osservare le onde alla superficie dell'acqua e le onde luminose. Le prime possono essere osservate da qualunque punto, purché l'occhio sia raggiunto dalla luce riflessa dalla superficie sulla quale si propagano le onde. È facile, per esempio, riconoscere una linea nodale in un ondoscopio, giacché possiamo vedere dove l'acqua non è perturbata. Immaginiamo ora di sostituire i due generatori puntiformi con due sorgenti di luce. Come possiamo scoprire se vi sono zone dove le onde luminose emesse dalle due sorgenti si annullano vicendevolmente, cioè zone corrispondenti alle linee nodali dell'ondoscopio? Nel caso dell'ondoscopio le onde sono chiaramente visibili, ma non ci è possibile guardare attraverso un fascio luminoso e vedere le onde di luce (vedi Fig. 1.10). Per vedere la luce, dobbiamo porre i nostri occhi direttamente lungo il percorso dei raggi luminosi o collocare uno schermo riflettente lungo il percorso stesso e osservare la luce che ne viene riflessa.

Potete farvi un'idea del problema relativo alla rivelazione dell'interferenza della luce se immaginate di dover studiare l'interferenza delle onde alla superficie dell'acqua in una stanza completamente buia, in cui l'acqua non si vede. In tali condizioni le linee nodali possono essere localizzate immergendo il dito nell'acqua e muovendolo lentamente attraverso l'ondoscopio: quasi sempre sentiremo l'acqua muoversi su e giù, ma quando ci troviamo in una linea nodale, non sentiremo alcun moto. Similmente, per osservare le onde luminose possiamo, sia muovere l'occhio, sia collocare uno schermo riflettente lungo il percorso della luce. Là dove le onde sono rinforzate, in corrispondenza sullo schermo potremo vedere la luce mentre là dove esiste una linea nodale, sullo schermo vedremo una zona scura.

Quali angoli formano queste righe oscure e luminose? Abbiamo visto che nella figura d'interferenza generata da due sorgenti puntiformi in un ondoscopio gli angoli tra le linee nodali dipendono dal rapporto λ/d . Per una data lunghezza di onda λ , questi angoli aumentano al diminuire della distanza d tra le sorgenti. Già sappiamo che la lunghezza d'onda delle onde luminose è molto minore di un decimo di millimetro (paragrafo 6.7); pertanto, per poter osservare una separazione nelle linee nodali a una distanza ragionevole dalle sorgenti, occorre che queste siano molto vicine. Ciò comporta che le sorgenti siano molto piccole.

Inoltre, per poter osservare chiaramente le linee nodali, occorrono sorgenti che emettano onde di lunghezza definita, o al massimo uno spettro di lunghezze d'onda poco diverse, altrimenti le linee nodali corrispondenti a una lunghezza d'onda saranno coperte dalle creste corrispondenti alle altre. Immaginate per esempio che ciascuna sorgente emetta onde di due diverse lunghezze dalle quali risultano le configurazioni delle Figg. 7.6 e 7.9. La figura risultante sarebbe una combinazione delle due configurazioni mostrate nelle fotografie, e in essa non vi sarebbero punti in quiete.

Nella discussione che segue supporremo perciò che la luce abbia uno spettro di lunghezze d'onda così limitato che le linee nodali, anche se un po' confuse, non vengano distrutte.

Immaginate di avere due sorgenti luminose molto piccole a distanza d , anch'essa piccola, e che uno schermo sia collocato a una grande distanza L da esse, come è indicato nella Fig. 8.1. Tale disposizione sembra simile a quella di un ondoscopio nel quale si trovano due sorgenti di onde circolari. Conseguentemente, dai risultati dei paragrafi 7.4 e 7.5, dovremmo aspettarci di vedere sullo schermo una configurazione di zone oscure e zone luminose (*figura di interferenza*). Le zone luminose dovrebbero essere le regioni dove le onde luminose provenienti dalle due sorgenti si rinforzano, e le zone oscure dovrebbero corrispondere alle regioni dove le onde si annullano. Analogamente a quanto accade

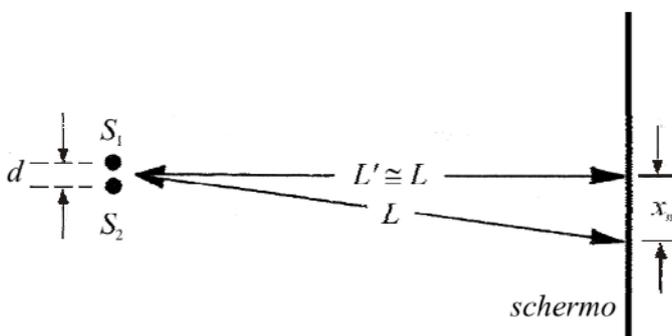


Fig. 8.1. Questo dispositivo ricorda la disposizione sperimentale per la produzione dell'interferenza nell'ondoscopio. Ma con due sorgenti ordinarie di luce indipendenti S_1 e S_2 l'interferenza non ha luogo. Nessuna figura di interferenza appare sullo schermo. Usando invece particolari sorgenti di luce con fase bloccata, chiamate laser, è possibile ottenere una figura d'interferenza con questa geometria sperimentale (paragrafo 8.3).

nell'ondoscopio, se le due sorgenti emettono onde in fase, dovrebbe esserci una zona luminosa nella parte mediana dello schermo. Su ciascun lato di questa zona luminosa centrale dovrebbero esserci zone oscure in corrispondenza delle regioni in cui le prime linee nodali incontrano lo schermo; allontanandosi dal centro della figura di interferenza, le zone luminose e oscure dovrebbero alternarsi.

In tale configurazione di zone luminose e oscure alternate, il centro della n -esima zona oscura da ciascun lato dovrebbe cadere a una distanza

$$x_n = \left(n - \frac{1}{2}\right)L(\lambda/d) \quad [8.1]$$

dal centro della figura di interferenza, se x_n è molto minore di L in modo che sia $L' \cong L$. Conseguentemente la distanza fra i centri di due zone oscure consecutive x_{n-1} e x_n è data da:

$$\Delta x = x_n - x_{n-1} = \left(\left(n - \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d}L - \left(\left(n-1\right) - \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d}L \right) = \frac{\lambda}{d}L. \quad [8.2]$$

Inoltre, come nell'ondoscopio, se una delle due sorgenti emette onde con un ritardo di fase f rispetto all'altra, la configurazione dovrebbe spostarsi lateralmente, rispetto al centro dello schermo, di una frazione f della distanza tra le due zone oscure. Riusciamo a osservare queste figure d'interferenza? Già sappiamo che se la luce si comporta come un'onda la sua lunghezza d'onda deve essere molto più piccola di un decimo di millimetro. Conseguentemente, per le normali sorgenti luminose, λ/d sarà una frazione molto piccola. Possiamo tuttavia scegliere una distanza L molto grande dallo schermo, per cui dovrebbe essere possibile vedere le righe luminose e le righe oscure.

In realtà, se adottiamo la disposizione ora descritta, non vedremo mai una figura di interferenza. Comunque si vari d o L , lo schermo è sempre uniformemente illuminato.

Questa impossibilità di osservare una figura di interferenza dimostra forse che il modello ondulatorio della luce non è valido? Non necessariamente. Come abbiamo ora ricordato, la figura di interferenza prodotta da due sorgenti dipende da λ , da d , e anche dal ritardo di fase f . Se il ritardo di fase tra le sorgenti varia rapidamente, le linee nodali, e quindi le righe oscure sullo schermo, devono mutare rapidamente posizione. L'occhio non può seguire questi rapidi cambiamenti, e così lo schermo apparirà uniformemente illuminato. In altre parole, è possibile che le figure d'interferenza si producano, ma che noi non riusciamo a vederle perché esse si muovono troppo rapidamente.

8.2. Interferenza delle onde luminose: esperimento di Young

Possiamo dimostrare che l'incapacità di osservare l'interferenza nell'esperimento ora descritto è dovuta ai rapidi sfasamenti. Per fare ciò, possiamo ricorrere a un artificio introdotto nel 1801 da Thomas Young (1773-1829). Egli trovò un metodo semplice per fissare la fase relativa di due sorgenti luminose, in modo che la figura d'interferenza che si forma non vari rapidamente nel tempo. L'accorgimento consiste nel far uso di una sola sorgente luminosa e nel dividere la luce proveniente da essa in due parti in fase fra loro. Queste due parti, che si comportano come se provenissero da due sorgenti in fase, possono sovrapporsi e quindi interferire. Con il metodo di Young, siamo in grado di trovare la figura d'interferenza prevista su uno schermo distante.

