

L'interferenza e la natura ondulatoria della luce

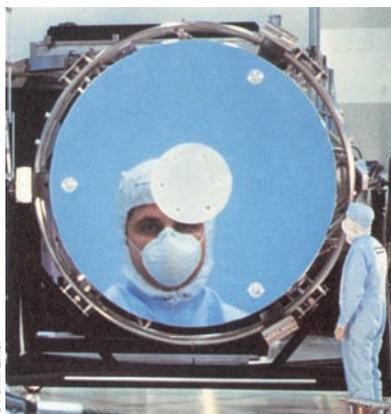


Un serpentone lungo più di 6 mila chilometri, che corre da oltre 2 mila anni nel cuore della Cina. È sicuramente grazie alla sua grandiosità e alla sua storia millenaria, che la Grande Muraglia cinese è stata dichiarata dall'Unesco patrimonio di tutta l'umanità. Un titolo che pare quanto mai azzeccato per quella che è considerata l'unica opera umana visibile a occhio nudo dallo Spazio, addirittura dalla Luna. Peccato che questa convinzione, per quanto suggestiva, sia decisamente sbagliata.

► L'ordine di grandezza

Qual è la distanza massima dalla quale un astronauta riesce a vedere a occhio nudo la Grande Muraglia cinese?

La risposta a pagina 450


Figura 15.1

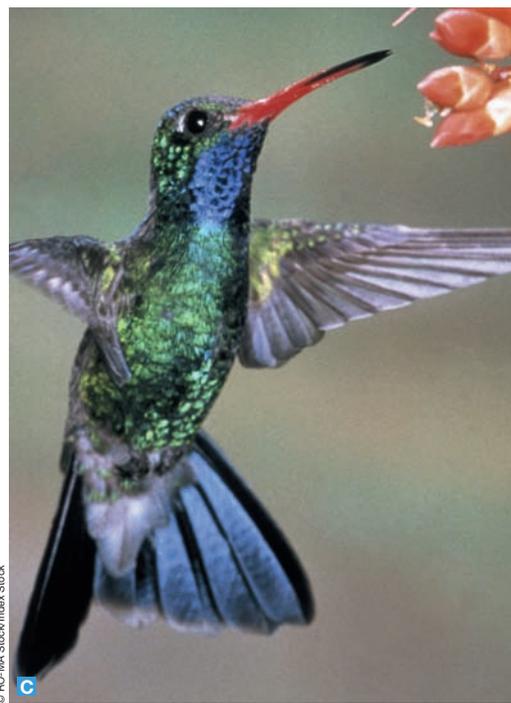
Lo specchio del telescopio spaziale *Hubble*. È costituito da un vetro speciale per ridurre al minimo le variazioni dimensionali dovute alle grandi escursioni termiche ed è ricoperto da una sottilissima pellicola riflettente di alluminio. Gli elevatissimi requisiti di precisione richiesti hanno comportato una lavorazione durata 28 mesi.

15.1 Oltre l'ottica geometrica

Molti fenomeni luminosi possono essere interpretati mediante i semplici modelli dell'ottica geometrica, secondo la quale la luce è formata da raggi che si propagano in linea retta nei materiali omogenei. Per esempio, le caratteristiche degli specchi sferici sono facilmente derivabili facendo ricorso alle proprietà geometriche dei raggi luminosi e alle leggi della riflessione (figura 15.1).

Esistono però fenomeni che non possono essere spiegati nell'ambito dell'ottica geometrica, come per esempio i colori che appaiono sulla superficie di un CD quando è illuminato da luce bianca o l'iridescenza del piumaggio di un colibrì (figura 15.2). In questi casi la luce manifesta un comportamento simile a quello delle onde che abbiamo visto nel capitolo 12.

In effetti la luce è un'onda trasversale: come vedremo nel capitolo 24, è costituita da radiazioni elettromagnetiche che si propagano nello spazio come oscillazioni trasversali di campi elettrici e magnetici. Per comprendere questi nuovi fenomeni, come l'interferenza e la diffrazione, possiamo trascurare la natura elettromagnetica delle onde luminose e utilizzare le nozioni che abbiamo visto nel caso delle onde meccaniche.


Figura 15.2

Le iridescenze della superficie di un CD (A), delle bolle di sapone (B) o del piumaggio di un colibrì (C) sono effetti prodotti da uno stesso comportamento della luce.

15.2 Il principio di sovrapposizione e l'interferenza della luce

■ Il principio di sovrapposizione

Nel capitolo 12 abbiamo visto che cosa succede quando due onde, per esempio due onde sonore, sono presenti contemporaneamente nello stesso punto. Per il principio di sovrapposizione, la perturbazione risultante è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde. Anche la luce è un'onda: più precisamente, come vedremo nel capitolo 24, è un'onda elettromagnetica. Quando due onde luminose passano per uno stesso punto, i loro effetti si sommano secondo il principio di sovrapposizione.

■ L'interferenza della luce

La figura 15.3 mostra che cosa succede quando due onde con la stessa lunghezza d'onda λ e la stessa ampiezza arrivano in un punto P in concordanza di fase (cioè

«cresta a cresta» e «ventre a ventre»). Per il principio di sovrapposizione le onde si rinforzano a vicenda, cioè si ha **interferenza costruttiva**. L'ampiezza dell'onda risultante nel punto P è doppia di quella di ciascuna delle due onde che interferiscono.

Nel caso di onde luminose, l'intensità luminosa nel punto P è maggiore di quella prodotta da ciascuna delle due onde. Le onde partono in fase e arrivano in fase nel punto P perché le distanze ℓ_1 e ℓ_2 tra P e le sorgenti delle onde differiscono di una lunghezza d'onda. Nella figura 15.3 queste distanze sono $\ell_1 = 2 + (1/4)$ lunghezze d'onda e $\ell_2 = 3 + (1/4)$ lunghezze d'onda.

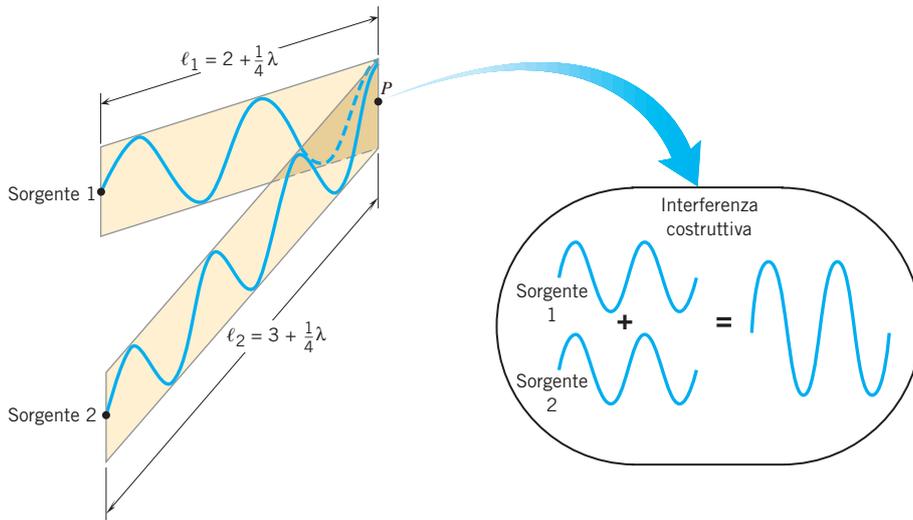


Figura 15.3

Le onde emesse dalle sorgenti 1 e 2 partono in concordanza di fase e arrivano nel punto P in concordanza di fase, dando origine a un fenomeno di interferenza costruttiva.

In generale, quando le onde partono in fase, in un punto P in cui esse interferiscono si ha interferenza costruttiva ogni volta che le distanze sono uguali oppure differiscono di un numero intero di lunghezze d'onda. Se ℓ_2 è la distanza maggiore, si ha:

interferenza costruttiva quando $\ell_2 - \ell_1 = m\lambda$ con $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

La figura 15.4 mostra che cosa succede quando due onde identiche arrivano in un punto P in opposizione di fase, cioè «cresta a ventre». Per il principio di sovrapposizione in questo caso le onde si annullano a vicenda, cioè si ha **interferenza distruttiva**.

Nel caso delle onde luminose questo significa che l'intensità luminosa nel punto P è nulla. Le onde partono in fase ma arrivano in P in opposizione di fase perché le distanze ℓ_1 e ℓ_2 tra P e le sorgenti differiscono di mezza lunghezza d'onda. Nella figura 15.4 queste distanze sono $\ell_1 = 2 + (3/4)$ lunghezze d'onda e $\ell_2 = 3 + (1/4)$ lunghezze d'onda.

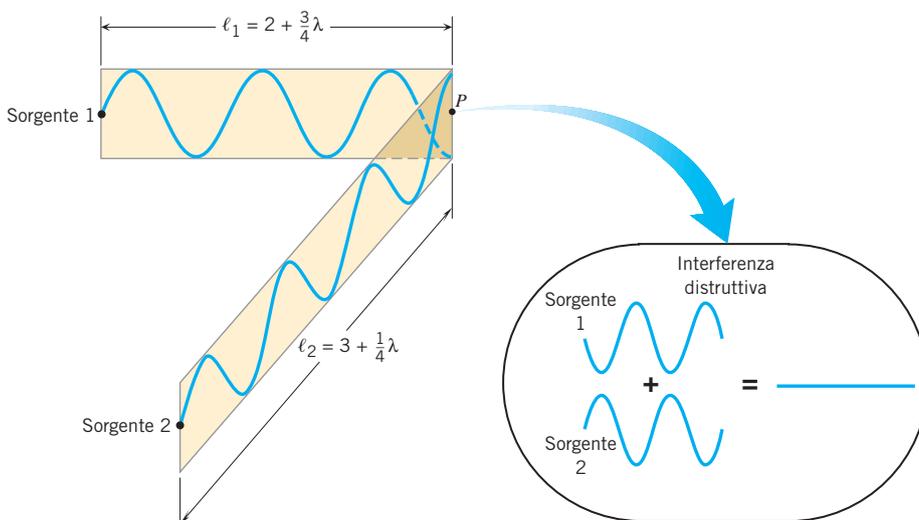


Figura 15.4

Le onde emesse dalle due sorgenti partono in fase ma arrivano nel punto P in opposizione di fase, dando origine a un fenomeno di interferenza distruttiva.

In generale, quando le onde partono in fase, in un punto P in cui esse interferiscono si ha interferenza distruttiva ogni volta che le distanze differiscono di un numero dispari di mezze lunghezze d'onda. Se ℓ_2 è la distanza maggiore, si ha:

$$\text{interferenza distruttiva quando } \ell_2 - \ell_1 = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$$

$$\text{ossia } \ell_2 - \ell_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \text{ con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Le condizioni di interferenza rimangono stabili in un punto solo quando le onde sono emesse da **sorgenti coerenti**.

■ SORGENTI COERENTI

Due sorgenti si dicono **coerenti** quando emettono onde che mantengono una relazione di fase costante.

In pratica questo significa che le onde non si spostano l'una rispetto all'altra al passare del tempo. Per esempio, supponiamo che la forma d'onda generata dalla sorgente 1 della figura 15.4 si sposti avanti e indietro in modo casuale al variare del tempo. In questo caso nel punto P in media non si osserverebbe né interferenza costruttiva né interferenza distruttiva, perché non ci sarebbe alcuna relazione stabile tra le due forme d'onda. I laser sono sorgenti di luce coerenti, mentre le lampadine a incandescenza e quelle fluorescenti sono sorgenti di luce incoerenti.

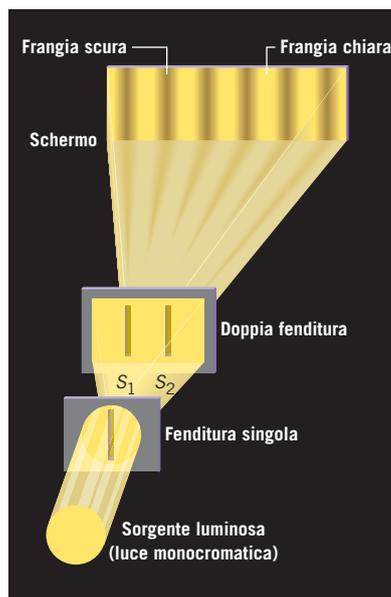


Figura 15.5

Nell'esperimento di Young le due fenditure si comportano come sorgenti coerenti di onde luminose, che interferiscono sullo schermo dando luogo alle frange chiare e scure. In figura le ampiezze delle fenditure e la loro distanza sono molto ingrandite per maggiore chiarezza.

15.3 L'esperimento di Young

Nel 1801 l'inglese Thomas Young (1773-1829) eseguì un esperimento di importanza fondamentale che confermò l'ipotesi della natura ondulatoria della luce e fornì un metodo operativo per misurarne la lunghezza d'onda. La figura 15.5 mostra uno schema dell'esperimento, in cui la luce di una sola lunghezza d'onda (detta **luce monocromatica**) passa prima attraverso una fenditura singola molto sottile e poi va a incidere su altre due fenditure S_1 e S_2 , molto sottili e molto vicine tra loro. Le due fenditure S_1 e S_2 si comportano come sorgenti coerenti di luce perché la luce emessa da ciascuna di esse proviene dalla stessa sorgente, cioè dalla fenditura singola. Queste due fenditure producono su uno schermo una *figura d'interferenza* formata da frange chiare alternate a frange scure.

■ Interpretazione fisica dell'esperimento

La figura 15.6 mostra il cammino delle onde che incidono nel punto centrale dello schermo. Nella parte **A** della figura le distanze ℓ_1 e ℓ_2 tra questo punto e le fenditure sono uguali e ciascuna contiene lo stesso numero di lunghezze d'onda. Perciò le onde interferiscono costruttivamente e danno origine a una frangia chiara. La parte **B** della figura mostra che le onde interferiscono costruttivamente e producono due frange chiare in posizioni simmetriche rispetto alla frangia centrale quando

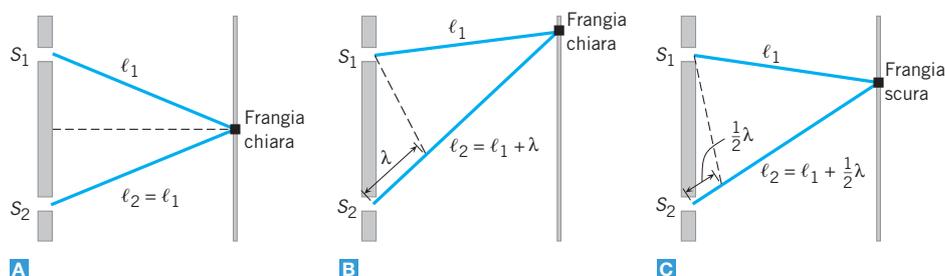


Figura 15.6

Le onde provenienti dalle fenditure S_1 e S_2 interferiscono costruttivamente (**A** e **B**) o distruttivamente (**C**) a seconda della differenza tra le distanze delle fenditure dallo schermo. In figura le ampiezze delle fenditure e la loro distanza sono molto ingrandite per maggiore chiarezza.

la differenza dei cammini è uguale a una lunghezza d'onda (per chiarezza, nella figura è mostrato solo il caso $\ell_2 - \ell_1 = \lambda$).

Le onde interferiscono costruttivamente, producendo altre frange chiare (non rappresentate nella figura) da entrambe le parti della frangia centrale, ogni volta che la differenza tra i cammini ℓ_1 e ℓ_2 è uguale a un numero intero di lunghezze d'onda: $\lambda, 2\lambda, 3\lambda$ ecc.