La disposizione sperimentale di Young è schematizzata nella Fig. 8.2. Egli usò come unica sorgente

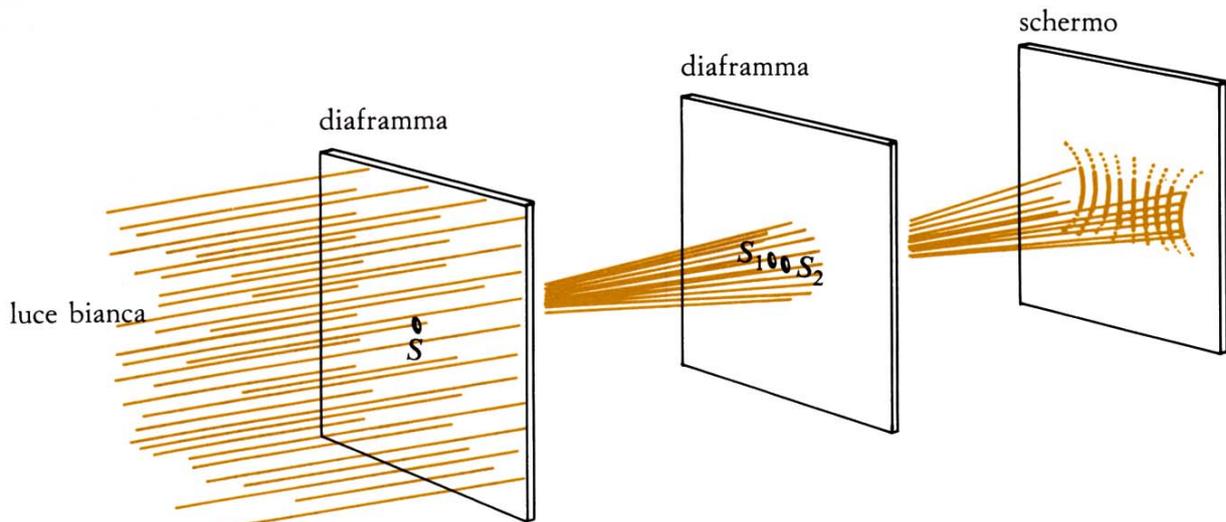


Fig. 8.2. L'esperimento di Young. La luce solare che raggiunge lo schermo provenendo dai forellini S_1 e S_2 arriva tutta dal forellino S . Sullo schermo si può vedere una figura di interferenza.

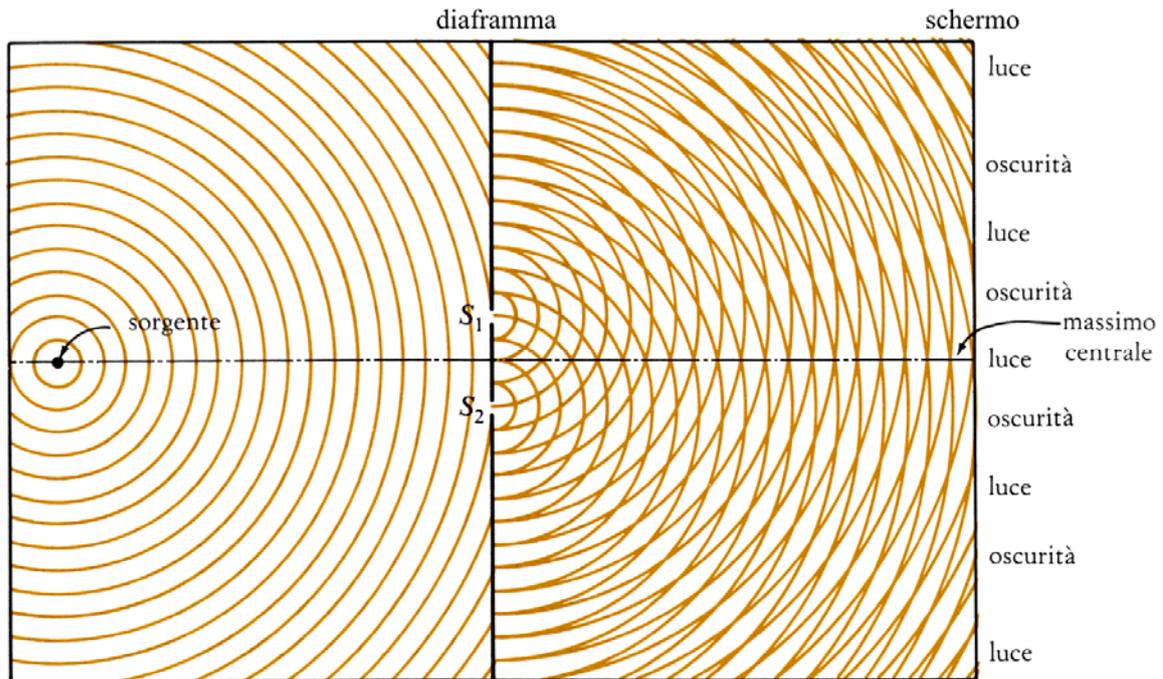


Fig. 8.3. Le onde emesse da una sorgente luminosa lineare, passando per le fenditure S_1 e S_2 , interferiscono producendo strisce alternativamente luminose e oscure su uno schermo. In questa rappresentazione schematica la larghezza delle fenditure è minore della lunghezza d'onda.

luminosa la luce solare che passava attraverso un piccolo foro. La luce uscente da questo forellino cadeva su un diaframma opaco sul quale erano praticati due fori di spillo vicinissimi fra loro ed equidistanti dalla sorgente. La luce proveniente dalla sorgente costituita da un forellino attraversava simultaneamente in ogni istante gli altri due fori di spillo; la luce in questi due fori di spillo giungeva quindi sempre in fase. Con tale dispositivo, la figura d'interferenza ottenuta con la luce uscente dalla coppia di fori di spillo non variava nel tempo e poteva essere osservata.

Oggi possiamo eseguire questo esperimento più facilmente. Sostituiamo la luce solare e la sorgente costituita da un piccolo foro con una lampada a incandescenza dotata di un filamento lungo e rettilineo; e sostituiamo i due fori di spillo nel diaframma opaco con due fenditure lunghe e sottili. Le fenditure devono essere molto vicine fra loro (a una distanza di circa 0.8 mm) e disposte con la loro dimensione maggiore parallela al filamento lineare. La Fig. 8.3 è un disegno schematico del sistema di onde che produce l'interferenza, con la sorgente lineare e le fenditure viste dall'alto. È molto chiara l'analogia con la figura che si produce in un ondoscopio. Se tenete la pagina al livello dell'occhio e guardate dal margine destro della figura in direzione della sorgente, si possono vedere distintamente le linee nodali. Esse sono zone in cui la perturbazione risultante è nulla e quindi zone di assenza di luce; esse sono state contrassegnate in figura con la dicitura «scuro» dove intersecano lo schermo. Sullo schermo, dovremmo vedere una figura d'interferenza costituita da zone alternate luminose e scure, di vari colori. Le righe sono parallele alle fenditure, con una riga luminosa al centro, proprio com'è previsto dal modello ondulatorio.

Possiamo registrare in modo permanente su una pellicola la figura di interferenza così ottenuta collocando una macchina fotografica davanti allo schermo bianco. Una fotografia ottenuta con questo metodo è riprodotta nella Fig. 8.4. Figure di interferenza della luce rossa e della luce blu-violetta, ottenute esattamente con lo stesso dispositivo sperimentale usato per produrre la figura di interferenza della luce bianca nella Fig. 8.4, sono riprodotte nella Fig. 8.5.