La parte C della figura mostra come si forma la prima frangia scura. In questo caso la distanza ℓ_2 è maggiore di ℓ_1 e la differenza $\ell_2 - \ell_1$ è esattamente uguale a mezza lunghezza d'onda, perciò le onde interferiscono distruttivamente e danno origine alla frangia scura. Le onde interferiscono distruttivamente, producendo altre frange scure da entrambe le parti della frangia centrale, ogni volta che la differenza tra ℓ_1 e ℓ_2 è uguale a un numero dispari di mezze lunghezze d'onda:

$$1\left(\frac{\lambda}{2}\right), 3\left(\frac{\lambda}{2}\right), 5\left(\frac{\lambda}{2}\right) \text{ ecc.}$$

Come mostra la figura 15.7, la luminosità delle frange che si formano nell'esperimento di Young non è costante, ma variabile. L'intensità luminosa è la quantità di energia luminosa che incide in 1 secondo su una superficie unitaria. Il grafico sotto la fotografia mostra come varia l'intensità luminosa della figura d'interferenza. La frangia centrale è indicata con zero e le altre frange chiare sono indicate con numeri crescenti su entrambi i lati rispetto alla frangia centrale. Si può osservare che la frangia centrale ha l'intensità luminosa massima e che l'intensità luminosa delle frange laterali diminuisce simmetricamente in un modo che dipende dall'ampiezza delle fenditure rispetto alla lunghezza d'onda della luce incidente.

■ **Condizioni di interferenza**

Le posizioni delle frange sullo schermo possono essere calcolate osservando la figura 15.8. Se la distanza dello schermo dalla doppia fenditura è molto grande rispetto alla distanza d tra le due fenditure, le rette indicate con ℓ_1 e ℓ_2 nella parte A della figura sono praticamente parallele e quindi formano angoli θ praticamente uguali rispetto alla retta perpendicolare allo schermo con le due fenditure.

La differenza $\Delta\ell$ tra le distanze ℓ_1 e ℓ_2 nella figura è uguale alla lunghezza del lato minore del triangolo colorato rappresentato nella parte B della figura. Poiché questo triangolo è rettangolo, si ha che $\Delta\ell = d \text{ sen } \theta$. L'interferenza è costruttiva quando le distanze ℓ_1 e ℓ_2 differiscono di un numero intero di lunghezze d'onda, cioè quando $\Delta\ell = d \text{ sen } \theta = m\lambda$.

Perciò le ampiezze dell'angolo θ che danno luogo ai massimi di interferenza possono essere calcolate con la formula seguente:

Frangie d'interferenza chiare $\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{d}, \text{ con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$ (15.1)

Il valore di m è chiamato *ordine* della frangia; per esempio, $m = 2$ indica la frangia chiara «di secondo ordine». Gli angoli θ che si ricavano dall'equazione (15.1) individuano le posizioni delle frange chiare su entrambi i lati della frangia centrale (figura 15.8C).

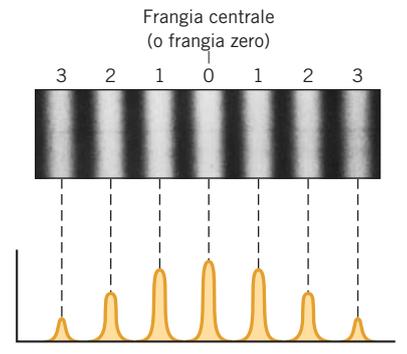


Figura 15.7

I risultati dell'esperimento della doppia fenditura di Young sono illustrati da una fotografia (che mostra le frange scure e quelle chiare) e da un grafico dell'intensità luminosa delle frange. La frangia centrale (frangia zero) è quella più luminosa (cioè ha l'intensità maggiore).

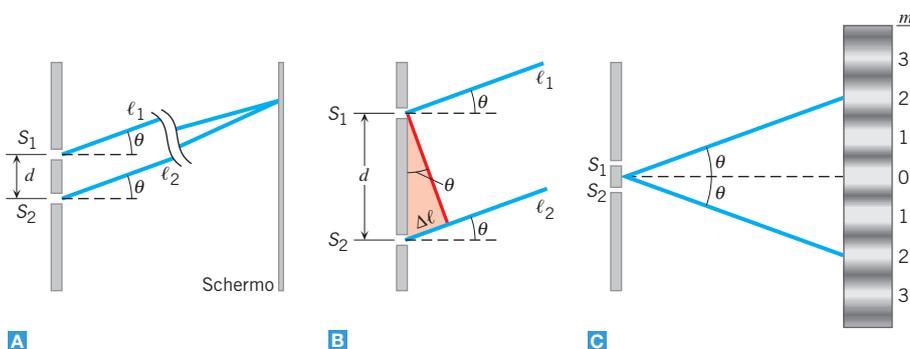


Figura 15.8

A. I raggi provenienti dalle fenditure S_1 e S_2 formano angoli θ praticamente uguali rispetto alla direzione iniziale e colpiscono uno schermo lontano nello stesso punto.
 B. La differenza tra le lunghezze dei cammini percorsi dai due raggi per arrivare allo schermo è $\Delta\ell = d \text{ sen } \theta$.
 C. L'angolo θ individua la posizione sullo schermo in cui si forma una frangia chiara (nella figura è rappresentata la frangia di ordine $m = 2$) su entrambi i lati della frangia chiara centrale ($m = 0$).

Ragionando in modo analogo si giunge alla conclusione che le posizioni delle frange scure che si formano tra quelle chiare possono essere calcolate con la formula seguente:

$$\text{Frangia d'interferenza scure} \quad \text{sen } \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d}, \quad \text{con } m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (15.2)$$

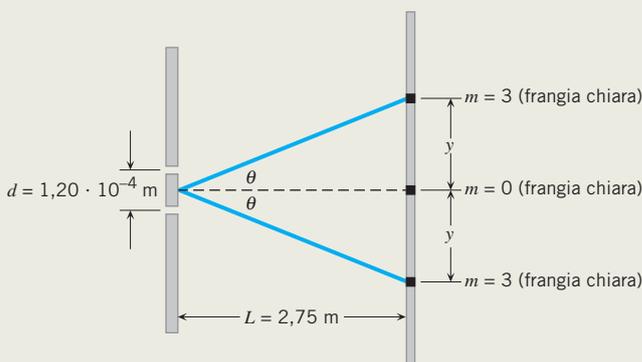
Figura 15.9

La frangia chiara del terzo ordine ($m = 3$) si osserva sullo schermo a una distanza y dalla frangia chiara centrale ($m = 0$).

ESEMPIO 1 ■ Condizioni di interferenza

Frangie di luce

Un fascio di luce rossa ($\lambda = 664 \text{ nm}$) attraversa una doppia fenditura in cui la distanza tra le fenditure è $d = 1,20 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. La distanza tra lo schermo e la doppia fenditura della figura 15.9 è $L = 2,75 \text{ m}$.



► Trova la distanza y tra la frangia luminosa centrale e la frangia luminosa del terzo ordine che si formano sullo schermo.

Ragionamento e soluzione

La frangia chiara del terzo ordine si forma a un angolo dato dall'equazione (15.1):

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right) = \text{sen}^{-1} \left[\frac{3(664 \cdot 10^{-9} \text{ m})}{1,20 \cdot 10^{-4} \text{ m}} \right] = 0,951^\circ$$

Dalla figura 15.9 si ricava che la distanza y può essere ottenuta dalla relazione $\tan \theta = y/L$:

$$y = L \tan \theta = (2,75 \text{ m}) \tan 0,951^\circ = \boxed{0,0456 \text{ m}}$$

■ Misura della lunghezza d'onda della luce

La figura d'interferenza che si forma nell'esperimento di Young dipende dalla lunghezza d'onda della luce utilizzata. In particolare, la prima frangia luminosa è tanto più distante dalla frangia centrale quanto più grande è la lunghezza d'onda emessa dalla sorgente. Questo suggerisce un metodo per misurare la lunghezza d'onda di un fascio di luce monocromatica. Nella figura 15.10, P è il punto in cui si forma la prima frangia luminosa.

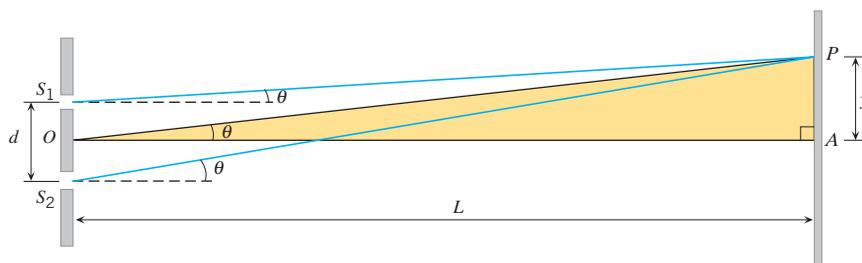


Figura 15.10

Costruzione geometrica che permette di mettere in relazione la lunghezza d'onda λ della radiazione con tre componenti geometriche (y , L e d) relative al dispositivo con cui si producono le frange d'interferenza.

Poiché L è molto maggiore di y , con ottima approssimazione valgono le seguenti relazioni:

- le rette S_1P , S_2P e OP sono praticamente parallele e quindi formano angoli uguali con la direzione OA normale allo schermo, in particolare $P\hat{O}A \approx \theta$;
- $OP \approx OA$; nel triangolo rettangolo colorato OAP si ha:

$$\text{sen } \theta = \frac{PA}{OP} \quad \text{e} \quad \tan \theta = \frac{PA}{OA}$$

e quindi:

$$\text{sen } \theta \approx \tan \theta = \frac{PA}{OA} = \frac{y}{L}$$

Ponendo $m = 1$, dall'equazione (15.1) deriva che $\text{sen } \theta = \lambda/d$. Ma è anche $\text{sen } \theta = y/L$, quindi vale la relazione $\lambda/d = y/L$, da cui segue:

$$\lambda = \frac{yd}{L} \tag{15.3}$$

La misura della lunghezza d'onda di un fascio di luce monocromatica è quindi ricondotta alla misura di tre lunghezze: y , L e d .

Il fenomeno della dispersione (paragrafo 14.4) dimostra che la luce bianca è composta da un insieme di colori che formano lo spettro visibile: mediante l'esperimento di Young si scopre che a ogni colore corrisponde un intervallo di lunghezze d'onda che lo caratterizzano (tabella 15.1).

La figura 15.11 mostra una fotografia delle frange d'interferenza che si ottengono nell'esperimento di Young usando luce bianca. Ogni colore forma la sua figura d'interferenza, che si sovrappone parzialmente con quelle degli altri colori. Solo la frangia centrale è bianca perché, quando $m = 0$ nell'equazione (15.1), si ha $\theta = 0^\circ$, indipendentemente dalla lunghezza d'onda λ .

Tabella 15.1 Lunghezza d'onda dei colori dello spettro

Colore	λ (nm)
Violetto	380-420
Indaco	420-440
Azzurro	440-470
Verde	470-570
Giallo	570-590
Arancione	590-610
Rosso	610-750

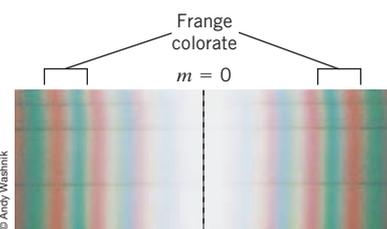


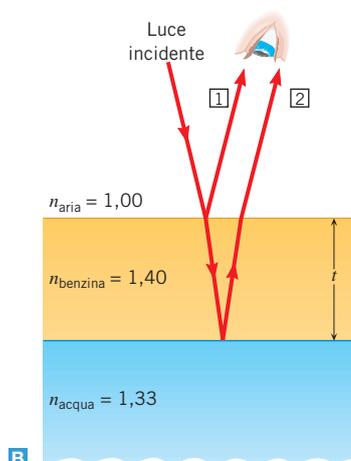
Figura 15.11

Questa fotografia mostra i risultati dell'esperimento di Young eseguito con luce bianca (cioè la luce formata da tutti i colori della luce visibile).

15.4 Interferenza su lamine sottili

Nella vita quotidiana è piuttosto frequente osservare il fenomeno dell'interferenza delle onde luminose riflesse da lamine sottili (figura 15.12A). La parte B della figura schematizza una sottile pellicola di benzina che galleggia sull'acqua e sulla quale incide in direzione quasi perpendicolare un fascio di luce monocromatica. Nel punto d'incidenza si hanno due raggi luminosi: il raggio riflesso 1 e il raggio rifratto che attraversa la pellicola. Dove il raggio rifratto incontra la superficie di separazione benzina-acqua si origina un fascio riflesso 2 che attraversa la pellicola e torna a propagarsi nell'aria.

Le onde 1 e 2 possono interferire fra loro come le onde luminose provenienti dalle due fenditure nell'esperimento di Young. Per determinare le condizioni d'interferenza bisogna valutare i due fattori che cambiano la fase delle onde: la distanza percorsa e la riflessione.

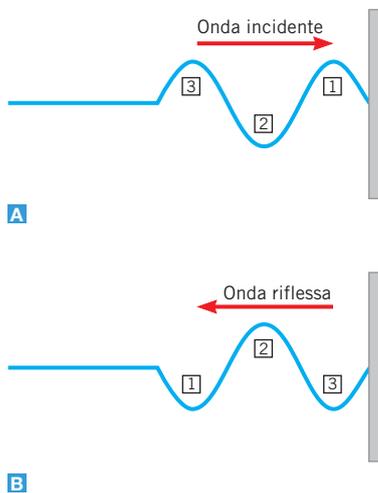


FILM

L'interferenza in una lamina sottile (anzi sottilissima)

Figura 15.12

A. Iridescenze prodotte da una sottile lamina di benzina sull'acqua.
B. Rappresentazione schematica di un fascio di luce incidente su una sottile pellicola di benzina che galleggia sull'acqua. I raggi 1 e 2 giungono all'occhio dopo aver subito riflessioni e rifrazioni.


Figura 15.13

Un'onda raggiunge l'estremo fisso di una corda (A) e inverte il senso del moto (B). Rispetto all'onda incidente l'onda riflessa ha un cambiamento di fase che corrisponde a mezza lunghezza d'onda, come suggerisce il comportamento dei punti numerati.

■ Cambiamento di fase dovuto alla distanza percorsa

L'onda luminosa 2 percorre una distanza maggiore rispetto all'onda 1. Se la differenza fra le due distanze è un multiplo della lunghezza d'onda, si ha interferenza costruttiva e un osservatore vede la pellicola uniformemente illuminata. Se invece si verifica l'interferenza distruttiva, cioè la differenza è un multiplo dispari della semilunghezza d'onda, un osservatore vede la pellicola scura.

La figura 15.12B mostra che la differenza fra le distanze percorse dai due raggi consiste nell'attraversamento della pellicola da parte del raggio 2. Quindi, per determinare le condizioni di interferenza su pellicola sottile bisogna considerare la lunghezza d'onda all'interno della pellicola:

$$\lambda_{\text{pellicola}} = \frac{\lambda_{\text{vuoto}}}{n} \quad (15.4)$$

dove n è l'indice di rifrazione della sostanza di cui è composta la pellicola.

■ Cambiamento di fase dovuto alla riflessione

La figura 15.13 mostra un'onda su una corda che (parte A) raggiunge l'estremità fissa alla parete e (parte B) viene riflessa indietro. L'onda riflessa è invertita e quindi la sua fase cambia di 180° . Questa inversione equivale a un mezzo periodo dell'onda, come se l'onda avesse percorso in più una distanza pari a mezza lunghezza d'onda. Non si verifica, invece, un cambiamento di fase quando l'estremità della corda è libera di muoversi.

Lo stesso fenomeno accade per le onde luminose:

- quando la luce passa da un materiale con indice di rifrazione minore a un materiale con indice maggiore (per esempio dall'aria alla benzina), la riflessione sulla superficie di separazione avviene con un cambiamento di fase equivalente a mezza lunghezza d'onda della luce nella lamina;
- quando la luce passa da un materiale con indice di rifrazione maggiore a un materiale con indice di rifrazione minore, non vi è alcun cambiamento di fase nella riflessione sulla superficie di separazione.

ESEMPIO 2 ■ Condizioni di interferenza

Una pellicola sottile di benzina colorata

Una pellicola sottile di benzina galleggia sull'acqua. I raggi del sole incidono quasi perpendicolarmente sulla pellicola e sono riflessi nei tuoi occhi. La luce solare contiene tutti i colori ma la pellicola appare giallastra, in quanto l'interferenza distruttiva elimina il blu ($\lambda_{\text{vuoto}} = 469 \text{ nm}$) dalla luce riflessa. Gli indici di rifrazione della luce blu nella benzina e nell'acqua sono rispettivamente 1,40 e 1,33.

► Determina il minimo spessore t della pellicola (diverso da zero).

Ragionamento e soluzione

Con riferimento alla figura 15.12B, determiniamo le condizioni di interferenza notando che:

- l'onda riflessa 1 sulla superficie di separazione aria-benzina subisce un cambiamento di fase equivalente a mezza lunghezza d'onda $(1/2)\lambda_{\text{pellicola}}$ perché $n_{\text{aria}} < n_{\text{benzina}}$;
- l'onda riflessa 2 sulla superficie di separazione benzina-acqua non subisce un cambiamento di fase perché $n_{\text{benzina}} > n_{\text{acqua}}$;
- la differenza fra le distanze percorse dall'onda 2 e dall'onda 1 è il doppio dello spessore della pellicola, ovvero $2t$.

Di conseguenza, la condizione per l'interferenza distruttiva è:

$$\underbrace{2t}_{\text{distanza percorsa in più dall'onda 2}} + \underbrace{\frac{1}{2}\lambda_{\text{pellicola}}}_{\text{cambiamento di fase di mezza lunghezza d'onda a causa della riflessione}} = \underbrace{\frac{1}{2}\lambda_{\text{pellicola}}, \frac{3}{2}\lambda_{\text{pellicola}}, \frac{5}{2}\lambda_{\text{pellicola}}, \dots}_{\text{condizione per l'interferenza distruttiva}}$$

Sottraendo da entrambi i membri il termine $(1/2)\lambda_{\text{pellicola}}$, si può ricavare lo spessore t della pellicola che produce l'interferenza distruttiva:

$$t = \frac{m\lambda_{\text{pellicola}}}{2} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

La lunghezza d'onda della luce blu nella pellicola è:

$$\lambda_{\text{pellicola}} = \frac{\lambda_{\text{vuoto}}}{n} = \frac{469 \text{ nm}}{1,40} = 335 \text{ nm}$$

Con $m = 1$, si ottiene il valore minimo dello spessore della pellicola (diverso da zero) per il quale si perde il colore blu nella riflessione:

$$t = \frac{m\lambda_{\text{pellicola}}}{2} = \frac{(1)(335 \text{ nm})}{2} = \boxed{168 \text{ nm}}$$



In condizioni naturali, le lamine sottili illuminate da luce bianca appaiono iridescenti (figura 15.14), perché presentano vari colori che spesso cambiano durante l'osservazione. Ciò è dovuto al fatto che le condizioni di interferenza dipendono dallo spessore della lamina. Lo spessore che dà luogo a interferenza distruttiva di un particolare colore elimina dalla luce riflessa solo quel colore. Poiché lo spessore della lamina è disomogeneo, in punti diversi di essa sono riflessi colori diversi. Quando lo spessore della lamina varia nel tempo, per effetto di correnti d'aria o della forza di gravità che la assottiglia, i colori riflessi cambiano e la lamina appare iridescente (figura 15.15).

Il colore che vedi quando i raggi del Sole vengono riflessi da una lamina sottile dipendono anche dall'angolo con cui guardi l'oggetto. Se si osserva con un angolo obliquo, la luce corrispondente al raggio 2 della figura 15.12B percorre più spazio rispetto a quanto non farebbe se l'angolo fosse retto. La maggiore distanza percorsa può causare l'interferenza distruttiva per una differente lunghezza d'onda.

L'interferenza su lamine sottili è utilizzata per migliorare il rendimento degli strumenti ottici. Per esempio, alcuni obiettivi fotografici contengono sei o più lenti. La riflessione di tutte le superfici delle lenti può diminuire considerevolmente la qualità dell'immagine. Per ridurre al minimo questa riflessione dannosa, le lenti di alta qualità sono spesso rivestite con un sottile strato di fluoruro di magne-

Figura 15.14

Quando sono illuminate dalla luce solare, le bolle di sapone appaiono colorate per gli effetti dell'interferenza su pellicole sottili.

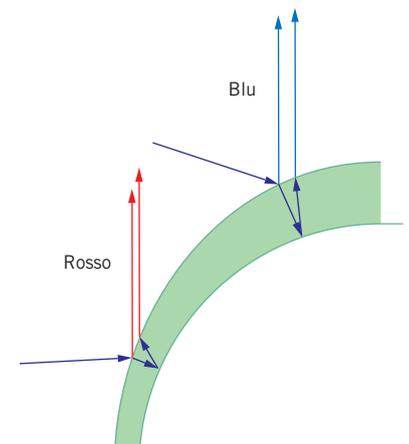


Figura 15.15

Le zone più spesse di una pellicola sottile appaiono blu, poiché le lunghezze d'onda più lunghe della luce rossa subiscono un'interferenza distruttiva. Le regioni più sottili appaiono rosse perché le lunghezze d'onda più corte della luce blu interferiscono distruttivamente.



Fisica quotidiana

Rivestimenti antiriflesso

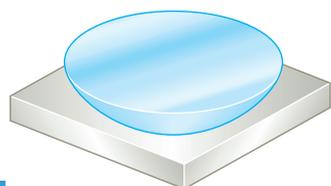
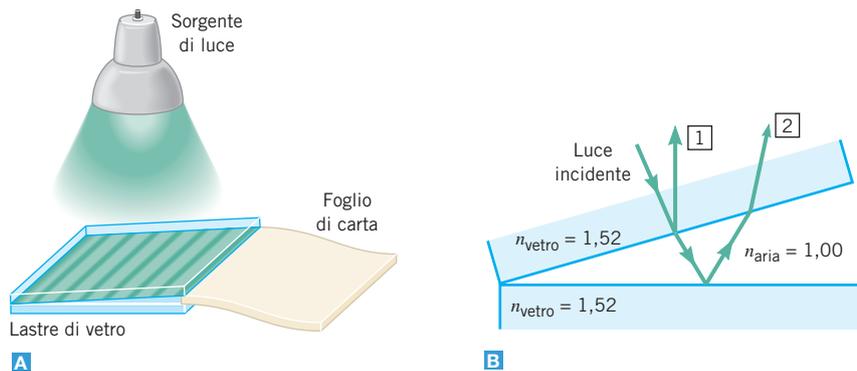


Figura 15.16

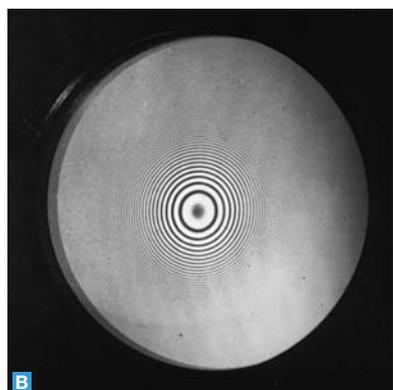
Le lenti dei binocoli e delle macchine fotografiche assumono spesso un colore blu a causa del loro rivestimento antiriflesso. Tale rivestimento è costituito da una sottile pellicola che riduce il riflesso sulle superfici della lente per mezzo di un'interferenza distruttiva.

Figura 15.17

A. Il cuneo d'aria che si forma tra le due lastre di vetro causa la figura d'interferenza che si vede nella luce riflessa.
B. Una vista laterale delle lastre di vetro e del cuneo d'aria fra di esse.



A



B

Figura 15.18

A. Il cuneo d'aria (A) tra una lente sferica e una lastra piana dà luogo a (B) una figura d'interferenza formata da frange circolari note come *anelli di Newton*.

sio ($n = 1,38$). Lo spessore dello strato è solitamente scelto in modo da garantire un'interferenza distruttiva che elimini la riflessione della luce verde, nel mezzo dello spettro visibile (figura 15.16).

■ **Cunei d'aria e anelli di Newton**

Un esempio interessante di interferenza si presenta con i cosiddetti *cunei d'aria*. Come mostra la figura 15.17A, un cuneo d'aria si forma quando due lastre di vetro sono separate su un lato da uno spessore sottile, come un foglio di carta. Lo spessore dello strato di aria varia da zero, dove le lastre sono a contatto, allo spessore del foglio di carta. Quando un fascio di luce monocromatica è riflesso da questo sistema, si producono le frange d'interferenza mostrate in figura.

Facendo riferimento alla figura 15.17B, notiamo che:

- l'onda riflessa 1 sulla superficie di separazione vetro-aria della lastra superiore non subisce alcun cambiamento di fase, perché $n_{\text{vetro}} > n_{\text{aria}}$;
- l'onda riflessa 2 sulla superficie di separazione aria-vetro della lastra inferiore subisce un cambiamento di fase equivalente a mezza lunghezza d'onda ($1/2 \lambda_{\text{aria}}$, perché $n_{\text{aria}} < n_{\text{vetro}}$;
- la differenza fra le distanze percorse dall'onda 2 e dall'onda 1 è il doppio dello spessore dello strato d'aria, ovvero $2t$.

Di conseguenza, la condizione per l'interferenza costruttiva è:

$$\underbrace{2t}_{\text{Distanza percorsa in più dall'onda 2}} + \underbrace{\frac{1}{2}\lambda_{\text{aria}}}_{\text{Cambiamento di fase di mezza lunghezza d'onda a causa della riflessione}} = \underbrace{m\lambda_{\text{aria}}}_{\text{Condizione per l'interferenza costruttiva}} \text{ con } m = 1, 2, 3, \dots$$

Sottraendo da entrambi i membri il termine $(1/2)\lambda_{\text{aria}}$, si ottiene:

$$2t = (m + 1)\frac{1}{2}\lambda_{\text{aria}} \text{ con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

In modo analogo, si dimostra che si ha interferenza distruttiva per quegli spessori t tali che:

$$2t = m\lambda_{\text{aria}} \text{ con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Poiché lo spessore del cuneo d'aria cresce linearmente con la distanza dal punto di contatto delle due lastre di vetro, le frange luminose e le frange scure si alternano mantenendo la stessa distanza.

Un altro tipo di cuneo d'aria può essere usato per determinare il grado con cui la superficie di una lente o di uno specchio è sferica. Quando una superficie perfettamente sferica è messa in contatto con una lastra di vetro piana (figura 15.18A), si possono osservare frange di interferenza circolari come quelle mostrate nella parte B della figura. Le frange circolari sono chiamate *anelli di Newton*. Essi si formano per lo stesso motivo per cui si formano le frange rettilinee di figura 15.17A.

15.5 La diffrazione della luce

Come abbiamo visto nel paragrafo 12.8, la **diffrazione** è l'incurvatura che le onde manifestano quando incidono su un ostacolo o sui bordi di una fenditura. Nella figura 15.19, che è simile alla figura 12.32, le onde sonore attraversano una porta aperta. Per effetto della diffrazione sugli spigoli della porta, un ascoltatore percepisce il suono anche quando non sta davanti all'apertura.

■ Il principio di Huygens

La diffrazione è dovuta all'interferenza e il legame tra questi due fenomeni può essere spiegato con un principio formulato dallo scienziato olandese Hans Christiaan Huygens (1629-1695) e noto come **principio di Huygens**.

■ PRINCIPIO DI HUYGENS

Ogni punto di un fronte d'onda che esiste in un certo istante si comporta come sorgente di onde sferiche secondarie che si propagano verso l'esterno con la stessa velocità dell'onda; il fronte d'onda nell'istante successivo è la superficie tangente a tutte le onde sferiche secondarie.

Consideriamo le onde sonore della figura 15.19. Un fronte d'onda piano attraversa l'apertura di una porta. Secondo il principio di Huygens ogni punto del fronte d'onda si comporta come una sorgente di onde sferiche, che nel disegno sono rappresentate in un certo istante dopo essere state emesse, con semicirconferenze rosse. Il fronte d'onda tangente alle onde emesse dai punti 2, 3 e 4 è piano e si propaga in avanti in linea retta. Al contrario, i fronti d'onda tangenti alle onde emesse dai punti 1 e 5, vicini ai bordi, si propagano in direzioni diverse da quella iniziale. Ciò spiega perché il suono è percepito anche nei punti che non si trovano direttamente davanti all'apertura della porta.

■ Diffrazione e larghezza della fenditura

Gli effetti della diffrazione sono molto marcati quando le onde che passano attraverso una fenditura hanno una lunghezza d'onda λ comparabile con l'ampiezza d della fenditura. Le fotografie della figura 15.20 mostrano questo effetto nel caso della diffrazione di onde sull'acqua. L'allargamento angolare del fronte d'onda dovuto alla diffrazione è indicato dalle due frecce rosse in entrambe le fotografie. Nella parte **A** della figura la lunghezza d'onda è molto piccola rispetto alla larghezza dell'apertura: i fronti d'onda procedono oltre l'apertura e si incurvano solo vicino ai bordi. Nella parte **B** la lunghezza d'onda è comparabile con l'ampiezza dell'apertura: l'incurvatura delle onde è molto pronunciata, l'allargamento angolare aumenta e i fronti d'onda invadono regioni più ampie oltre i bordi dell'apertura.

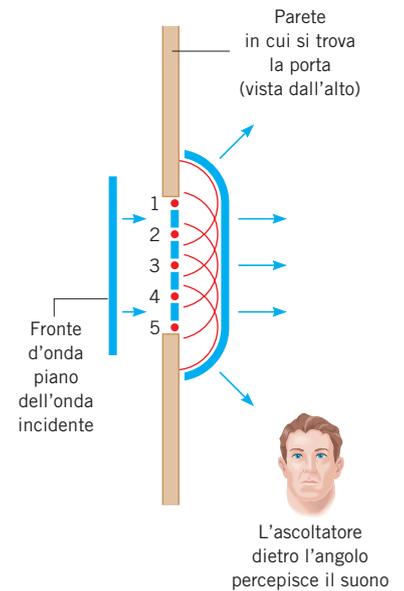
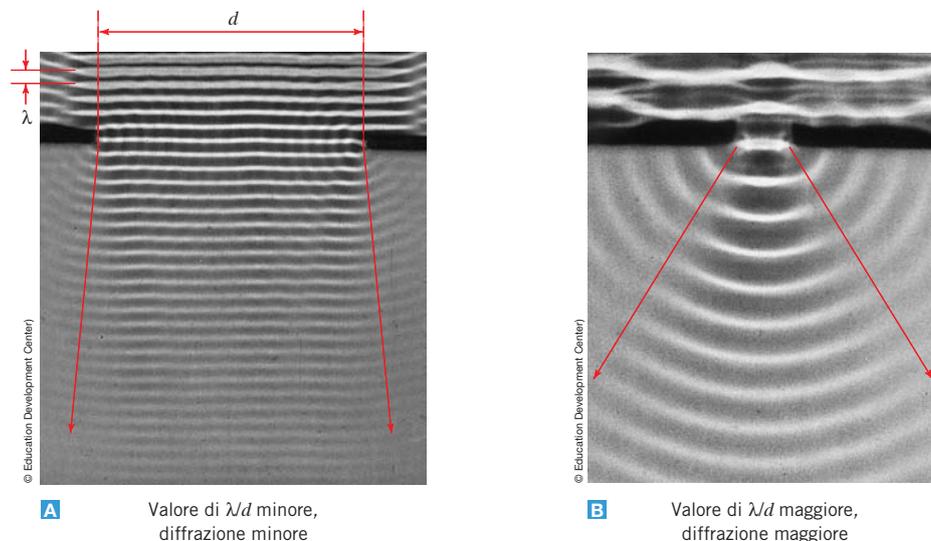


Figura 15.19

Le onde sonore si diffrangono vicino ai bordi di una porta e quindi anche una persona che non si trova direttamente davanti alla porta riesce a percepire il suono. I cinque punti nell'apertura della porta indicati in rosso si comportano come sorgenti puntiformi delle cinque onde sferiche secondarie (anch'esse indicate in rosso) descritte dal principio di Huygens.