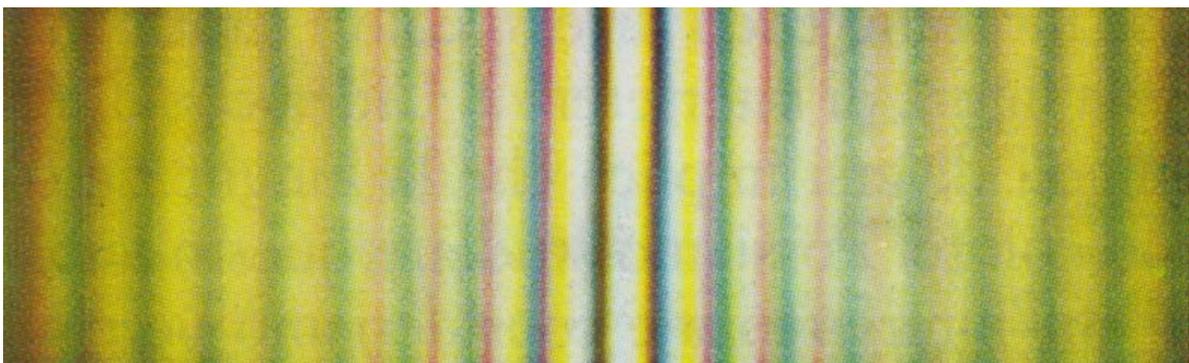


Fig. 8.4. Figura di interferenza prodotta dalla luce bianca che attraversa due sottili fenditure.

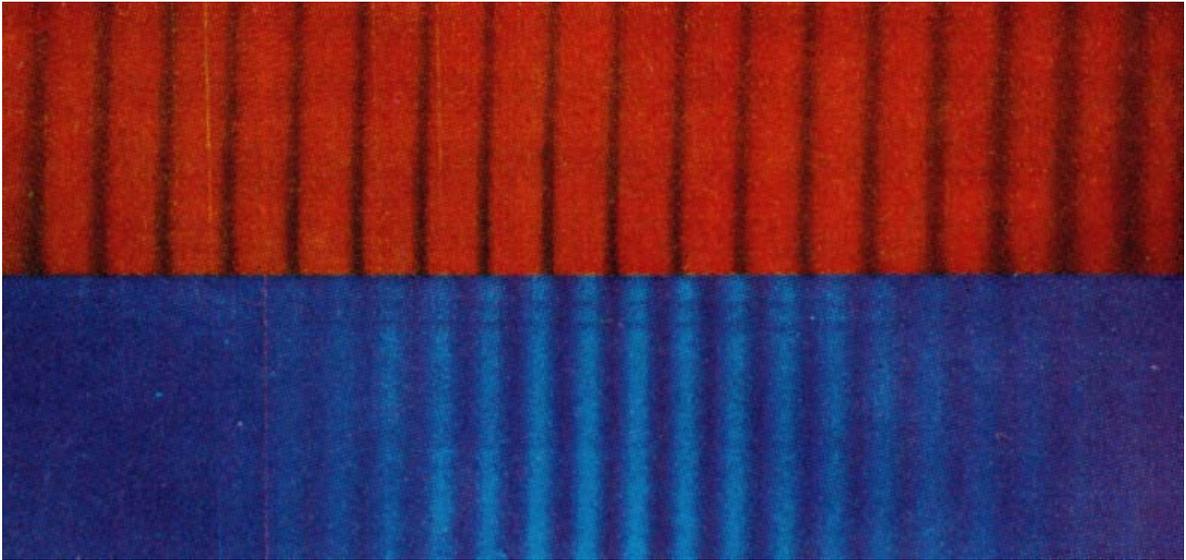


Fig. 8.5. Figure di interferenza della luce rossa e della luce blu-violetta ottenute esattamente con lo stesso dispositivo sperimentale usato per produrre la figura di interferenza della luce bianca nella Fig. 8.4.

Quesiti

- 8.1.** Che cosa vedreste nella Fig. 8.3 se copriste la sorgente S_2 ?
- 8.2.** Nella Fig. 8.3, come varierebbe la figura sullo schermo se:
- lo schermo di osservazione fosse più distante dall'ostacolo?
 - la distanza fra S_1 e S_2 fosse maggiore?

8.3. La fase delle sorgenti di luce: gli atomi

In un ondoscopio possiamo disporre due generatori con qualsivoglia ritardo di fase, avviarli e farli funzionare per tutto il tempo desiderato. Un controllo del genere non è invece possibile sulle sorgenti luminose, come è dimostrato dalla nostra incapacità di osservare l'interferenza tra due onde luminose, se non si fa ricorso al metodo di Young (o a qualche altro metodo simile) per fissare la fase relativa delle due sorgenti. Per capire perché il ritardo di fase fra due sorgenti cambia di solito rapidamente, consideriamo due sorgenti luminose separate. La luce che proviene da ciascuna di esse ha origine da un gran numero di atomi singoli, ciascuno dei quali emette un pacchetto di onde luminose per un brevissimo intervallo di tempo. Quando eccitiamo le sorgenti, diamo inizio al processo generale di emissione della luce, ma non possiamo controllare i singoli atomi; essi emettono pacchetti di onde luminose intervallati fra loro nel tempo a caso.

Per capire il significato di tale situazione in rapporto agli esperimenti di interferenza consideriamo una coppia di atomi, uno in ciascuna sorgente. Con tutta probabilità questi atomi emetteranno luce sfasati fra loro di una certa frazione f_1 . Le onde luminose provenienti da questi due atomi produrranno una figura d'interferenza che dipende dal valore di f_1 . Un istante dopo, questi particolari atomi avranno cessato di irradiare, per cui dovremo considerare un'altra coppia di atomi che in quell'istante stanno emettendo onde luminose.

Giacché non possiamo influenzare in alcun modo il loro comportamento, anche questi atomi saranno certamente fuori fase, ma questa volta, con tutta probabilità, di una diversa frazione f_2 . Essi pertanto produrranno una differente figura di interferenza. Consideriamo successivamente una terza coppia di atomi e così via. È stato trovato che un intervallo di tempo tipico durante il quale un atomo emette luce, è di circa 10^{-9} s. Se supponiamo che un solo atomo di ciascuna sorgente irraggi in ogni istante, occorre cambiare atomo ogni 10^{-9} s perché la radiazione sia continua. Allora anche la figura d'interferenza cambierebbe in maniera irregolare ogni 10^{-9} s. Poiché tale mutamento è certamente troppo rapido perché l'occhio possa seguirlo, non vedremo alcuna figura di interferenza.

In realtà vi sono molti atomi che irradiano simultaneamente per cui in ogni istante la figura d'interferenza sarà determinata dalla sovrapposizione di onde luminose provenienti da tutti gli atomi. Concentriamo ora la nostra attenzione su tutti gli atomi di una sola sorgente che a un dato istante stiano irradiando. Essi avranno terminato di irradiare in circa 10^{-9} s e, a quell'istante, una nuova serie di atomi di



Fig. 8.6. Poiché la sorgente è lontana dalle fenditure, i percorsi da ogni atomo della sorgente alle fenditure sono quasi paralleli, e le distanze quasi uguali.

quella sorgente staranno emettendo luce. Conseguentemente, la fase della sorgente avrà cambiato a caso proprio come se passassimo da un singolo atomo ad un altro. Il cambiamento di fase avviene pertanto in ciascuna sorgente in circa 10^{-9} s, e la figura d'interferenza cambia rapidamente in questo medesimo intervallo di tempo. Nessuna meraviglia quindi se non possiamo vedere alcuna figura d'interferenza.

Quando usiamo il metodo di Young per ottenere una figura d'interferenza, l'onda luminosa emessa da ciascun atomo di una singola sorgente passa attraverso due fenditure. Queste sono a distanza tale dalla sorgente che le onde provenienti da ogni atomo percorrono lo stesso cammino per giungere a ciascuna fenditura (Fig. 8.6). Si ha come risultato che le onde passando attraverso le fenditure se ne allontanano con un ritardo di fase non apprezzabile; le fenditure pertanto si comportano come sorgenti di onde in fase tra loro. Possiamo quindi vedere l'interferenza prevista, sullo schermo al di là di esse.

A partire dagli anni 60 del secolo scorso, sono state messe a punto alcune sorgenti luminose di notevole importanza. In queste sorgenti, gli atomi, situati in solidi o in gas sono costretti a emettere luce non in maniera casuale bensì pressoché in fase, poiché ogni atomo tende a controllarne un altro. La condizione di fase fissata può essere mantenuta per un tempo migliaia di volte maggiore dei 10^{-9} s durante i quali un singolo atomo situato in un filamento incandescente emette luce. Questi dispositivi sono detti *laser* (parola composta con le iniziali dell'espressione inglese *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione).

In un esperimento eseguito nel 1963, due laser indipendenti furono fatti funzionare come sorgenti in fase e si poterono vedere le frange d'interferenza della luce, in perfetta analogia con la figura d'interferenza che si osserva in un ondoscopio prodotta da due generatori di onde indipendenti. Ma una difficoltà tecnica impedì che questo esperimento fosse semplice. Sebbene la «messa in fase» fosse buona, non si poterono rendere le lunghezze d'onda esattamente uguali, e ciò fece sì che la posizione della frangia centrale si spostasse rapidamente sullo schermo, proprio come la figura che si produce in un ondoscopio si sposta quando i due generatori funzionano a frequenze lievemente diverse. Le frange prodotte dai laser si spostavano così rapidamente che fu necessario usare le tecniche ad alta velocità della televisione per fare una «istantanea» delle frange in una sola posizione.

8.4. Colore e lunghezza d'onda della luce

La fotografia della Fig. 8.4 è stata eseguita facendo passare la luce emessa da una piccola sorgente attraverso due fenditure parallele poste a breve distanza l'una dall'altra; la luce uscente dalle due fenditure è raccolta dall'obiettivo di una macchina fotografica e forma la figura di interferenza sulla pellicola fotografica. È importante notare che la zona luminosa nel centro (detta *massimo centrale*) è bianca, ma che i margini delle zone luminose ai lati sono colorati.

La luce bianca è una combinazione di tutti i colori e i margini colorati delle zone luminose indicano che i diversi colori subiscono deviazioni con angoli diversi nella figura di interferenza. L'idea che differenti colori interferiscano con angoli diversi implica che la lunghezza d'onda della luce è associata al suo colore. Possiamo studiare questo fatto eseguendo ulteriori esperimenti sull'interferenza e consideriamo perciò la figura di interferenza della luce di un solo colore (monocromatica).

Nella Fig. 8.5 prendiamo in considerazione la figura di interferenza per la luce rossa soltanto. La figura è costituita da una serie di zone (frange) alternativamente luminose e oscure, le zone oscure corrispondono alle linee nodali. La distanza tra due frange nella fotografia dipende dalla distanza d tra le due fenditure, dalla distanza L tra le fenditure e la lastra fotografica (o schermo) e dalla lunghezza d'onda della luce. Di conseguenza, quando sono note le distanze d e L , la distanza tra le frange nella fotografia indica la lunghezza d'onda della luce. Come abbiamo visto nel paragrafo 8.1 (relazione [8.2]), la distanza Δx tra due frange scure consecutive è data da:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{d} L. \quad [8.3]$$

Dalla [8.3] si ricava la lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{d}{L} \Delta x. \quad [8.4]$$

Se si misura la larghezza di un grande numero di frange e si divide per il numero delle frange considerate, è possibile ottenere un valore abbastanza preciso di Δx con cui calcolare la lunghezza d'onda λ . Nel caso della luce rossa la lunghezza d'onda risulta essere:

$$\lambda_{\text{rosso}} = 6.5 \times 10^{-7} \text{ m}. \quad [8.5]$$

Possiamo seguire lo stesso procedimento appena descritto con la luce di qualsiasi altro colore. Per esempio, se usiamo un filtro di colore blu-violetto (Fig. 8.5) per rendere monocromatica la luce bianca, otteniamo la lunghezza d'onda:

$$\lambda_{\text{blu-viola}} = 4.5 \times 10^{-7} \text{ m}. \quad [8.6]$$

Altre lunghezze d'onda, misurate in modo analogo, sono indicate nella Tab. 8.1.

Tab. 8.1. Lunghezze d'onda della luce nel vuoto.

A. Lunghezze d'onda in nanometri (nm) dei colori dello spettro. Lo spettro visibile si estende da circa 400 nm per il violetto scuro a circa 750 nm per il rosso scuro. (1nm = 10 ⁻⁹ m)				
	Violetto			< 450
	Azzurro			450 – 500
	Verde			500 – 570
	Giallo			570 – 590
	Arancio			590 – 610
	Rosso			> 610
B. Lunghezze d'onda in nanometri di alcune delle più intense righe visibili negli spettri di emissione di alcuni gas comuni.				
Litio	Neon	Sodio	Mercurio	Potassio
610.36	540.06	589.0	435.84	404.4
670.78	583.25	589.6	546.07	404.7
	585.25			
	640.22			

I colori associati a lunghezze d'onda definite sono conosciuti come colori dello spettro e sono gli stessi che si vedono nell'arcobaleno. Non tutti i colori che vediamo sono di questo tipo, per esempio il porpora non è un colore dello spettro. Se eseguiamo un esperimento di interferenza per analizzare la luce che ha attraversato un filtro porpora, troviamo che essa è costituita da luce azzurra e rossa. La visione dei colori è in realtà assai complessa; talvolta vediamo quello che sembra un colore dello spettro, ma in realtà nei nostri occhi entra soltanto luce di diverse lunghezze d'onda. L'analisi della luce, effettuata localizzando i massimi e i minimi in una figura di interferenza, permette di caratterizzare la luce con precisione mediante la lunghezza d'onda. Le figure di interferenza estendono pertanto la nostra conoscenza molto al di là di quanto riusciamo ad apprendere mediante osservazioni fatte a occhio nudo.

Gli esperimenti descritti sono tali che voi li potete facilmente ripetere. In effetti, potete verificare la nostra valutazione delle lunghezze d'onda della luce rossa e della luce blu-violetta eseguendo alcune misure sulla Fig. 8.5. Questa fotografia è stata eseguita con una sola sorgente di luce bianca e due fenditure. Le due figure di interferenza, una sopra l'altra, che si vedono nella Fig. 8.5 sono state ottenute collocando un filtro di colore rosso sopra un filtro di colore blu-violetto sul percorso della luce tra la sorgente e la pellicola fotografica. Il rapporto delle distanze tra le righe nelle due parti della fotografia dovrebbe corrispondere al rapporto delle lunghezze d'onda della luce rossa e della luce blu-violetta. Misurando la distanza tra le righe nelle due parti della fotografia, troviamo che la distanza tra le righe rosse è maggiore di quella tra le righe blu-violette di un fattore pari a circa 1.4. Possiamo confrontare questo valore con il rapporto fra le lunghezze d'onda misurate indipendentemente; tale rapporto è:

$$\frac{\lambda_{\text{rosso}}}{\lambda_{\text{blu-viola}}} = \frac{6.5 \times 10^{-7} \text{ m}}{4.5 \times 10^{-7} \text{ m}} \cong 1.4 \quad [8.7]$$

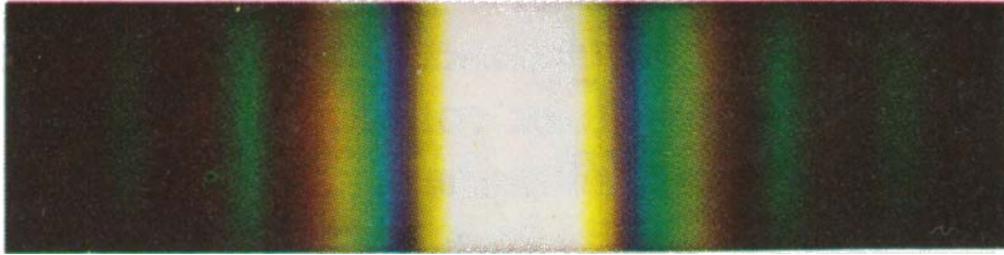


Fig. 8.7. *Figura di diffrazione* prodotta da luce bianca che attraversa una fenditura singola.

Siamo ora riusciti a dimostrare che i colori dello spettro sono in relazione diretta con la lunghezza d'onda della luce. La lunghezza d'onda della luce di un determinato colore è stata calcolata misurando la distanza tra le frange nella figura di interferenza prodotta da due fenditure. Abbiamo così a disposizione uno spettroscopio primitivo di cui comprendiamo il funzionamento.

Uno spettroscopio molto più efficiente, in grado di separare i colori della luce per interferenza, può essere costruito usando molte fenditure equidistanti fra loro. L'effetto di molte fenditure è quello di rendere più intensa la luce che emerge dalle fenditure in ogni direzione e di rendere più netti i massimi per ogni lunghezza d'onda. Questi dispositivi, detti spettroscopi a reticolo, vengono usati comunemente per separare la luce nelle lunghezze d'onda da cui è costituita. Per alcuni scopi, questi spettroscopi sono migliori di quelli che utilizzano un prisma per scomporre la luce in uno spettro di colori.