Figura 15.20

Le fotografie mostrano onde sull'acqua (rappresentate da linee orizzontali) che si avvicinano a un'apertura di larghezza d maggiore nel caso **A** rispetto al caso **B**. Inoltre la lunghezza d'onda λ delle onde è minore nel caso **A** rispetto al caso **B**. Perciò il valore del rapporto λ/d nel caso **A** è minore che nel caso **B** e di conseguenza, come indicano le frecce rosse, anche la diffrazione è minore.

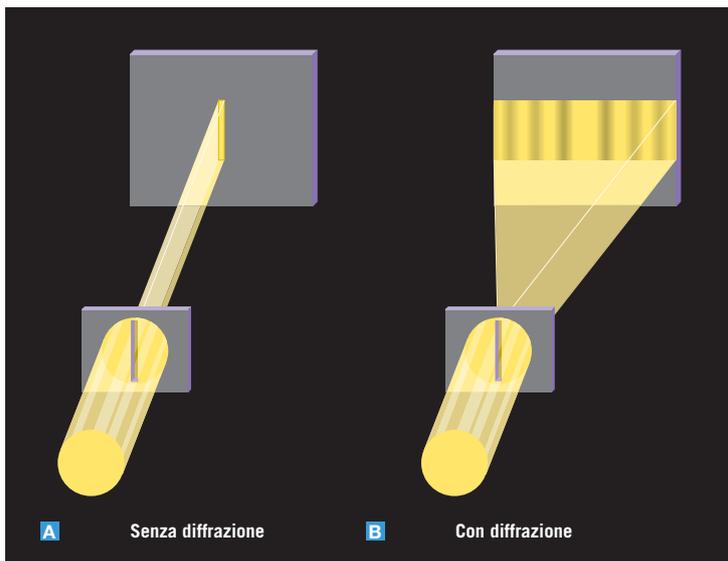
■ La diffrazione della luce

Anche le onde luminose che attraversano una fenditura molto stretta danno luogo al fenomeno della diffrazione (figura 15.21). La parte **A** della figura mostra che cosa si vedrebbe sullo schermo se *non* ci fosse la diffrazione: la luce passerebbe attraverso la fenditura senza incurvarsi vicino ai bordi e sullo schermo si vedrebbe una sottile striscia chiara, cioè l'immagine della fenditura. La parte **B** mostra quello che invece si osserva davvero. La luce si incurva vicino ai bordi della fenditura e illumina zone dello schermo che non sono direttamente davanti alla fenditura, formando una *figura di diffrazione* costituita da una frangia centrale chiara e da una serie di frange più strette e meno luminose alternate a frange scure parallele alla fenditura.

Figura 15.21

A. Se la luce potesse attraversare una fenditura molto sottile senza dar luogo a diffrazione, essa illuminerebbe solo la regione dello schermo posta direttamente davanti alla fenditura.

B. La diffrazione provoca un allargamento del fascio luminoso vicino ai bordi della fenditura e fa sì che la luce si propaghi in regioni in cui altrimenti non giungerebbe. Sullo schermo posto davanti alla fenditura questo fenomeno dà origine a una figura di diffrazione formata da frange chiare alternate a frange scure. In figura la larghezza della fenditura è stata esagerata per maggiore chiarezza.



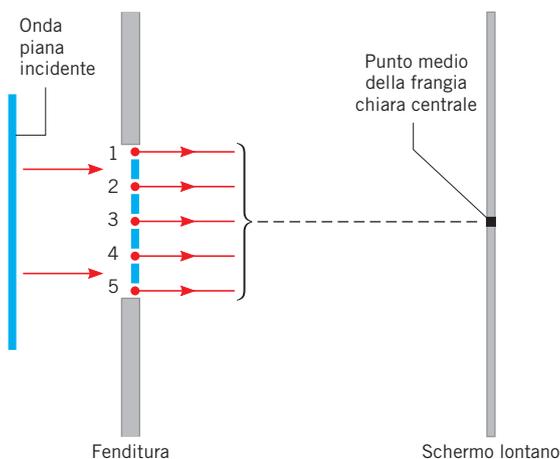
■ La figura di diffrazione

Consideriamo un fronte d'onda piano che incide perpendicolarmente su una fenditura molto stretta e determiniamo le caratteristiche della figura di diffrazione che si forma su uno schermo molto lontano dalla fenditura.

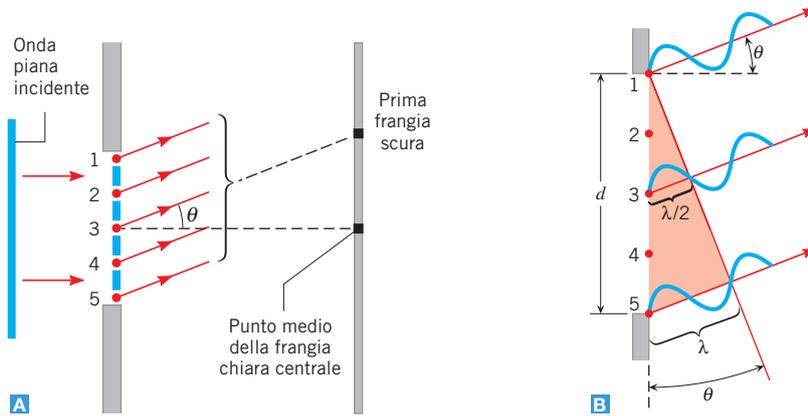
La figura 15.22 mostra cinque delle sorgenti di onde sferiche secondarie descritte dal principio di Huygens. Consideriamo il modo in cui la luce emessa da queste cinque sorgenti raggiunge il punto centrale dello schermo. Tutte le onde sferiche secondarie percorrono la stessa distanza per arrivare al punto centrale dello schermo, dove arrivano in concordanza di fase. Esse quindi danno origine a interferenza costruttiva, producendo una frangia centrale chiara nel centro dello schermo, direttamente davanti alla fenditura.

Figura 15.22

Un fronte d'onda piano incide su una fenditura singola. La figura rappresenta una vista dall'alto della fenditura, al cui interno si possono vedere cinque sorgenti puntiformi delle onde secondarie descritte dal principio di Huygens. Come indicano i raggi disegnati in rosso, queste onde viaggiano verso il punto medio della frangia chiara centrale sullo schermo, che è molto lontano dalla fenditura.



La figura 15.23A mostra le onde sferiche secondarie dirette verso la prima frangia scura della figura di diffrazione. Queste onde sono parallele e formano un angolo θ rispetto alla direzione del fronte d'onda incidente. L'onda emessa dalla sorgente 1 percorre il cammino più breve per arrivare allo schermo, mentre l'onda emessa dalla sorgente 5 percorre il cammino più lungo. L'interferenza distruttiva dà luogo alla prima frangia scura quando la differenza tra i loro cammini è esattamente uguale a una lunghezza d'onda. In queste condizioni la differenza tra i cammini dell'onda emessa dalla sorgente 3 al centro della fenditura e dell'onda emessa dalla sorgente 1 è esattamente uguale a mezza lunghezza d'onda. Perciò, come mostra la parte B della figura, queste due onde sono in opposizione di fase e interferiscono distruttivamente quando raggiungono lo schermo. Lo stesso ragionamento vale per due onde qualunque emesse da due sorgenti poste rispettivamente nella metà superiore e nella metà inferiore della fenditura alla stessa distanza dalla sorgente 1 e dalla sorgente 3.


Figura 15.23

Le due parti della figura rappresentano ciò che avviene nella diffrazione prodotta da una fenditura singola e mostrano come l'interferenza distruttiva dia origine alle prime frange scure su entrambi i lati dello schermo rispetto alla frangia chiara centrale. Per chiarezza è rappresentata solo una delle due frange scure. Lo schermo è molto lontano dalla fenditura.

L'angolo θ che individua la posizione della prima frangia scura può essere ricavato dalla figura 15.23B. Il triangolo colorato è rettangolo e la sua ipotenusa è la larghezza d della fenditura: quindi $\sin \theta = \lambda/d$.

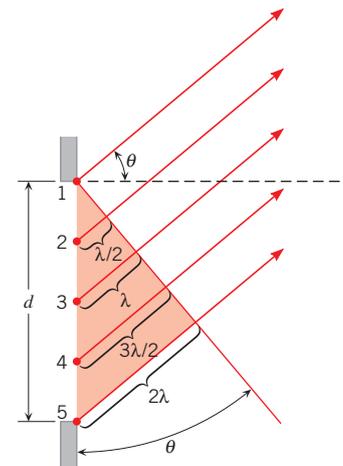
La figura 15.24 mostra la condizione in cui le onde sferiche secondarie interferiscono distruttivamente dando origine alla seconda frangia scura su ciascun lato della frangia luminosa centrale. In questo caso il cammino percorso dall'onda emessa dalla sorgente 5 per arrivare allo schermo differisce esattamente di due lunghezze d'onda dal cammino percorso dall'onda emessa dalla sorgente 1. In queste condizioni la differenza tra il cammino percorso dall'onda emessa dalla sorgente 5 e quello percorso dall'onda emessa dalla sorgente 3 è esattamente uguale a una lunghezza d'onda, e lo stesso avviene per le onde emesse dalla sorgente 3 e dalla sorgente 1.

Perciò ciascuna metà della fenditura può essere descritta come abbiamo fatto nel caso della prima frangia scura: tutte le onde secondarie emesse dalle sorgenti poste nella metà superiore della fenditura interferiscono distruttivamente con le corrispondenti onde secondarie generate nella metà inferiore della fenditura e danno origine alla seconda frangia scura che si osserva sullo schermo ai due lati del punto centrale.

Il triangolo colorato della figura mostra che l'angolo θ che individua la posizione della seconda frangia scura può essere ricavato dalla relazione $\sin \theta = 2\lambda/d$. Ripetendo lo stesso tipo di ragionamento per le frange scure di ordine maggiore, si giunge alla conclusione che le posizioni delle frange scure possono essere calcolate con la formula seguente:

$$\text{Frangie di diffrazione scure prodotte da una fenditura singola} \quad \sin \theta = m \frac{\lambda}{d} \quad \text{con } m = 1, 2, 3, \dots \quad (15.5)$$

Notiamo che gli effetti della diffrazione dipendono dal rapporto λ/d . Quando la lunghezza d'onda della luce è comparabile con l'ampiezza della fenditura, la figura di diffrazione è molto allargata, perché è grande l'angolo θ per il quale si formano le varie frange.

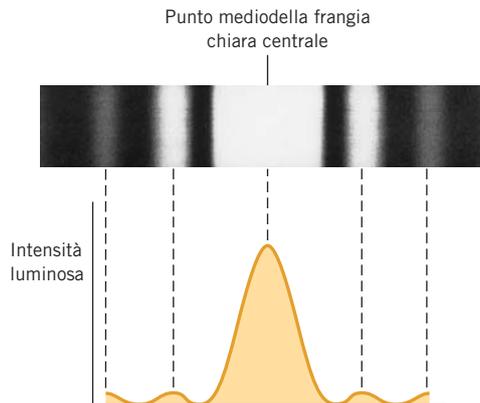

Figura 15.24

Nella figura di diffrazione prodotta da una fenditura singola, sullo schermo si formano numerose frange scure su entrambi i lati della frangia chiara centrale. La figura rappresenta il modo in cui l'interferenza distruttiva dà origine alla seconda frangia scura su uno schermo molto lontano dalla fenditura.

Tra due frange scure si osserva sempre una frangia chiara provocata dall'interferenza costruttiva. La luminosità delle frange è legata all'intensità luminosa della luce incidente. L'intensità luminosa è la quantità di energia luminosa che incide in 1 secondo su una superficie unitaria. La figura 15.25 mostra un grafico dell'intensità luminosa e la fotografia di una figura di diffrazione prodotta da una fenditura singola. La frangia chiara centrale è larga circa il doppio delle altre frange chiare ed è quella con intensità luminosa massima.

Figura 15.25

La fotografia mostra una figura di diffrazione prodotta da una fenditura singola con una frangia centrale chiara molto larga rispetto alle altre. Come indica il grafico sotto la fotografia, le intensità luminose delle frange chiare di ordine maggiore sono molto minori di quella della frangia centrale.



ESEMPIO 3 ■ Condizioni di diffrazione da una fenditura singola

Diffrazione da una fenditura

Un fascio di luce ($\lambda = 410 \text{ nm}$) attraversa una fenditura e illumina uno schermo che si trova a una distanza di $L = 0,40 \text{ m}$ (figura 15.26). La distanza tra il punto centrale della frangia chiara centrale e il punto centrale della prima frangia scura è y . Trova la larghezza $2y$ della frangia chiara centrale quando la larghezza della fenditura è:

► $d = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

► $d = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Ragionamento e soluzione

La larghezza della frangia chiara centrale dipende da due fattori: il valore di θ che individua la posizione della prima frangia scura ($m = 1$) e la distanza L tra la fenditura e lo schermo.

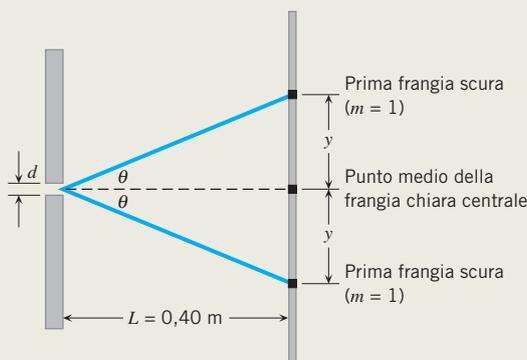
► Dall'equazione (15.5) con $m = 1$ si ha $\text{sen } \theta = \lambda/d$ e quindi:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\lambda}{d} \right) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{410 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{5,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \right) = 4,7^\circ$$

Dalla figura 15.26 si ricava che $\tan \theta = y/L$, perciò:

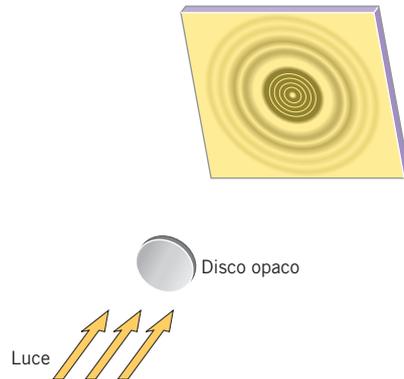
$$2y = 2L \tan \theta = 2(0,40 \text{ m})(\tan 4,7^\circ) = \boxed{0,066 \text{ m}}$$

► Ripetendo il calcolo precedente con $d = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, si ottiene: $\boxed{2y = 0,13 \text{ m}}$


Figura 15.26

La distanza $2y$ è la larghezza della frangia chiara centrale.

Un curioso effetto dovuto alla diffrazione si può vedere illuminando con una sorgente puntiforme un disco di materiale opaco, ad esempio una moneta (figura 15.27). L'interferenza costruttiva delle onde diffratte attorno al bordo circolare del disco genera sullo schermo un punto chiaro al centro dell'ombra, mentre all'interno dell'ombra si formano frange circolari chiare. Inoltre il confine tra l'ombra circolare e lo schermo luminoso non è netto, ma è formato da frange circolari concentriche chiare alternate a frange scure. Queste frange sono analoghe a quelle prodotte da una fenditura singola e sono dovute all'interferenza delle onde sferiche secondarie che provengono da sorgenti puntiformi vicine al bordo del disco.

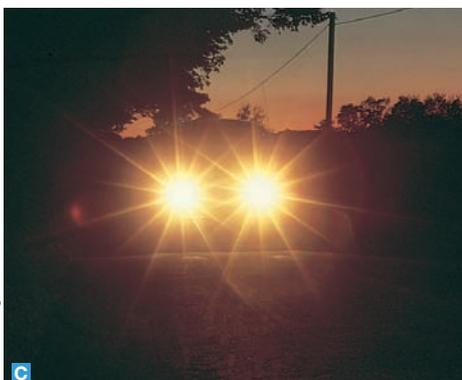
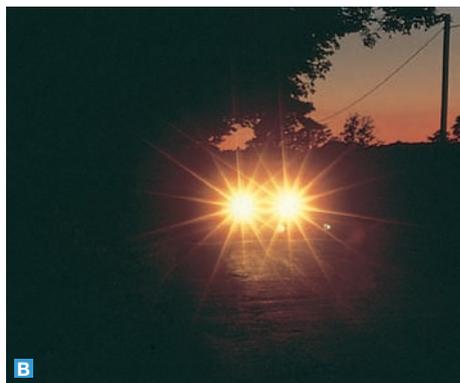

Figura 15.27

La figura di diffrazione prodotta da un disco opaco è formata da un punto chiaro al centro dell'ombra scura, frange circolari chiare all'interno dell'ombra e frange chiare alternate a frange scure che circondano l'ombra.

15.6 Il potere risolvente

Il **potere risolvente** di un dispositivo ottico è la capacità di produrre immagini separate di oggetti vicini tra loro. Nella figura 15.28A i due fari dell'automobile sono confusi in un'unica immagine: per ottenere due immagini distinte, e quindi «risolvere» le due sorgenti, bisogna usare un obiettivo con maggiore potere risolutivo.

La diffrazione limita il potere di risoluzione degli strumenti ottici che, in genere, sono formati da lenti e diaframmi circolari. In modo analogo al caso di una fenditura, la diffrazione si presenta anche quando la luce passa attraverso un foro


Figura 15.28

I fari di un'automobile sono fotografati a varie distanze dalla macchina fotografica. Quando l'auto è lontana, nella foto non sono distinguibili i due fari. Una macchina fotografica con maggiore potere risolutivo sarebbe in grado di restituire le immagini distinte di ciascuno dei fari.

circolare (figura 15.29). In questo caso la figura di diffrazione è formata da un disco luminoso centrale e da una successione alternata di frange concentriche scure e luminose. La prima frangia scura dista dal centro del disco luminoso un angolo θ tale che:

$$\text{sen } \theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (15.6)$$

dove D è il diametro del foro e λ è la lunghezza d'onda della luce che lo attraversa.

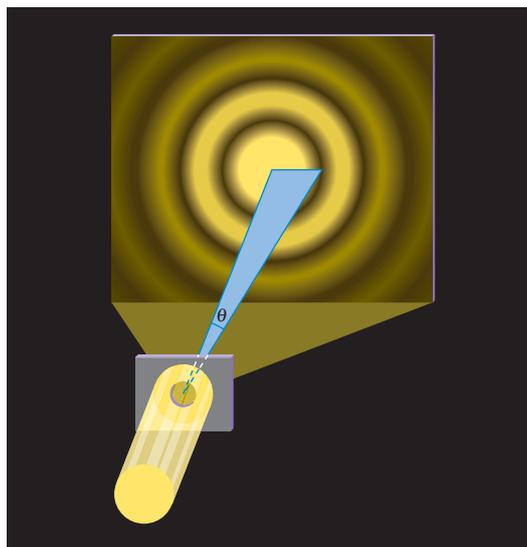


Figura 15.29

Quando la luce passa attraverso un piccolo foro circolare, si forma una figura di diffrazione su uno schermo oltre il foro. L'angolo θ individua la prima frangia scura vicino alla regione centrale. L'intensità delle frange luminose e il diametro dell'apertura sono stati esagerati per chiarezza.

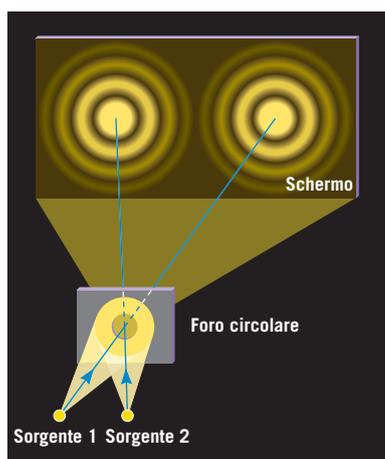


Figura 15.30

Quando la luce proveniente da due sorgenti puntiformi attraversa un foro circolare, su uno schermo oltre il foro si formano due figure di diffrazione. In questo caso le immagini sono completamente risolte perché gli oggetti sono separati da un angolo grande.

Quando la luce proveniente da due sorgenti distinte attraversa un foro circolare, si formano due figure di diffrazione come mostra la figura 15.30. Se le due sorgenti sono separate da un angolo piccolo, le loro figure di diffrazione si sovrappongono parzialmente sullo schermo (figura 15.31). Per stabilire se le loro immagini possono essere considerate separate, e quindi se le due sorgenti appaiono distinte, si applica il **criterio di Rayleigh**, dovuto al fisico inglese John William Rayleigh (1842-1919), noto come Lord Rayleigh.

■ CRITERIO DI RAYLEIGH

Due sorgenti puntiformi appaiono separate quando il centro della figura di diffrazione di una di esse non è interno alla prima frangia scura della figura di diffrazione dell'altra.

L'angolo minimo θ_{\min} tra le due sorgenti per il quale le loro immagini sono distinte è tale che:

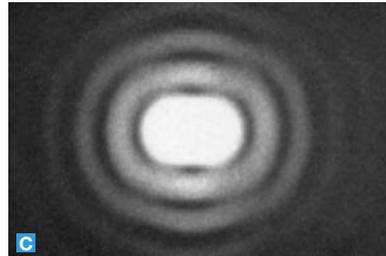
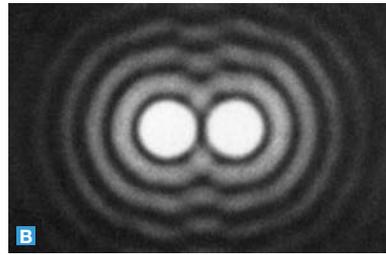
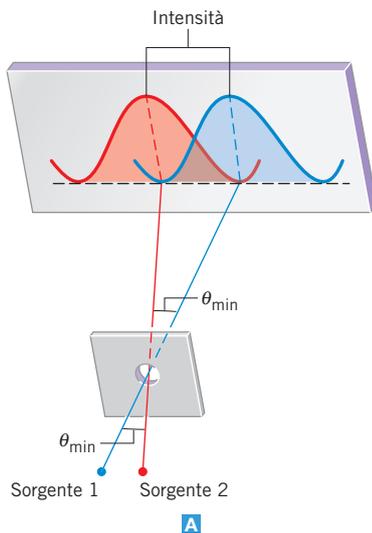
$$\text{sen } \theta_{\min} \approx 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Poiché per angoli piccoli $\text{sen } \theta_{\min} \approx \theta_{\min}$, le due sorgenti appaiono separate quando la loro distanza angolare è maggiore di:

$$\theta_{\min} \approx 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (15.7)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce che esse emettono e D è l'apertura del dispositivo ottico con cui sono osservate.

Gli strumenti progettati per risolvere sorgenti separate da piccolissima distanza angolare hanno una grande apertura D e usano luce della più piccola lunghezza d'onda possibile. Per esempio, il telescopio *Hubble* ha un potere risolutivo di circa $\theta_{\min} = 1 \cdot 10^{-7}$ rad, cioè è in grado di risolvere due sorgenti puntiformi che distano fra loro 1 cm quando sono poste a 100 km di distanza dal telescopio.

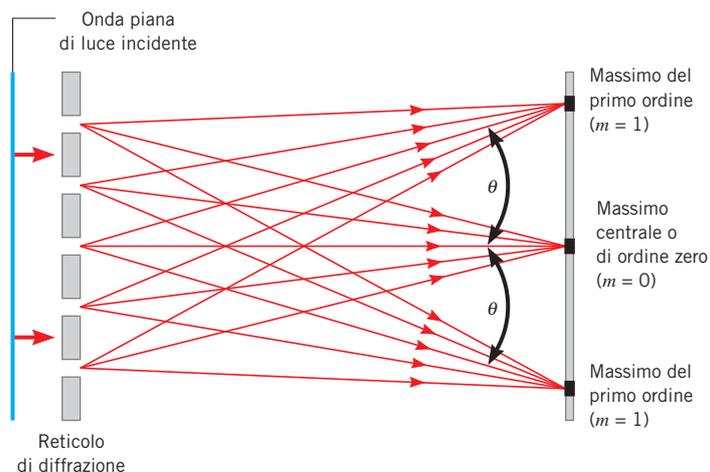

Figura 15.31

- A.** Secondo il criterio di Rayleigh, le due sorgenti puntiformi sono risolte perché il massimo centrale di un'immagine non cade dentro la prima frangia scura dell'altra immagine.
- B.** La fotografia mostra due figure di diffrazione che si sovrappongono ma si possono ancora risolvere.
- C.** Se la separazione angolare tra le due sorgenti non è abbastanza grande, le loro figure di diffrazione si sovrappongono al punto da apparire come un'unica sorgente allungata.

15.7 Il reticolo di diffrazione

Un **reticolo di diffrazione** consiste in una lastra su cui sono praticate numerose incisioni parallele equispaziate e molto vicine fra loro, fino a 40 000 per centimetro. Quando è illuminato da luce monocromatica, il reticolo produce su uno schermo una figura di diffrazione molto netta.

La figura 15.32 mostra le tre frange chiare centrali formate da un reticolo di diffrazione con 5 fenditure. Ogni frangia luminosa è individuata da un angolo θ rispetto alla frangia centrale. Le frange luminose che hanno la massima intensità sono dette **frange principali** o **massimi principali**, per distinguerle dalle altre frange chiare, dette *secondarie*, che si formano fra esse.

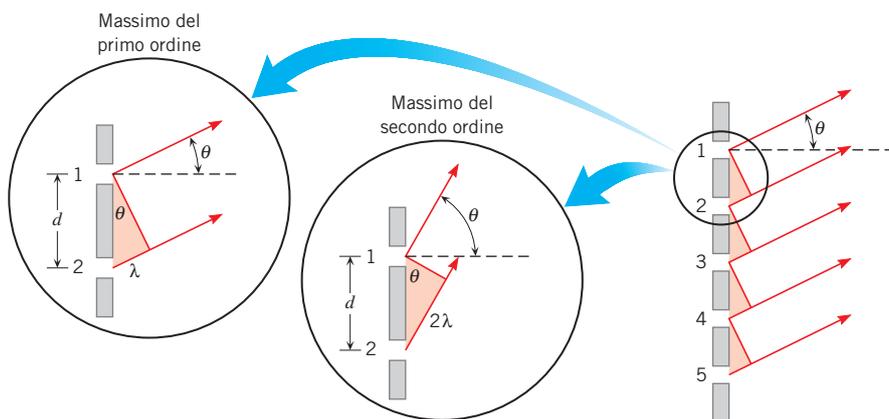

Figura 15.32

Quando la luce attraversa un reticolo di diffrazione, si formano una frangia centrale ($m = 0$) e varie frange di ordine superiore ($m = 1, 2, 3, \dots$) su uno schermo.

Le frange principali sono l'effetto dell'interferenza costruttiva dei raggi che escono dalle fenditure. Consideriamo uno schermo molto lontano dal reticolo, in modo che i raggi che interferiscono in un punto dello schermo siano praticamente paralleli fra loro come in figura 15.33 a pagina seguente. Per raggiungere il punto in cui si forma la frangia principale del primo ordine, la luce dalla fenditura 2 percorre una distanza di una lunghezza d'onda maggiore di quella percorsa dalla luce proveniente dalla fenditura 1. Come mostrano i triangoli colorati della figura 15.33, la differenza di cammino tra i raggi provenienti da due fenditure vicine è pari a una lunghezza d'onda. Il massimo del primo ordine si forma sullo schermo a un angolo θ tale che $\text{sen } \theta = \lambda/d$, dove d è la distanza tra le fenditure. Il massimo del secondo ordine si

Figura 15.33

I due particolari mostrano le condizioni che portano alla formazione del primo e del secondo massimo principale da parte del reticolo di diffrazione sulla destra.



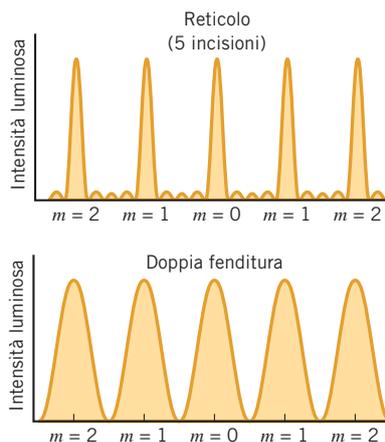
forma a un angolo θ tale che $\text{sen } \theta = 2\lambda/d$. In generale, i massimi principali si hanno per gli angoli θ tali che:

$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{d} \quad \text{con } m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (15.8)$$

L'equazione (15.8) è identica all'equazione (15.1) che abbiamo visto nel caso della doppia fenditura. Un reticolo produce però frange luminose che sono più nette e definite di quelle prodotte da una doppia fenditura, come mostra il grafico dell'intensità luminosa di figura 15.34.

Figura 15.34

Le frange luminose prodotte da un reticolo di diffrazione sono molto più strette di quelle prodotte da una coppia di fenditure. Nota i tre massimi secondari tra ciascuna coppia di massimi principali. All'aumentare del numero di fenditure del reticolo, i massimi secondari diventano sempre più piccoli.



ESEMPIO 4 ■ Reticolo di diffrazione

La separazione dei colori con un reticolo di diffrazione

Un fascio di luce violetta ($\lambda = 410 \text{ nm}$) e rossa ($\lambda = 660 \text{ nm}$) attraversa un reticolo con $1,0 \cdot 10^4$ linee per centimetro.

► Per ciascuna componente calcola l'angolo a cui si forma il primo massimo.

Ragionamento e soluzione

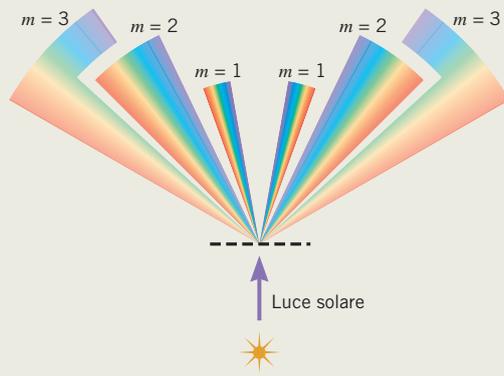
La distanza tra le fenditure è:

$$d = \frac{1}{1,0 \cdot 10^4 \text{ linee/cm}} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Utilizzando l'equazione (15.8) con $m = 1$, otteniamo:

$$\text{Luce violetta} \quad \theta_{\text{viol}} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{410 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \right) = \boxed{24^\circ}$$

$$\text{Luce rossa} \quad \theta_{\text{ros}} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{660 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \right) = \boxed{41^\circ}$$



Se il reticolo dell'esempio precedente è attraversato da luce solare, in cui sono presenti tutti i colori, sullo schermo i massimi del primo ordine di ciascun colore si formano fra i 24° e i 41° . A causa di ciò, si osserva la dispersione dei colori su ciascun lato della frangia centrale. La figura 15.35 mostra che i massimi del secondo ordine sono completamente separati da quelli del primo ordine, ma che i massimi degli ordini successivi si sovrappongono parzialmente. Il massimo centrale ($m = 0$) è bianco, perché i colori si sovrappongono sullo schermo.