Quesiti

-
- 8.3.** Una figura di interferenza prodotta da una doppia fenditura è stata ottenuta con la luce gialla del sodio, e si nota una distanza di 1 mm tra i nodi. Quale distanza vi sarebbe tra i nodi se nello stesso sistema venisse usata la luce violetta del potassio?
- 8.4.** La figura di interferenza rossa e quella azzurra nella Fig. 8.5 sono state ottenute con la stessa fenditura doppia. Affinché i nodi per la luce rossa coincidano con i nodi per la luce azzurra, le fenditure dovrebbero essere più vicine o più lontane tra loro?
- 8.5.** Nella Fig. 8.5 i nodi per la figura di interferenza rossa e quelli per la figura di interferenza azzurra sono allineati vicino al centro della fotografia.
- (a) Quante righe rosse e quante righe azzurre contate fino al punto in cui i nodi si allineano di nuovo?
- (b) Che cosa vi dice questo fatto riguardo al rapporto fra le lunghezze d'onda dei due colori?
- 8.6.** Una sorgente di luce rossa produce interferenza attraverso due fenditure strette separate da una distanza $d = 0.01$ cm.
- (a) A quale distanza dalle fenditure si dovrebbe collocare uno schermo in modo che le prime scarse righe di interferenza siano separate da una distanza di un centimetro?
- (b) Quale sarà la distanza tra le righe se si usa luce violetta?
-

8.5. Diffrazione: un effetto di interferenza dovuto a una sola fenditura?

Se realizziamo una fenditura singola con una lametta da barba (o con un ago per ottenere un'apertura lievemente più larga) e guardiamo una sorgente di luce bianca attraverso la fenditura così ottenuta, vediamo qualcosa di simile alla fotografia della Fig. 8.7: una zona centrale larga luminosa, racchiusa tra zone colorate meno luminose. Con luce monocromatica la figura osservata è identica. La Fig. 8.8 mostra ciò che si ottiene usando una sorgente di luce rossa: una regione centrale luminosa e ai lati zone oscure alternate a zone luminose progressivamente meno intense.



Fig. 8.8. *Figura di diffrazione* prodotta da luce rossa che attraversa una fenditura singola.

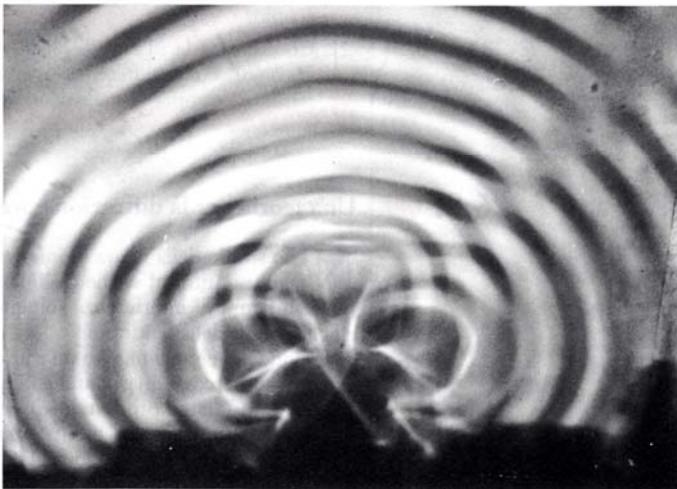


Fig.8.9. Figura di diffrazione di onde rettilinee che attraversano una fenditura e, sotto, una figura di interferenza di una serie di sorgenti puntiformi allineate ed equidistanti l'una dall'altra che si estendono attraverso la fenditura. Vicino alle sorgenti l'effetto della loro distanza determina una certa differenza nelle figure di diffrazione. Lontano dalle sorgenti le due figure sono identiche.

trovare esaminando accuratamente il comportamento della luce mentre attraversa una fenditura stretta che è tuttavia larga molte lunghezze d'onda.

Nella Fig. 6.20 vediamo come le onde rettilinee che si propagano attraverso una fenditura stretta in un ondoscopio divergono o si diffrangono. Le onde sul lato lontano dell'ostacolo derivano dalla propagazione delle creste e delle valli che entrano nella fenditura. Invece di produrre le creste e le valli nella fenditura facendo incidere su di essa un'onda rettilinea, sembra possibile produrle con una serie di sorgenti puntiformi allineate che si muovono simultaneamente su e giù nella posizione occupata dalla fenditura. Per verificare questa possibilità, sostituiamo la fenditura con una serie di sorgenti puntiformi allineate, separate da una distanza pari a una piccola frazione di una lunghezza d'onda. Useremo un numero di sorgenti tanto grande quanto basta per occupare esattamente lo spazio della fenditura originale. Se ora facciamo funzionare le sorgenti in accordo di fase e alla stessa frequenza dell'onda originale, vediamo (Fig.8.9) che la figura prodotta somiglia realmente alla figura di diffrazione della fenditura.

Sembra pertanto ragionevole pensare che le configurazioni di onde che si formano quando onde rettilinee vengono diffratte da una fenditura siano uguali alle configurazioni formate dalle onde emesse da un grande numero di sorgenti puntiformi distribuite uniformemente attraverso la fenditura. Supporremo ora vero questo fatto e cercheremo di spiegare le figure di interferenza prodotte attraverso fenditure singole sovrapponendo le onde emesse dalle sorgenti puntiformi entro la fenditura. Huygens applicò questo procedimento, che consiste nel prevedere la propagazione delle onde sostituendo i fronti d'onda con sorgenti, a numerosi problemi comprendenti la riflessione e la rifrazione.

Benché la configurazione in cui sono rappresentate alternativamente zone luminose e zone oscure differisca dalla figura di interferenza di Young, essa presenta una particolare analogia con una figura di interferenza. Con luce monocromatica si producono nodi e massimi, mentre quando viene usata luce bianca si generano effetti cromatici. Poiché questo effetto di interferenza si produce con una fenditura singola, può sembrare che l'interpretazione della figura di interferenza di Young non sia valida. Per chiarire questa situazione, esamineremo più attentamente il comportamento della luce che attraversa una fenditura singola.

Se riconsideriamo quanto abbiamo detto a proposito della diffrazione delle onde per opera di una fenditura (paragrafo 6.7), notiamo che la fenditura singola non si comporta come una sorgente puntiforme di onde a meno che la sua larghezza non sia minore di una lunghezza d'onda. Normalmente, le fenditure che si usano per osservare la diffrazione o l'interferenza della luce hanno una larghezza molto maggiore della lunghezza d'onda della luce (sia le fenditure più strette incise con una lametta da barba sia le aperture più larghe eseguite con un ago sono larghe molte lunghezze d'onda).

In genere queste fenditure sono larghe 10^{-1} mm, mentre la lunghezza d'onda della luce è compresa tra 4×10^{-4} mm e 7×10^{-4} mm.

L'interpretazione delle figure di interferenza prodotte dalla luce che ha attraversato fenditure singole si deve quindi

Quesiti

- 8.6. In un ondoscopio si può osservare una figura di diffrazione se onde rettilinee si propagano attraverso una fenditura stretta. In quale altro modo si riesce a produrre una figura di diffrazione in un ondoscopio?
- 8.7. Confrontate la Fig. 8.7 con la parte superiore della Fig. 8.5. Quali differenze osservate tra la figura prodotta da una fenditura doppia e quella prodotta da una fenditura singola?