■ Reti a riflessione

Una superficie riflettente su cui sono incise linee parallele equispaziate e molto vicine fra loro funziona da reticolo di diffrazione, perché le incisioni si comportano come sorgenti coerenti.

Un esempio di reticolo a riflessione è fornito dai CD e dai DVD. Le informazioni sono memorizzate sulla superficie dei dischi mediante microscopiche incisioni. Quando un fascio di luce bianca colpisce la superficie del disco i massimi principali dei colori sono riflessi con angoli diversi, proprio come nel caso visto nell'esempio precedente. A causa della diffrazione, la superficie dei CD e dei DVD appare colorata a bande (figura 15.36).

In natura esistono molti esempi di colorazioni dovute a effetti di diffrazione. I colori sgargianti di piante (figura 15.37A) e insetti (figura 15.37B) sono spesso causati dalla diffrazione che la luce subisce da parte di microscopiche strutture geometriche sulla superficie di foglie e ali.

Figura 15.35

Quando la luce solare attraversa un reticolo di diffrazione, si forma un arcobaleno in corrispondenza di ogni massimo principale ($m = 1, 2, 3, \dots$). Solo il massimo centrale ($m = 0$) è bianco.

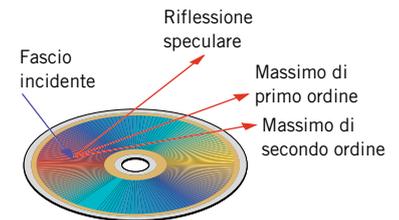


Figura 15.36

Quando un fascio laser illumina un CD, osserviamo numerosi fasci riflessi. Il più intenso di questi è il fascio speculare, il cui angolo di riflessione è uguale al suo angolo di incidenza, esattamente come se il CD fosse uno specchio piano. Gli ulteriori fasci riflessi vengono osservati ad angoli che corrispondono ai massimi principali del reticolo.

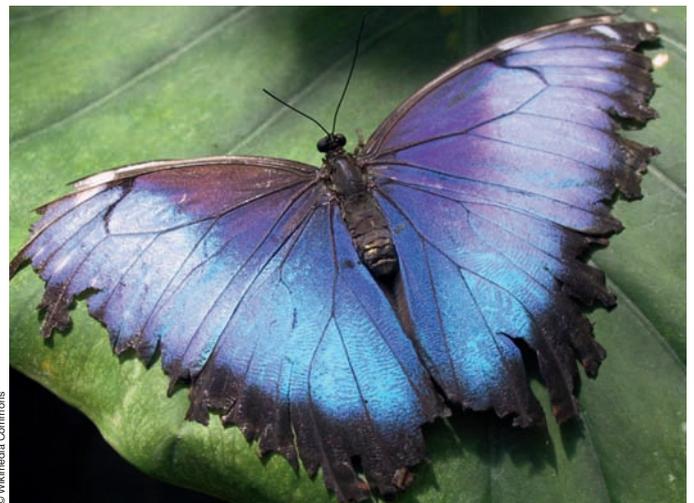


Figura 15.37

A. La *Selaginella uncinata* è una delle circa 700 specie del genere *Selaginella*, comprendente piccole felci diffuse soprattutto in zone tropicali e subtropicali. Le sue foglie presentano dei caratteristici riflessi metallici.

B. La *Morpho menelaus* è una farfalla tropicale dell'America centrale e meridionale, caratterizzata da vivaci colori iridescenti e da una notevole apertura alare (circa 15 cm). I maschi adulti hanno colori più brillanti delle femmine.

La natura della luce: onda o corpuscolo?

■ Tra Seicento e Settecento

Secondo René Descartes, la luce era trasportata da globuli di materia trasparente emessi dai corpi luminosi. Nella sua *Micrographia* del 1667, l'inglese Robert Hooke osservò invece la propagazione non in linea retta della luce (vi può cioè essere una zona illuminata anche nel cono d'ombra d'un oggetto opaco, fenomeno già descritto dal gesuita italiano Francesco Maria Grimaldi, che lo aveva chiamato *diffrazione*) e attribuì la causa del fenomeno alla natura ondulatoria della luce, ipotizzando onde che si propagano nell'etere come sfere concentriche. Christiaan Huygens dette impulso alla teoria ondulatoria formulando il principio che porta il suo nome, secondo cui ogni punto raggiunto dal fronte d'onda diviene a sua volta sorgente di un'onda che si propaga con velocità finita in forma di semisfera. Riuscì così a spiegare la riflessione e la rifrazione.

Nel giro di pochi anni la teoria ondulatoria fu offuscata dall'*Ottica* di Newton, apparsa nel 1704, nella quale l'autore ipotizzava che la luce fos-

se formata da un'infinità di particelle emesse da un corpo in tutte le direzioni.

Secondo Newton la luce bianca è un miscuglio di raggi di diverso colore, rifratti in maniera diversa se li si fa incidere su un prisma di vetro: di più l'azzurro, di meno il rosso.

Il Settecento fu dominato dalla concezione corpuscolare newtoniana con poche eccezioni, tra cui Leonhard Euler, fautore della teoria ondulatoria, il quale sostenne che i colori sono legati alla frequenza delle vibrazioni che producono la luce. Nel 1727 l'astronomo britannico James Bradley scoprì l'aberrazione stellare, consistente in un moto apparente dei corpi celesti che dipende dal moto terrestre attorno al Sole e dal fatto che la velocità c della luce non è infinita. La posizione «vera» di un corpo celeste risulta spostata da quella osservata di un angolo che dipende dal rapporto v/c tra la velocità della Terra v e la velocità della luce c . Dall'analisi dell'aberrazione di molte stelle Bradley concluse che la velocità della luce era indipendente dalla distanza dalla Terra ed era la

stessa per ogni stella mentre, in base alla teoria corpuscolare, avrebbe dovuto dipendere dalla velocità dell'emettitore e dello strumento ricevente.

■ Da Young a Fresnel

Nel 1801 l'inglese Thomas Young realizzò un esperimento nel quale appariva chiara la natura ondulatoria della luce. Fece passare un fascio di luce attraverso due fenditure molto vicine praticate su uno schermo opaco e ne raccolse su uno schermo l'immagine, che consisteva di bande chiare alternate a bande scure, cosa che interpretò come fenomeno di interferenza. In quegli anni, Young gettò le basi di una teoria fondata sull'ipotesi che la luce fosse costituita dalle vibrazioni di un fluido elastico: l'etere. Riuscì a spiegare anche la diffrazione e investigò sulla doppia rifrazione prodotta nei cristalli di calcite, aventi proprietà ottiche differenti in direzioni diverse.

In Inghilterra la teoria di Young fu osteggiata a causa del peso della tradizione newtoniana; in Francia si scontrò con gli esponenti della scuola di Pierre-Simon de Laplace, seguaci



Una illustrazione del microscopio dalla *Micrographia* di Robert Hooke.



Fu Newton per primo a spiegare il fenomeno dell'arcobaleno. Lo scrittore John Keats lo accusò di aver distrutto la poesia dell'arcobaleno con la spiegazione scientifica.

anch'essi della teoria corpuscolare. Nel 1808 fu scoperta la polarizzazione della luce, per spiegare la quale Young dovette ipotizzare che la luce consistesse anche di vibrazioni trasversali e non solo longitudinali, come si era creduto fino ad allora.

La teoria ondulatoria si affermò definitivamente col francese Jean Augustin Fresnel, il quale, in una serie di saggi scritti tra il 1815 e il 1827, riuscì a spiegare tutti i fenomeni ottici noti partendo dall'ipotesi che la luce consistesse di vibrazioni trasversali dell'etere. Questo tuttavia introduceva in fisica un fluido, l'etere, dalle proprietà fisiche contrastanti: da una parte doveva essere sottile e impalpabile, per consentire il moto dei pianeti senza opporre resistenza; dall'altra, essendo le vibrazioni trasversali possibili solo nei solidi, doveva avere la natura di un corpo rigido.

■ L'ottica dei corpi in moto

Stimolato da François Arago, che investigava sui risultati di Bradley sull'aberrazione stellare, Fresnel trattò l'ottica dei corpi in moto supponendo

che questi avessero potere rifrangente proporzionale alla quantità di etere al loro interno, che l'etere nei corpi avesse densità maggiore che nel vuoto e che l'etere in eccesso rispetto al vuoto venisse trascinato dai corpi. Ne risultava che, rispetto a un osservatore nell'etere, la velocità c' della luce che si propaga in un mezzo trasparente in moto rispetto all'etere con velocità w diventava $c' = c/n + kw$, dove c è la velocità della luce nell'etere, n è l'indice di rifrazione del materiale di cui è fatto il corpo e $k = 1 - 1/n^2$ è il cosiddetto coefficiente di trascinamento di Fresnel. Da una parte questo giustificava i risultati di Bradley e Arago, mostrando che i fenomeni luminosi non sono affetti dal moto terrestre rispetto all'etere, almeno considerando solo i termini di primo ordine in v/c (cioè scartando nelle formule i termini in cui v/c , il cui valore è in genere molto piccolo, compare con potenze superiori alla prima). Dall'altra risultava che la velocità della luce in un corpo che si muove rispetto all'etere non obbedisce al principio di relatività galileiano: fenomeni ottici e meccanici sembrava-

no quindi obbedire a principi di relatività diversi. L'ipotesi di Fresnel del trascinamento parziale dell'etere fu confermata nel 1851 da un esperimento condotto da Hippolyte Fizeau e in altri esperimenti (tutti accurati al primo ordine in v/c) e si rivelò uno dei risultati più importanti della fisica del XIX secolo.

■ Strumento di unificazione

L'ottica ondulatoria fu un potente strumento riformatore per tutta la fisica, principalmente per la termodinamica e per l'elettromagnetismo. La conquista di concetti come la trasmissione di un'azione mediante moto di materia e l'esistenza di un mezzo che tutto pervade, responsabile di trasmettere la luce e poi anche l'interazione elettromagnetica, determinarono la nascita della fisica come disciplina unificando settori, come la scienza del calore o dell'elettricità, fino ad allora considerati scienze autonome.

■ Nuove concezioni

All'inizio del Novecento il concetto di etere, centrale nel secolo precedente, fu reso superfluo dalla teoria della relatività di Einstein (1879-1955), mentre all'idea di luce come fenomeno ondulatorio si affiancò nuovamente (ancora grazie a Einstein e ad altri) l'ipotesi di luce come entità capace, in certe situazioni, di propagarsi e interagire con la materia come costituita da «particelle». È una storia affascinante che vedremo in seguito; anticipandone la conclusione possiamo dire che alla domanda su quale sia la natura della luce, se corpuscolare o ondulatoria, la natura ha risposto «tutte e due», come una volta fece un fisico del Novecento, geniale e un po' bizzarro, alla richiesta se nel tè volesse latte o limone.



Un particolare sistema di lenti, dette *lenti di Fresnel* dal nome dello scienziato Augustin Fresnel che le inventò, è oggi usato anche per l'energia solare.

L'ordine di grandezza

Qual è la distanza massima dalla quale un astronauta riesce a vedere a occhio nudo la Grande Muraglia cinese?



La distanza massima dalla quale è possibile distinguere dallo spazio la Grande Muraglia cinese è data dal rapporto tra la larghezza della Muraglia e la risoluzione dell'occhio umano.

IL MODELLO

(distanza massima dalla quale è visibile dallo spazio la Muraglia cinese) = (larghezza della Muraglia) / (risoluzione dell'occhio umano)

I NUMERI

- **Larghezza della Muraglia** = 6,5 m
- **Risoluzione dell'occhio umano** =
 = (limite di Rayleigh per l'occhio umano) =
 = 1,22 (lunghezza d'onda della luce che colpisce l'occhio) /
 (diametro medio della pupilla) =
 = 1,22 ($5,3 \cdot 10^{-7}$ m) / ($4 \cdot 10^{-3}$ m) = $2 \cdot 10^{-4}$

IL RISULTATO

distanza massima =
 = (6,5 m) / $\tan(2 \cdot 10^{-4}) \approx (6,5 \text{ m}) / (2 \cdot 10^{-4}) \approx$
 $\approx 3,3 \cdot 10^4 \text{ m} = 33 \text{ km}$

L'ordine di grandezza è: 10^4 km

La risoluzione dell'occhio umano, ovvero la capacità di percepire come distinti due oggetti separati da una certa distanza, consente a un astronauta di vedere la Muraglia cinese da un'altezza massima di 33 km.

Un paragone Se fossimo in grado di vedere la Muraglia cinese dalla Luna, saremmo in grado di vedere un CD a 3 mila chilometri di distanza e distingueremmo perfino un virus a occhio nudo.

Le fonti

Larghezza della Muraglia: China.org
 (www.china.org.cn/english/MATERIAL/31255.htm)

Lunghezza d'onda della luce che colpisce l'occhio (luce verde, lunghezza d'onda media dello spettro visibile):
 Handbook of fundamental Spectroscopic Correlation Charts
 (books.google.com/books?id=FgjHjhCh5wsC&pg=PP1&dq=intitle:%22CRC+Handbook+of+Fundamental+Spectroscopic+Correlation+Charts%22&ei=A3TYRvGjJYqKoQK5oYzMBQ&sig=rsr8R_QF8j-fcWljMbTPF14Kcms#PPA2,M1)

Diametro medio della pupilla:
 (www.funsci.com/fun3_it/sini/sn/l'occhio.pdf)

Stima l'ordine di grandezza



A che distanza dalla Terra deve trovarsi un astronauta per avere la visione completa del nostro pianeta?

IL MODELLO

(distanza Terra-astronauta) = (raggio medio terrestre) / $\tan[1/2 (\text{campo visivo longitudinale dell'uomo})]$

I NUMERI

- Raggio medio terrestre** = $6,37 \cdot 10^6$ m
- Campo visivo longitudinale dell'uomo** = 135°

IL RISULTATO

Distanza Terra-astronauta = m

Le fonti

Raggio medio terrestre: *Atlante*, Zanichelli

Campo visivo longitudinale dell'uomo:
 Electrical Engineering and Computer Science, UC Berkeley
 (www.cs.berkeley.edu/~malik/cs294/lecture2-RW.pdf)

2. Il principio di sovrapposizione e l'interferenza della luce

Principio di sovrapposizione

- Il principio di sovrapposizione afferma che, quando due o più onde sono presenti contemporaneamente nella stessa regione dello spazio, la perturbazione risultante è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde.

Interferenza costruttiva

- L'interferenza costruttiva tra due onde avviene nei punti in cui esse si sommano «cresta a cresta» e «ventre a ventre» rinforzandosi a vicenda. Quando due onde, emesse in concordanza di fase, viaggiano per un certo tempo e poi interferiscono in un punto, l'interferenza è costruttiva ogni volta che i cammini ℓ_1 e ℓ_2 percorsi dalle onde sono uguali, oppure differiscono di un numero intero qualunque di lunghezze d'onda:

$$\ell_2 - \ell_1 = m\lambda \quad \text{con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Interferenza distruttiva

- L'interferenza distruttiva tra due onde avviene nei punti in cui esse si sommano «cresta a ventre» e «ventre a cresta» annullandosi a vicenda. Quando due onde, emesse in opposizione di fase, viaggiano per un certo tempo e poi interferiscono in un punto, l'interferenza è distruttiva ogni volta che i cammini ℓ_1 e ℓ_2 percorsi dalle onde differiscono di un numero dispari di mezze lunghezze d'onda, cioè quando:

$$\ell_2 - \ell_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Sorgenti coerenti

- Due sorgenti d'onda sono chiamate coerenti se le onde che esse emettono mantengono costante nel tempo la loro relazione di fase. Per osservare i fenomeni di interferenza è necessario usare sorgenti coerenti.

3. L'esperimento di Young

Esperimento della doppia fenditura

- Nell'esperimento di Young la luce attraversa una coppia di fenditure molto sottili e molto vicine, e produce su uno schermo posto davanti alle fenditure una figura d'interferenza formata da frange scure alternate a frange chiare. Le frange sono dovute a fenomeni d'interferenza distruttiva e costruttiva.

Frangie d'interferenza chiare prodotte da una doppia fenditura

- L'angolo θ che individua la posizione di una frangia chiara di ordine m si ottiene dalla relazione:

$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{d} \quad \text{con } m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (15.1)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce e d è la distanza tra le fenditure.

Frangie d'interferenza scure prodotte da una doppia fenditura

- L'angolo θ che individua la posizione di una frangia scura di ordine m si ottiene dalla relazione:

$$\text{sen } \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d} \quad \text{con } m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (15.2)$$

4. Interferenza su lamine sottili

Fattori che determinano l'interferenza su lamine

- Quando la luce incide su lamine sottili, le onde luminose riflesse dallo strato superiore e da quello inferiore danno luogo a fenomeni di interferenza. I fattori importanti nell'interferenza su lamine sono:
 - lo spessore della lamina rispetto alla lunghezza d'onda $\lambda_{\text{lamina}} = \lambda_{\text{vuoto}}/n$ della luce nel materiale costituente la lamina;
 - l'eventuale cambiamento di fase dell'onda riflessa: quando la luce passa da un materiale con indice di rifrazione minore a un materiale con indice maggiore, la riflessione sulla superficie di separazione avviene con un cambiamento di fase equivalente a mezza lunghezza d'onda della luce nella lamina.

5. La diffrazione della luce

Diffrazione ■ La diffrazione è l'incurvatura che le onde presentano attorno agli ostacoli oppure vicino ai bordi di una fenditura molto stretta. La diffrazione è provocata da un fenomeno di interferenza che può essere più facilmente compreso usando il principio di Huygens.

Principio di Huygens ■ Il principio di Huygens afferma che ogni punto di un fronte d'onda si comporta come sorgente di onde sferiche secondarie che si propagano verso l'esterno con la stessa velocità dell'onda; il fronte d'onda nell'istante successivo è la superficie tangente a tutte le onde sferiche secondarie.

Frangie di diffrazione scure prodotte da una fenditura singola ■ Quando la luce attraversa una fenditura molto sottile e va a incidere su uno schermo, la sovrapposizione delle onde sferiche secondarie descritte dal principio di Huygens dà origine a una figura di diffrazione formata da frangie scure alternate a frangie luminose. L'angolo θ che individua la posizione di una frangia scura di ordine m su entrambi i lati della frangia chiara centrale si ottiene dalla relazione:

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d} \quad \text{con } m = 1, 2, 3, \dots \quad (15.5)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce e d è la larghezza della fenditura.

6. Il potere risolvete

Potere risolvete ■ Il potere risolvete di un dispositivo ottico è la capacità di produrre immagini separate di oggetti vicini tra loro. La diffrazione limita il potere risolutivo degli strumenti ottici che sono formati da lenti e diaframmi circolari.

Criterio di Rayleigh ■ Il criterio di Rayleigh stabilisce che due sorgenti puntiformi appaiono separate quando il centro della figura di diffrazione di una di esse non è interno alla prima frangia scura della figura di diffrazione dell'altra. L'angolo minimo tra le due sorgenti per il quale le loro immagini sono distinte è:

$$\theta_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (15.7)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce che esse emettono e D è l'apertura del dispositivo ottico con cui sono osservate.

7. Il reticolo di diffrazione

Reticolo di diffrazione ■ Un reticolo di diffrazione consiste in una lastra su cui sono praticate numerose incisioni parallele equispaziate e molto vicine fra loro. Quando la luce attraversa un reticolo, forma su uno schermo una figura di diffrazione costituita da un alternarsi regolare di frange luminose e frange scure. Le frange luminose sono dette massimi principali e si formano a un angolo θ dal massimo centrale tale che:

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d} \quad \text{con } m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (15.8)$$

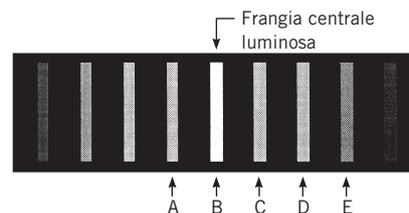
dove λ è la lunghezza d'onda della luce e d è la distanza tra le fenditure del reticolo.

Domande

- È possibile osservare frange d'interferenza in un esperimento di Young con luce di lunghezza d'onda maggiore della distanza tra le due fenditure?
- Una lente è ricoperta da una lamina antiriflesso che elimina la riflessione della luce verde quando questa incide perpendicolarmente sulla lente. Il riflesso della luce verde è assente anche se la luce incide sulla lente con un angolo di 45° ?
- Quando la luce solare incide su una lamina di acqua e sapone, la lamina diventa iridescente. Ciò è dovuto al fatto che l'interferenza distruttiva rimuove dalla luce riflessa lunghezze d'onda differenti in punti diversi, a seconda dello spessore della pellicola. A mano a mano che la pellicola si assottiglia, diventa sempre più scura fino a quando, appena prima di rompersi, appare nera. In questa situazione tutte le lunghezze d'onda subiscono interferenza distruttiva. Sai spiegare perché?
- Due lastre dello stesso vetro sono ricoperte da lamine sottili fatte di materiali differenti ma dello stesso spessore. Le lastre sono illuminate dalla luce solare. Perché la luce riflessa dalle due lastre è diversa?
- Perché un'onda sonora è diffratta molto più di un'onda luminosa nel passaggio attraverso una porta?
- Che cosa accade alla distanza tra le frange d'interferenza prodotte da un reticolo di diffrazione se l'intero apparato (sorgente luminosa, reticolo e schermo) è immerso in acqua?

Test

- La luce proveniente da due lampadine non mostra effetti di interferenza perché:
 - non è monocromatica.
 - le due sorgenti non sono coerenti.
 - le due sorgenti sono in opposizione di fase.
 - le figure di interferenza sono troppo piccole per essere viste.
- Una doppia fenditura è illuminata da luce con lunghezza d'onda $6,00 \cdot 10^2$ nm. La prima frangia luminosa è separata dal massimo centrale di 3,0 cm su uno schermo che dista 4,0 m dalle fenditure. Qual è la distanza tra le due fenditure?
 - $4,0 \cdot 10^{-5}$ m
 - $8,0 \cdot 10^{-5}$ m
 - $1,2 \cdot 10^{-4}$ m
 - $1,6 \cdot 10^{-4}$ m
- Che cosa si osserva sullo schermo in un esperimento di Young con luce bianca?
 - Una frangia centrale luminosa e niente altro.
 - Una frangia centrale scura e una serie di frange alternate bianche e scure.
 - Una frangia centrale bianca e una serie di frange alternate colorate e scure.
 - Uno schermo illuminato in modo omogeneo.
- In un esperimento di Young le due fenditure distano $1,20 \cdot 10^{-4}$ m e lo schermo è posto a 3,50 m da esse. La distanza fra il massimo centrale e il massimo del secondo ordine è 0,0415 m. Qual è la lunghezza d'onda della luce utilizzata?
 - 711 nm
 - 689 nm
 - 642 nm
 - 555 nm
- Considera la seguente figura di interferenza ottenuta in un esperimento con doppia fenditura. La frangia del terzo ordine e la frangia che corrisponde a una differenza di fase di 2λ sono rispettivamente:
 - E, D
 - D, E
 - C, A
 - C, E



- Un fascio di luce con lunghezza d'onda nel vuoto λ incide perpendicolarmente su una lente ($n = 1,6$). La lente è rivestita da una lamina antiriflesso ($n = 1,3$) di spessore k . La condizione per non avere luce riflessa è:
 - $2k = \frac{\lambda}{2}$
 - $2k = \frac{\lambda}{1,3}$
 - $2k = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{1,6}$
 - $2k = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{1,3}$
- Se in un esperimento di Young si aumenta la lunghezza d'onda della luce usata:
 - appaiono sullo schermo molte più frange.
 - le frange diventano più luminose.
 - la distanza tra le frange scure diminuisce.
 - la separazione angolare tra le frange aumenta.

- 8** Se in un esperimento di Young si aumenta la distanza tra le due fenditure:
- A la frangia centrale cambia posizione.
 - B le frange diventano più luminose.
 - C la distanza tra le frange scure aumenta.
 - D la distanza tra le frange diminuisce.
- 9** Una lamina trasparente antiriflesso ($n = 1,4$) è posta su una lente ($n = 1,5$). Quale deve essere lo spessore della lamina per eliminare la riflessione della luce con lunghezza d'onda $5,00 \cdot 10^2$ nm nell'aria?
- A 89 nm
 - B 125 nm
 - C 170 nm
 - D 250 nm
- 10** Un fascio di luce monocromatica (lunghezza d'onda nella lamina λ_{lam}) incide perpendicolarmente su una lamina sottile. Lo spessore più piccolo per cui la luce riflessa ha un massimo è:
- A λ_{lam}
 - B $(3/4) \lambda_{\text{lam}}$
 - C $\lambda_{\text{lam}}/2$
 - D $\lambda_{\text{lam}}/4$
- 11** La diffrazione del suono è un fenomeno più appariscente della diffrazione della luce perché:
- A le onde sonore sono longitudinali, mentre quelle luminose sono trasversali.
 - B il suono si propaga nell'aria, la luce no.
 - C la velocità del suono è molto più piccola di quella della luce.
 - D la lunghezza d'onda delle onde sonore è molto più grande di quella delle onde luminose.
- 12** Un fascio di luce di 600,0 nm attraversa una fessura larga $6,5 \cdot 10^{-6}$ m. Su uno schermo si forma una figura di diffrazione il cui massimo centrale è largo 3,5 m. Qual è la distanza tra la fenditura e lo schermo?
- A 4,8 m
 - B 9,5 m
 - C 19 m
 - D 38 m
- 13** Un fascio di luce monocromatico ($\lambda = 644$ nm) attraversa una fenditura e forma una figura di diffrazione in cui la prima frangia scura corrisponde a $\theta = 0,125^\circ$. Qual è la larghezza della fenditura?
- A $1,25 \cdot 10^{-4}$ m
 - B $1,66 \cdot 10^{-4}$ m
 - C $2,95 \cdot 10^{-4}$ m
 - D $3,80 \cdot 10^{-4}$ m
- 14** Un satellite spia orbita a $1,0 \cdot 10^6$ m dal suolo. Usando luce di 600 nm, è in grado di risolvere i binari della ferrovia che distano fra loro 1,4 m. Il diametro d dell'obiettivo del suo telescopio è:
- A $d < 0,14$ m
 - B $0,14 \text{ m} < d < 0,35$ m
 - C $0,35 \text{ m} < d < 0,52$ m
 - D $d > 0,52$ m
- 15** Quando è illuminato da luce con $\lambda = 600,0$ nm, un reticolo di diffrazione largo 30,0 mm forma il secondo massimo principale a $30,0^\circ$. Qual è il numero totale di fenditure del reticolo?
- A 10 000
 - B 11 500
 - C 12 500
 - D 15 000

Problemi

2. Il principio di sovrapposizione e l'interferenza della luce ■

3. L'esperimento di Young

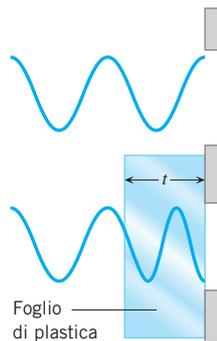
- 1**  In a Young's double-slit experiment, the angle that locates the second-order bright fringe is $2,0^\circ$. The slit separation is $3,8 \cdot 10^{-5}$ m.
- What is the wavelength of the light?
- 2** Due sorgenti d'onda distano 4,0 m ed emettono in fase onde identiche di lunghezza d'onda 5,00 m. Sulla retta che congiunge le due sorgenti ci sono due punti in cui avviene lo stesso tipo di interferenza tra le onde emesse.
- L'interferenza è costruttiva o distruttiva?
 - Qual è la posizione di questi due punti?
- 3** Uno schermo piano è posto davanti a una doppia fenditura a una distanza di 4,5 m. La distanza sullo schermo tra la frangia d'interferenza chiara centrale e la frangia chiara del primo ordine è di 0,037 m. La distanza tra le due fenditure è $6,0 \cdot 10^{-5}$ m.
- Calcola la lunghezza d'onda della luce che illumina la doppia fenditura.
- 4** Un esperimento di Young è realizzato con luce di lunghezza d'onda 625 nm e con due fenditure distanti $3,76 \cdot 10^{-6}$ m.
- Calcola il numero massimo di frange luminose che si formano sullo schermo.
- 5** In un esperimento di Young la distanza y tra la frangia chiara del secondo ordine e la frangia chiara centrale è 0,0180 m quando la lunghezza d'onda della luce impiegata è 425 nm. Supponi che gli angoli che individuano le posizioni delle frange sullo schermo siano tanto piccoli che si possa porre $\sin \theta \approx \tan \theta$.
- Calcola la distanza y quando la lunghezza d'onda della luce impiegata è 585 nm.

6 In un esperimento di Young la doppia fenditura è illuminata con una combinazione di luce arancione ($\lambda = 611 \text{ nm}$) e luce blu ($\lambda = 471 \text{ nm}$). I centri delle frange blu del primo ordine si trovano sui bordi esterni di uno schermo piano posto a una distanza di $0,500 \text{ m}$ dalla doppia fenditura. Invece le frange arancione del primo ordine vanno a finire fuori dallo schermo.

► Di quanto e in quale verso (verso la doppia fenditura o lontano da essa) si deve spostare lo schermo perché le frange arancione cadano su di esso? Si può supporre che θ sia molto piccolo, in modo che $\sin \theta \approx \tan \theta$.

7 La figura rappresenta una doppia fenditura in cui una sola delle due fenditure è coperta con un foglio di plastica ($n = 1,60$). Quando la doppia fenditura è illuminata con una luce monocromatica ($\lambda_{\text{vuoto}} = 586 \text{ nm}$), il centro dello schermo appare scuro anziché chiaro.

► Qual è lo spessore minimo del foglio di plastica?



4. Interferenza su lamine sottili

8 Un fascio di luce formato da luce verde ($\lambda_{\text{vuoto}} = 551 \text{ nm}$) e luce rossa ($\lambda_{\text{vuoto}} = 661 \text{ nm}$) incide perpendicolarmente su una lamina di acqua e sapone ($n = 1,33$) circondata da aria.

► Calcola lo spessore minimo della lamina perché sia riflessa solo la luce rossa.

9 Un raggio di luce rossa ($\lambda_{\text{vuoto}} = 691 \text{ nm}$) incide perpendicolarmente su una lamina di acqua e sapone ($n = 1,33$) circondata dall'aria.

► Quali sono i due più piccoli spessori della lamina (in nm) per cui la luce riflessa presenta interferenza costruttiva?

10 Una lamina trasparente ($n = 1,43$) è depositata su una lastra di vetro ($n = 1,52$) per formare un rivestimento antiriflesso. La lamina ha uno spessore di $1,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

► Qual è la più grande lunghezza d'onda (nell'aria) per cui la lamina è stata progettata?

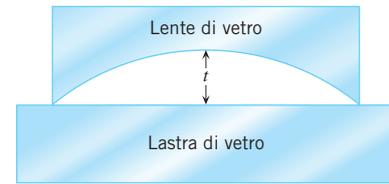
11 Un raggio di luce arancione ($\lambda_{\text{vuoto}} = 611 \text{ nm}$) colpisce perpendicolarmente una lamina di acqua e sapone circondata da aria.