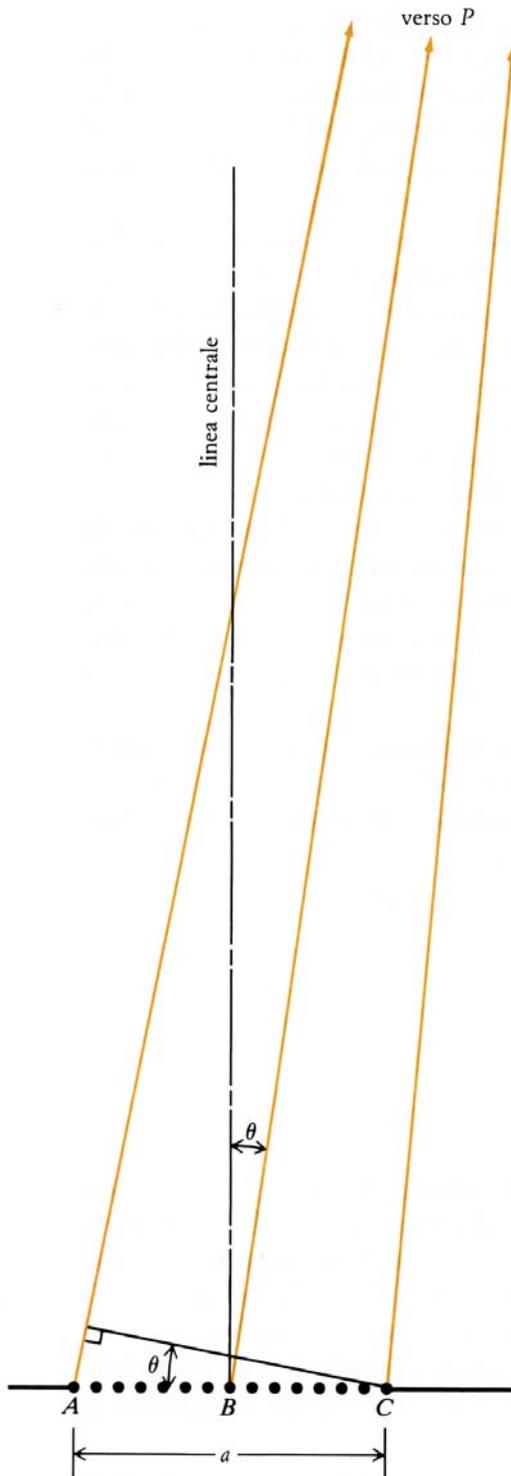


Fig. 8.10. I raggi luminosi congiungenti le varie sorgenti con un punto lontano P sono praticamente paralleli. Tuttavia se il punto lontano non si trova sulla linea centrale, i cammini hanno lunghezze diverse.

8.6. Una teoria per la diffrazione prodotta da una fenditura

Nello studio della figura di interferenza prodotta da una serie di sorgenti puntiformi vicine e allineate entro una fenditura, considereremo la figura di interferenza soltanto a distanze molto grandi rispetto alla larghezza della fenditura.

Le onde che raggiungono un punto lontano si sono allontanate dalle sorgenti su percorsi quasi paralleli (Fig. 8.10). Consideriamo dapprima l'onda risultante prodotta dalle sorgenti in un punto lontano situato di fronte. Praticamente il punto è ugualmente distante da tutte le sorgenti e quindi le creste prodotte da tutte le sorgenti arrivano insieme in quel punto.

Questo rafforzamento di tutte le singole onde significa che onde molto ampie si propagano a partire dalla fenditura lungo la linea centrale.

Esaminiamo ora un punto P situato a una certa distanza dalla linea centrale, in modo che l'angolo θ fra BP e questa linea nella Fig. 8.10 non sia più nullo (il punto B è al centro della fenditura). Poiché PB è sostanzialmente parallelo a PA , anche l'angolo tra PA e l'asse della fenditura è uguale a θ . Ma PA è perpendicolare al fronte d'onda e la linea centrale è perpendicolare alla linea delle sorgenti, quindi anche l'angolo tra il fronte d'onda e la linea delle sorgenti è uguale a θ . Il punto P ha distanze diverse dalle varie sorgenti e in particolare PC è più corto di PA . Le singole creste non arrivano in P nello stesso istante e l'onda risultante è più debole che lungo la linea centrale.

Allontaniamo ora P ulteriormente dalla linea centrale in modo che l'angolo aumenti finché la differenza dei segmenti che uniscono P ai due estremi della fenditura diventi:

$$\overline{PA} - \overline{PC} = \lambda. \quad [8.8]$$

In questo punto si ha $\sin \theta = \lambda/a$ (Fig. 8.11) e inoltre $\overline{PB} - \overline{PC} = \lambda/2$, come si vede nella stessa figura. Ora siamo in grado di dimostrare che le onde che vengono emesse dalle singole sorgenti e raggiungono sotto questo angolo un punto P qualsiasi lontano dalla linea centrale si annullano mutuamente. Per questo l'intensità risultante in questa direzione è nulla a grande distanza. Per spiegare tale fenomeno consideriamo coppie di sorgenti le cui onde si

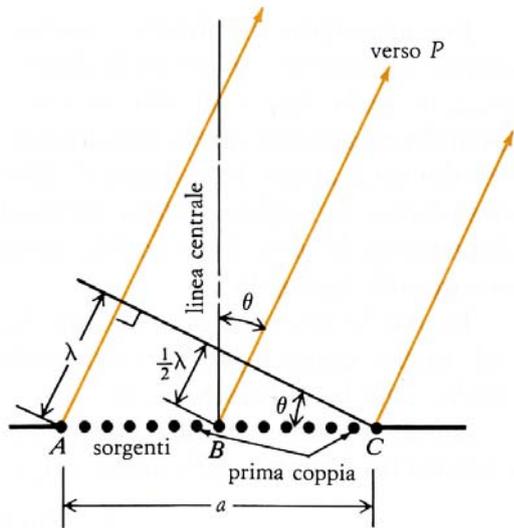


Fig. 8.11. Quando $\sin \theta = \lambda/a$, le onde emesse dalle sorgenti si annullano.

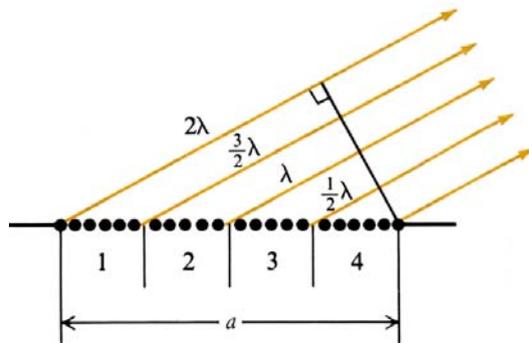


Fig. 8.12. Quando $\sin \theta = 2\lambda/a$, si produce l'annullamento.

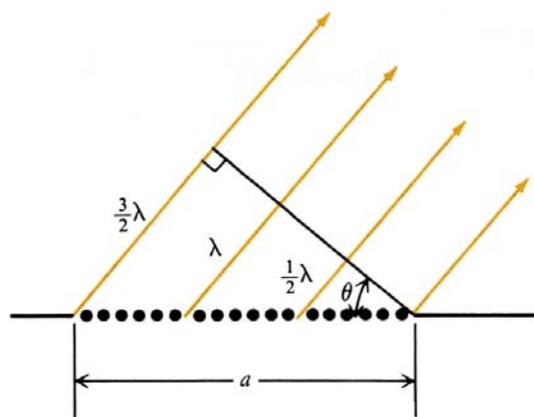


Fig. 8.13. Quando $\sin \theta = 3\lambda/2a$, si produce un rinforzo parziale.

Oltre il nodo in corrispondenza di $\sin \theta = 2\lambda/a$, all'aumentare di $\sin \theta$, l'intensità cresce fino a raggiungere un massimo ancora più debole vicino a $\sin \theta = \frac{5}{2}\lambda/a$ e decresce fino ad annullarsi di nuovo in corrispondenza di $\sin \theta = 3\lambda/a$. L'intensità continua a crescere e decrescere all'aumentare di θ , mentre i massimi diventano progressivamente più deboli, come è illustrato nella Fig. 8.14.

Ora abbiamo un modello che mette in relazione l'aspetto della figura di diffrazione prodotta da una fenditura con la larghezza della fenditura e la lunghezza d'onda della luce. Questo modello è in grado di interpretare le osservazioni che si compiono nella realtà?

annullino. Esaminiamo le sorgenti immediatamente a sinistra di C e di B; esse generano creste che giungono in P separate di mezza lunghezza d'onda. Ciò significa che arrivano in P una valle da una delle sorgenti e una cresta dall'altra, che si annullano reciprocamente.

Per la coppia successiva di sorgenti a sinistra, e cioè i secondi punti a sinistra di C e B rispettivamente, accade lo stesso; otteniamo lo stesso risultato per la terza coppia, la quarta e tutte le altre coppie successive. Abbiamo così sovrapposto gli effetti di tutte le sorgenti: esse si annullano tutte a due a due e, di conseguenza, in P non si produce alcuna perturbazione. Non importa in quale ordine sommiamo gli effetti di tutte le sorgenti: otteniamo sempre lo stesso risultato.

L'artificio di sommarle a due a due è semplicemente un metodo facile di determinare qual è il risultato. Abbiamo pertanto dimostrato che si produce un annullamento completo delle onde in corrispondenza dell'angolo θ dato da $\sin \theta = \lambda/a$.