► Qual è il minimo spessore della lamina per cui l'interferenza costruttiva la fa risplendere di luce riflessa?

12 Una lente piano-concava è appoggiata su una lastra di vetro come mostrato in figura. Lo spessore massimo del cuneo d'aria è $t = 1,37 \cdot 10^{-5} \text{ m}$. La lente è illuminata con luce monocromatica di lunghezza d'onda

$\lambda_{\text{vuoto}} = 550 \text{ nm}$. Si osserva una serie di frange simili agli anelli di Newton.

► Calcola il numero di frange luminose.



5. La diffrazione della luce

13 A diffraction pattern forms when light passes through a single slit. The wavelength of the light is 675 nm .

► Determine the angle that locates the first dark fringe when the width of the slit is $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ and $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

14 Un fascio di luce monocromatica ($\lambda = 668 \text{ nm}$) attraversa una fenditura larga $6,73 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ e va a incidere su uno schermo posto a una distanza di $1,85 \text{ m}$ dalla fenditura.

► Qual è la distanza sullo schermo tra il centro della frangia chiara centrale e la frangia chiara del terzo ordine su ciascun lato della frangia centrale?

15 Un fascio di luce monocromatica ($\lambda = 510 \text{ nm}$) incide su una fenditura, che genera una figura di diffrazione su uno schermo piatto distante $0,60 \text{ m}$. La larghezza della frangia centrale sullo schermo è $0,050 \text{ m}$.

► Calcola la larghezza della fenditura.

16 Un fascio di luce monocromatica attraversa una fenditura singola larga $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Su uno schermo piano posto a una distanza di $4,0 \text{ m}$ dalla fenditura si forma una figura di diffrazione. La distanza tra il punto medio della frangia chiara centrale e la prima frangia scura è $3,5 \text{ mm}$.

► Qual è la lunghezza d'onda della luce?

17 Un fascio di luce monocromatica ($\lambda = 651 \text{ nm}$) attraversa una fenditura singola larga $5,47 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

► Quante frange scure si formano su ciascun lato della frangia chiara centrale?

18 La larghezza della frangia chiara centrale di una figura di diffrazione è uguale alla distanza tra lo schermo e la fenditura.

► Calcola il rapporto λ/d tra la lunghezza d'onda della luce e la larghezza della fenditura.

19 Nella figura di diffrazione prodotta da una fenditura singola la frangia centrale è 450 volte più larga della fenditura. La distanza tra lo schermo e la fenditura è $18\,000$ volte maggiore della larghezza della fenditura.

► Qual è il rapporto λ/d , dove λ è la lunghezza d'onda della luce e d è la larghezza della fenditura? Supponi che l'angolo che individua la posizione di una frangia scura sullo schermo sia tanto piccolo che $\sin \theta \approx \tan \theta$.

6. Il potere risolvante

20 Una persona sostiene di riuscire a distinguere, da 1,6 km di distanza, due lampadine fissate agli estremi di un'asticella lunga 10 cm. Le lampadine emettono luce di lunghezza d'onda 498 nm. Il diametro della pupilla dell'occhio umano può variare da 2 mm a 8 mm.

► Spiega perché l'affermazione della persona non è credibile.

21 Due stelle equidistanti dalla Terra sono separate da $3,7 \cdot 10^{11}$ m. Un telescopio con l'obiettivo di diametro 1,02 m permette di vedere le due stelle come oggetti separati. L'osservazione è fatta alla lunghezza d'onda di 550 nm. Si trascura l'effetto della turbolenza dell'atmosfera, quindi l'unico fattore che limita l'osservazione è la diffrazione.

► Calcola la massima distanza delle due stelle dalla Terra.

22 Nel 1999 gli astronomi hanno scoperto il primo sistema planetario extrasolare attorno alla stella Upsilon Andromedae, distante $4,2 \cdot 10^{17}$ m dalla Terra. Un pianeta del sistema orbita a $1,2 \cdot 10^{11}$ m dalla stella. Si vuole osservare il sistema pianeta-stella con un telescopio in luce visibile ($\lambda_{\text{vuoto}} = 550$ nm).

► Quale deve essere il minimo diametro dell'obiettivo per risolvere i due corpi celesti?

23 Il più grande telescopio rifrattore del mondo è quello dello Yerkes Observatory: il suo obiettivo ha un diametro di 1,02 m. Due sorgenti di luce con lunghezza d'onda 565 nm distano dal telescopio $3,75 \cdot 10^4$ m.

► Qual è la minima distanza fra di esse per la quale le due sorgenti sono risolte dal telescopio?

7. Il reticolo di diffrazione

24 Quando è illuminato con luce di lunghezza d'onda 495 nm, un reticolo di diffrazione produce un massimo del secondo ordine a un angolo di $9,34^\circ$.

► Quante linee per centimetro ha il reticolo?

25 Quanto è illuminato con luce di lunghezza d'onda 420 nm, un reticolo di diffrazione produce una frangia chiara a un angolo di 26° . Quando è illuminato con luce di lunghezza d'onda x , quel reticolo produce una frangia chiara a un angolo di 41° . Le due frange chiare sono dello stesso ordine.

► Calcola la lunghezza d'onda x .

26 Un reticolo di diffrazione ha 2400 linee in 1,50 cm. Quando è colpito da un raggio di luce di lunghezza d'onda λ , forma la terza frangia luminosa a un angolo di $18,0^\circ$.

► Calcola λ .

27 Un CD è utilizzato come reticolo di diffrazione per luce riflessa. Le tracce a spirale sul CD distano $1,1 \cdot 10^{-6}$ m.

► Stima l'angolo che corrisponde alla prima frangia luminosa per luce di lunghezza d'onda 660 nm e 410 nm.

28 Un reticolo di diffrazione ha 2604 linee per centimetro e produce un massimo principale a $30,0^\circ$. Il reticolo è illuminato con un fascio di luce che contiene tutte le lunghezze d'onda fra 410 nm e 660 nm.

► Quali sono le lunghezze d'onda che hanno prodotto quel massimo principale?

PROBLEMI FINALI

29 In un esperimento della doppia fenditura di Young la frangia scura del settimo ordine si trova a una distanza di 0,025 m dalla frangia chiara centrale su uno schermo piano posto a una distanza di 1,1 m dalla doppia fenditura. La distanza tra le due fenditure è di $1,4 \cdot 10^{-4}$ m.

► Qual è la lunghezza d'onda della luce impiegata nell'esperimento?

30 In una doppia fenditura la distanza tra le fenditure è di 0,158 m. La doppia fenditura è illuminata con una luce formata da una combinazione di luce rossa (lunghezza d'onda = 665 nm) e luce giallo-verde (lunghezza d'onda = 565 nm). Uno schermo piano è posto davanti alla doppia fenditura a una distanza di 2,24 m.

► Qual è la distanza sullo schermo tra la frangia rossa del terzo ordine e la frangia giallo-verde del terzo ordine?

31 Uno strato antiriflesso di fluoruro di magnesio ($n = 1,38$) ricopre la lente ($n = 1,52$) di una macchina fotografica.

► Calcola lo spessore minimo che deve avere il rivestimento per evitare la riflessione della luce giallo-verde ($\lambda_{\text{vuoto}} = 565$ nm).

32 Una fenditura larga $2,1 \cdot 10^{-6}$ m è usata per formare una figura di diffrazione. Calcola l'ampiezza dell'angolo che individua la posizione della seconda frangia scura quando la lunghezza d'onda della luce impiegata è:

► 430 nm.
► 660 nm.

33 La larghezza di una fenditura è $2,0 \cdot 10^{-5}$ m. Una luce che ha una lunghezza d'onda di 480 nm attraversa la fenditura e va a incidere su uno schermo posto a 0,50 m dalla fenditura.

► Calcola la larghezza della frangia chiara più vicina alla frangia chiara centrale nella figura di diffrazione che si forma sullo schermo.

34 Nel buio un'automobile ti supera in un tratto rettilineo di autostrada. Le luci di posizione dell'auto sono distanti 1,2 m. Le pupille dei tuoi occhi hanno un diametro di 7,0 mm.

► A quale distanza le due luci di posizione ($\lambda_{\text{vuoto}} = 660$ nm) sembreranno fondersi in una per effetto della diffrazione?

35 Una sottile pellicola di benzina ($n = 1,40$) galleggia sull'acqua ($n = 1,33$). Un fascio di luce gialla ($\lambda_{\text{vuoto}} = 580$ nm) incide perpendicolarmente sulla pellicola.

- ▶ Determina lo spessore minimo della pellicola necessario perché essa appaia di un giallo brillante per effetto dell'interferenza costruttiva.
- ▶ Ripeti il calcolo nel caso in cui la pellicola stia su una lastra di vetro, cioè con $n = 1,52$.

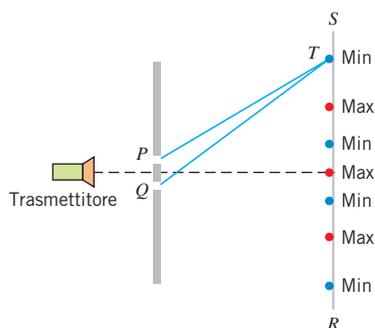
- 36** Quando è illuminato con luce di $\lambda = 510$ nm, un reticolo di diffrazione produce solo tre frange luminose su ciascun lato del massimo centrale.
- ****
- ▶ Calcola il numero massimo di linee per centimetro del reticolo.

QUESITI

- 1** Discuti la differenza tra ottica geometrica e ottica ondulatoria, dando esempi di fenomeni descritti dall'una e dall'altra.
- 2** Descrivi l'esperimento di Young e analizza il fenomeno dell'interferenza.
- 3** Descrivi il fenomeno della diffrazione.
- 4** Illustra le caratteristiche del reticolo di diffrazione.
- 5** Descrivi il fenomeno dell'interferenza su lamine sottili.

OLIMPIADI DELLA FISICA

- 1** Una radiazione a microonde passa attraverso due fenditure P e Q di una piastra metallica. Un sensore di microonde che viene spostato dal punto R al punto S dello schermo rileva una serie di massimi e minimi di intensità della radiazione, come indicato in figura. La lunghezza d'onda della radiazione è 4 cm. Quanto vale la differenza di percorso tra PT e QT ?
- A** 2 cm
B 3 cm
C 4 cm
D 5 cm
E 6 cm



(Gara di 1° livello edizione 2008)

- 2** Luce avente lunghezza d'onda di $6 \cdot 10^{-7}$ m attraversa due strette fenditure ed è raccolta su uno schermo a 2 m di distanza dalle fenditure. Se la distanza tra due frange luminose adiacenti è di $3 \cdot 10^{-2}$ m, qual è la distanza tra le fenditure?

- A** $9 \cdot 10^{-9}$ m
B $1 \cdot 10^{-5}$ m
C $4 \cdot 10^{-5}$ m
D $6 \cdot 10^{-5}$ m
E $2,5 \cdot 10^{-4}$ m

(Gara di 1° livello edizione 2007)

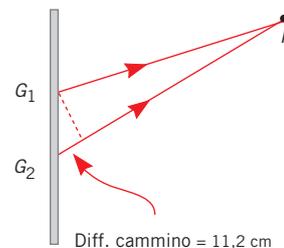
- 3** La luce emessa da un laser cade su una coppia di fenditure distanti 0,1 mm l'una dall'altra e su uno schermo distante si osserva un sistema di frange. La separazione fra due frange brillanti consecutive è di 1,0 mm. Se, lasciando tutto il resto inalterato, si applica un duplicatore di frequenza in modo che la luce emessa abbia frequenza doppia, quale sarà, ora la separazione tra le frange?
- A** 0,25 mm
B 0,5 mm
C 1,0 mm
D 2,0 mm
E 4,0 mm

(Gara di 1° livello edizione 2005)

- 4** Nel riprodurre l'esperimento di Young con le due fenditure si è usato un fascio di luce bianca. Quale ci si aspetta fra le osservazioni descritte qui sotto?
- A** Lo schermo appare illuminato uniformemente.
B Si osserva una frangia centrale nera e frange bianche e nere alternate ai suoi lati.
C Si osserva una frangia centrale bianca e frange bianche e nere alternate ai suoi lati.
D Si osserva una frangia centrale bianca e ai suoi lati frange colorate.
E Si osserva una frangia centrale nera e ai suoi lati frange colorate.

(Gara di 1° livello edizione 2003)

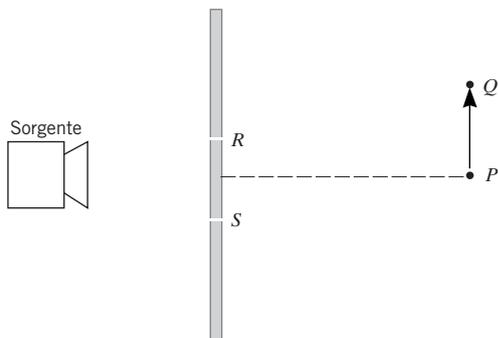
- 5** Microonde di lunghezza d'onda 2,8 cm passano attraverso due fenditure G_1 e G_2 di una barriera di alluminio. Il punto P , molto lontano dalla barriera, dista 11,2 cm in più da una fessura rispetto all'altra. Quale o quali delle seguenti affermazioni sulla radiazione che arriva in P da G_2 sono corrette?
- 1) Arriva in fase con la radiazione proveniente da G_1 .
 - 2) Si combina costruttivamente con la radiazione proveniente da G_1 .
 - 3) Ha percorso un numero intero di lunghezze d'onda in più rispetto alla radiazione proveniente da G_1 .



- A** Tutte e tre.
B Solo la 1 e la 2.
C Solo la 2 e la 3.
D Solo la 1.
E Solo la 3.

(Gara di 1° livello edizione 2002)

- 6 Una sorgente di microonde di lunghezza d'onda λ è posta di fronte a due fenditure, indicate con R e S in figura. Un rivelatore di microonde registra un massimo di intensità quando si trova nel punto P , per il quale $RP = SP$. Il rivelatore viene quindi spostato e il primo punto in cui si registra un nuovo massimo è Q .



La differenza di cammino ($SQ - RQ$) vale allora:

- A 0
 - B $\lambda/2$
 - C λ
 - D $k\lambda/2$, con k dispari.
 - E $k\lambda$, con k intero.
- (Gara di 1° livello edizione 2001)
- 7 Due fasci di luce di uguale lunghezza d'onda e coerenti producono su uno schermo delle frange di interferenza. I due fasci hanno diversa intensità luminosa: l'intensità del primo fascio è 4 volte quella dell'altro. Qual è il rap-

porto tra il massimo e il minimo d'intensità sullo schermo?

- A 16:1
- B 2:1
- C 5:3
- D 9:1
- E 4:1

(Gara di 1° livello edizione 2000)

- 8 In un esperimento di Young effettuato con microonde di 3,0 cm di lunghezza d'onda, la distanza fra due massimi di interferenza su un piano situato a 8,4 m dalle fenditure, in prossimità del massimo centrale, è risultata di 50 cm. Qual è la separazione fra le fenditure?

(Gara di 2° livello edizione 2003)

TEST DI AMMISSIONE ALL'UNIVERSITÀ

- 1 La luce visibile ha una delle seguenti caratteristiche. Quale?
- A È un'onda di vibrazione meccanica del mezzo in cui si propaga.
 - B È un'onda che non si propaga nel vuoto assoluto.
 - C Si propaga nel vuoto a una velocità di 300 km/s.
 - D È un'onda elettromagnetica la cui lunghezza d'onda è tipicamente compresa (circa) tra 400 nm e 700 nm.
 - E È solo un'illusione, senza nessuna relazione con i fenomeni ondulatori.

(Prova di ammissione al corso di laurea in Odontoiatria e Protesi dentaria, 1999-2000)