All'aumentare dell'angolo θ , l'annullamento non è più totale e l'intensità aumenta. Essa raggiunge un valore massimo e poi diminuisce fino ad annullarsi di nuovo quando $\sin \theta = 2\lambda/a$. Possiamo spiegare l'annullamento in corrispondenza di questo angolo facendo riferimento alla Fig. 8.12. Tutte le sorgenti comprese nell'intervallo 1 indicato nella figura possono essere abbinare con quelle comprese nell'intervallo 2 in modo che tutte le coppie si annullino; e le sorgenti nell'intervallo 3 possono essere abbinare con quelle nell'intervallo 4 per produrre l'annullamento completo. L'intensità in questa direzione è quindi nulla.

È naturale attendersi un'intensità massima all'incirca a metà strada fra $\sin \theta = \lambda/a$ e, in prossimità del valore $\sin \theta = \frac{3}{2}\lambda/a$. In corrispondenza di questo angolo (Fig. 8.13), possiamo dividere la linea delle sorgenti in tre intervalli tali che le distanze dei loro estremi dal punto P sia uguale a $\frac{1}{2}\lambda$. Se abbiniamo le sorgenti nei due intervalli a destra troviamo che esse si annullano come prima. Rimane soltanto il terzo intervallo; gli effetti delle sorgenti situate ai suoi estremi si annullano, ma non esistono altre sorgenti che si possano abbinare e di conseguenza si produrrà almeno un rinforzo parziale in corrispondenza di $\sin \theta = \frac{3}{2}\lambda/a$, ma l'intensità è minore di quella che si osserverebbe lungo la linea centrale con un terzo delle sorgenti della fenditura. L'intensità della luce in questo massimo è perciò notevolmente minore di quanto è nel massimo lungo l'asse della fenditura dove tutte le sorgenti presenti nella fenditura contribuiscono a un rinforzo completo.

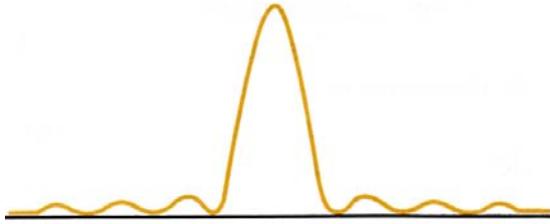


Fig. 8.14. Figura di diffrazione prodotta da una fenditura singola per la luce di un'unica lunghezza d'onda definita. L'intensità della luce è rappresentata verticalmente in funzione della distanza dalla linea centrale.

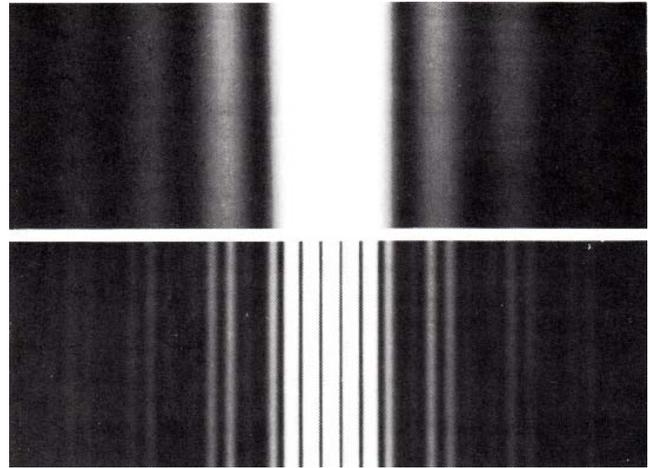


Fig. 8.15. Quando si usano due fenditure identiche, piuttosto larghe, per produrre una figura di interferenza e quando la distanza tra le due fenditure è confrontabile con la loro larghezza, la figura di interferenza che si ottiene combina le caratteristiche di una figura di diffrazione dovuta a una fenditura singola (sopra) e quelle di una figura di interferenza dovuta a due fenditure (Fig.8.16).

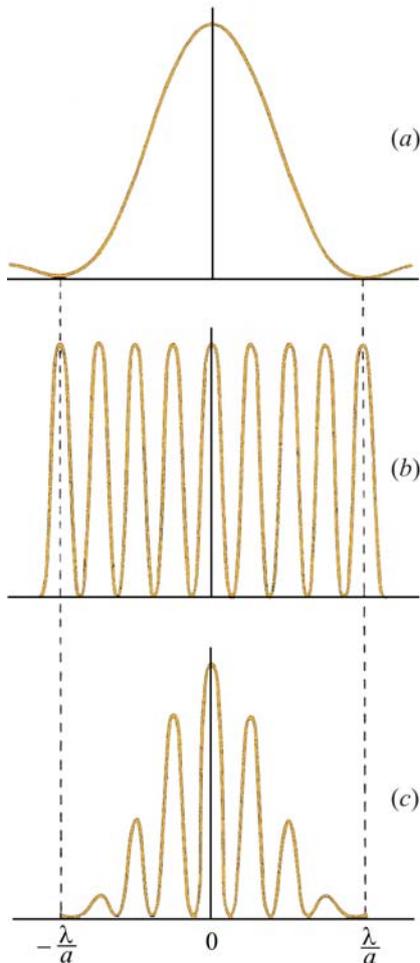


Fig. 8.16. Figura di difrazione di una doppia fenditura: (a) il termine di diffrazione; (b) il termine di interferenza; (c) l'effetto risultante (il prodotto dei due termini precedenti).

Questo esperimento è stato eseguito con fenditure molto strette (tagliate con due lamette da barba) e per tali fenditure la zona luminosa centrale della figura di diffrazione di ciascuna fenditura copre un angolo piuttosto grande. A una distanza abbastanza grande dalle fenditure, le zone luminose centrali sono in gran parte sovrapposte e in questa regione vediamo solo la figura relativa alla doppia fenditura. Gli altri massimi della figura di diffrazione dovute a una singola fenditura si producono a grande distanza lateralmente e sono troppo deboli per poter essere osservati. Per poterli vedere le fenditure dovrebbero essere più larghe (si vedano le Figg. 8.15 e 8.16).

Per accertarlo, dobbiamo costruire fenditure di larghezza nota con grande precisione e misurare le distanze dalla riga centrale alle zone scure presenti nella figura di diffrazione ottenuta con luce monocromatica. Quando eseguiamo queste misurazioni, troviamo che la distanza fra le linee dei nodi ai lati della figura di diffrazione è costante. Inoltre, come ci attendiamo, la larghezza della frangia luminosa centrale è il doppio della distanza tra le altre linee nodali, come possiamo verificare eseguendo le misure sulle Figg. 8.8 e 8.15.

Inoltre le intensità dei massimi decrescono al crescere della distanza dal centro, come è previsto dal modello. Abbiamo pertanto ragione di credere che la teoria sia valida.

Infine possiamo trovare la lunghezza d'onda della luce misurando la distanza fra il centro della figura e il primo nodo. Applicando la relazione:

$$\frac{x}{L} = \sin \theta = \frac{\lambda}{a} \quad [8.9]$$

troviamo i valori di λ per la luce dei vari colori. Questi valori sono uguali a quelli trovati usando due fenditure o uno spettroscopio a molte fenditure. La nostra interpretazione dell'esperimento di Young e della diffrazione prodotta da una fenditura singola è probabilmente corretta.

Ora siamo in grado di spiegare perché non dovevamo preoccuparci della figura di diffrazione dovuta alle fenditure singole quando abbiamo esaminato l'esperimento di Young.

Quesiti

- 8.8.** Perché il rinforzo parziale a cui si fa riferimento nella Fig. 8.13 per la figura di interferenza dovuta a una fenditura singola è molto minore del massimo centrale per la stessa fenditura?
- 8.9.** (a) Quando la luce gialla attraversa una fenditura larga 1 mm, quali sono gli angoli in corrispondenza dei quali si hanno i primi tre nodi nella figura di diffrazione?
 (b) Se la larghezza della fenditura è 10 mm?
 (c) Se la larghezza della fenditura è 0.1 mm?
- 8.10.** Nella Fig. 8.10, come verrà influenzata la figura di diffrazione:
 (a) se coprite la metà di destra delle sorgenti?
 (b) se coprite la quarta sorgente all'estrema sinistra e la quarta all'estrema destra?
- 8.11.** Come cambiereste il dispositivo sperimentale usato per ottenere la Fig. 8.15 in modo da avere un maggior numero di frange di interferenza da una doppia fenditura con la stessa larghezza della zona luminosa centrale della figura?
- 8.12.** Nel paragrafo 8.2 si è detto che le fenditure della Fig. 8.3 devono essere molto vicine tra loro. Perché le fenditure devono essere anche molto strette?

8.7. Come la luce bianca forma una figura di diffrazione colorata

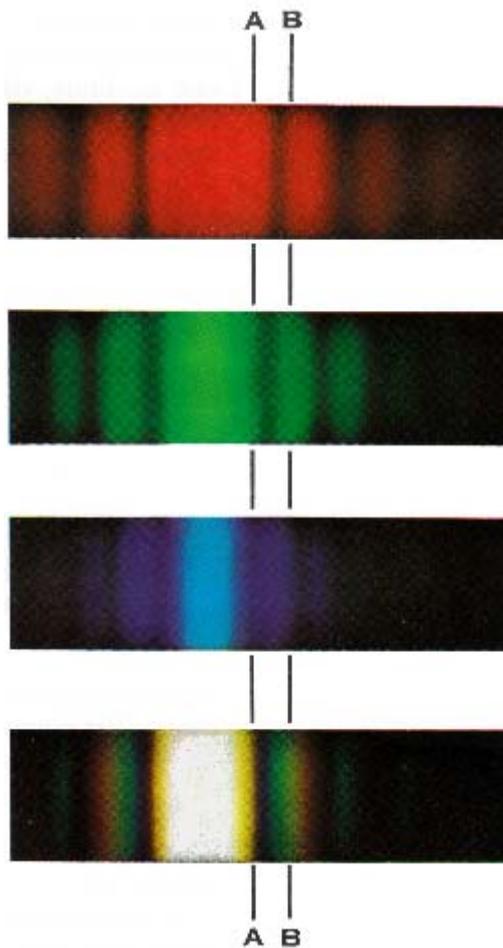


Fig. 8.17. Formazione di una figura di diffrazione in luce bianca a partire dalle figure di diffrazione dei colori dello spettro.

Nella fotografia di Fig. 8.17, dall'alto in basso, si vedono le figure di diffrazione formate dalla stessa fenditura in luce rossa, luce verde, luce azzurra e luce bianca. Se si osserva lungo la linea centrale, si vedrà che la luce di ogni colore dello spettro ha intensità massima. La combinazione di questi colori appare bianca nella figura di diffrazione in basso. Si guardi lungo la linea AA. La luce rossa è moderatamente intensa, la luce verde è quasi assente e la luce azzurra è praticamente scomparsa. Nella figura di diffrazione in luce bianca si vede il rosso. Lievemente a sinistra della linea AA, oltre al rosso, vi sono il verde e il blu e, perciò si vede il giallo nella figura di diffrazione in luce bianca. A destra della linea AA il rosso scompare, ma l'intensità dell'azzurro aumenta: cosa si vede nella figura di diffrazione in luce bianca?

Si guardi ora lungo la linea BB, un po' più a destra della linea AA. Qui la luce rossa è quasi assente, la luce verde è brillante e la luce azzurra è quasi scomparsa. Il colore giallastro risultante nella figura di diffrazione in luce bianca si origina dalla regione giallo-verde dello spettro. Si tracci a piacere una linea verticale e si osservi la struttura della figura di diffrazione in luce bianca.

Problemi di fine capitolo

- 8.13.** Quando una sorgente di luce di lunghezza d'onda λ viene usata in un esperimento con due fenditure strette separate da una distanza d , sotto quali angoli si troveranno i *massimi* di intensità della luce nella figura di interferenza?
- 8.14.** Si può realizzare una sorgente a fenditura doppia con ritardo di fase costante usando la luce diretta emessa da una fenditura singola e la luce riflessa da una lastra di vetro, come è illustrato nella Fig. A. Le frange di interferenza si possono osservare per mezzo di una lente di ingrandimento sul bordo della lastra di vetro. Quando vengono osservate in questo modo, le frange oscure risultano equidistanti fra loro, a partire dalla superficie riflettente della lastra.
- (a) Che cosa indica questo fatto riguardo al ritardo di fase tra le due sorgenti?
- (b) Se la lunghezza d'onda è 540 nm e le frange oscure sono separate da una distanza di 0.9 mm, quanto dista la fenditura usata come sorgente dal piano che contiene la lastra di vetro quando la fenditura dista 60 cm dal bordo della lastra di vetro?

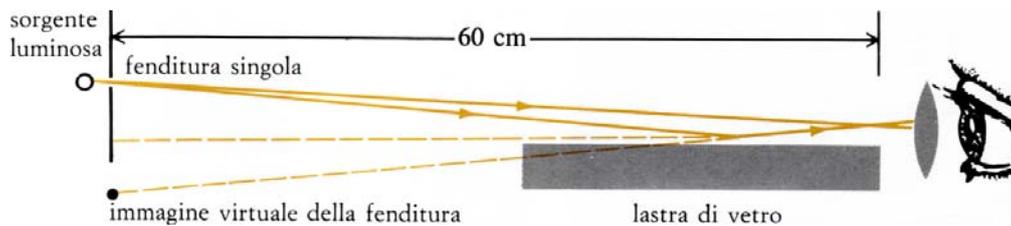


Fig. A

- 8.15.** Ideate un metodo ottico per misurare la larghezza di una stretta fenditura.
- 8.16.** (a) Nella Fig. 8.15 sono rappresentate le figure di interferenza prodotte da una fenditura singola e da una doppia. Si contino le linee nodali della seconda figura che si trovano nel massimo di luce della prima.
- (b) Che cosa dice questo fatto riguardo al rapporto tra la larghezza delle fenditure e la distanza che le separa?
- 8.17.** Una banda musicale sta marciando lungo la via principale di un paese, avvicinandosi all'intersezione della via principale con una strada laterale stretta rettilinea con edifici da ambo i lati. Perché un ascoltatore situato a una certa distanza lungo la strada laterale ode il suono della tuba (frequenza circa 60 Hz) prima del suono dell'ottavino (frequenza circa 4000 Hz)?
- 8.18.** Due altoparlanti di 7.5 cm di diametro emettono un suono costante la cui frequenza è 1000 Hz. Queste sorgenti sono in accordo di fase e sono distanti 2.0 m.
- (a) In corrispondenza di quali angoli vi attendete di non udire alcun suono? (La velocità del suono è circa 300 m/s.)
- (b) Che cosa pensate che accadrebbe se eseguite questo esperimento in una stanza che abbia le pareti di materiale rigido?
- 8.19.** Supponete che le frequenze dei suoni emessi dagli altoparlanti del problema 8.18 siano 1000 Hz e 995 Hz rispettivamente. Che cosa pensate di udire se gli altoparlanti si trovano in una stanza con pareti capaci di assorbire il suono? Su che cosa si basa la vostra previsione?

- 8.20.** Un sottile pennello di luce rossa, lunghezza d'onda di 630 nm, incide quasi perpendicolarmente su una lastra di vetro a facce piane e parallele, di spessore d e indice di rifrazione 1.5. Entrambe le superfici della lastra sono riflettenti (si osservi la Fig. 2.10). Si esamini la lastra come è indicato nella Fig. B.

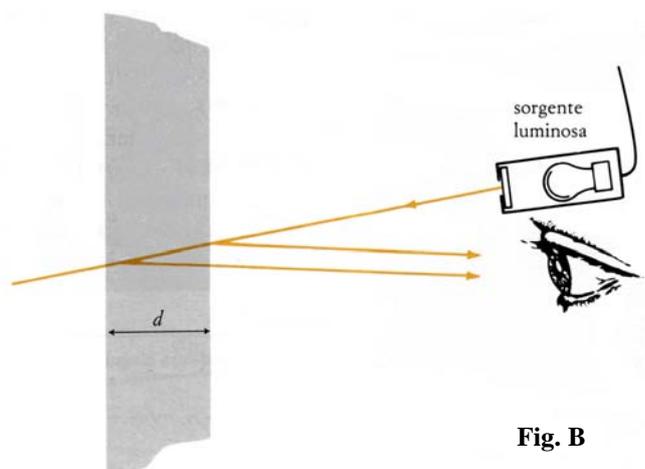


Fig. B

- (a) Che cambiamento di fase avrà il fascio riflesso dalla superficie di separazione aria-vetro? (*Suggerimento.* Riesaminare le Figg. 5.11 e 5.12.)
- (b) Che cambiamento di fase avrà il fascio riflesso dalla superficie di separazione vetro-aria?
- (c) Qual è lo spessore d della lastra nel caso in cui non si osservi nessuna riflessione?