CAPITOLO

16

La natura ondulatoria della luce

«Non si può dubitare che la luce consista nel movimento di una certa materia.» — Christiaan Huygens, Traité de la lumière (1690), capitolo I (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Confrontare il modello corpuscolare di Newton e quello ondulatorio di Huygens e riconoscere l'esperimento che li distingue.
2. Spiegare perché l'interferenza della luce richiede sorgenti coerenti e descrivere l'esperimento di Young.
3. Ricavare con i triangoli simili l'interfrangia $\Delta y = \lambda L/d$ e usarla per misurare la lunghezza d'onda della luce.
4. Descrivere la diffrazione di una fenditura e di un reticolo e riconoscerne gli effetti negli strumenti e negli oggetti comuni.
5. Spiegare i colori delle lamine sottili e il colore dei corpi.
6. Collocare la luce nello spettro elettromagnetico e conoscere il problema dell'etere.

INDICE DEL CAPITOLO

16.1 Due modelli per la luce 2
16.2 L'interferenza della luce 4
16.3 La diffrazione 9
16.4 Lamine sottili e colori 14
16.5 Quali onde? La luce come onda elettromagnetica 16

Fisica 4 · Parte VI · La luce · versione 1.0
Capitolo 16: La natura ondulatoria della luce · pagine 441–464 del volume completo · estratto per lo studio

Soffia una bolla di sapone e guardala contro la luce di una finestra: sulla sua superficie scorrono bande di colore, viola, verdi, dorate, che cambiano di continuo e, un istante prima che la bolla scoppi, lasciano posto a una macchia scura. Eppure l'acqua saponata, in un bicchiere, è incolore. Lo stesso spettacolo lo offrono una macchia d'olio su una strada bagnata e la faccia di un CD inclinato sotto una lampada. Nessuno di questi colori viene da un pigmento: nasce dalla luce stessa, che sovrapponendosi a altra luce può rafforzarsi o spegnersi.

Nei capitoli 14 e 15 hai descritto la luce con i raggi dell'ottica geometrica. Qui ci chiediamo che cosa *sia* la luce: la domanda che divise Newton e Huygens, e che all'inizio dell'Ottocento trovò una prima risposta con due fenditure e uno schermo. La luce è un'onda: vedrai come se ne misura la lunghezza d'onda, perché aggira gli ostacoli, da dove vengono i colori delle bolle e che cosa oscilla in un raggio di Sole.

16.1 Due modelli per la luce

16.1.1 Corpuscoli o onde?

Alla fine del Seicento due grandi scienziati proposero due immagini opposte della luce. Per Isaac Newton, che le dedicò l'*Opticks* (1704), un raggio di luce è un flusso di particelle piccolissime emesse dai corpi luminosi, che viaggiano in linea retta finché qualcosa non le devia: è il **modello corpuscolare**. Per Christiaan Huygens, che pubblicò nel 1690 il *Traité de la lumière*, la luce è invece un'onda, una perturbazione che si propaga in un mezzo sottilissimo che riempie lo spazio, come il suono si propaga nell'aria: è il **modello ondulatorio**. Per costruire la propagazione Huygens usava il principio che porta il suo nome (principio di Huygens, capitolo 12): ogni punto raggiunto dall'onda diventa a sua volta sorgente di onde secondarie, e il nuovo fronte d'onda è la linea che le inviluppa tutte.

Entrambi i modelli spiegano la propagazione rettilinea e la riflessione. Un corpuscolo che urta elasticamente uno specchio conserva la componente della velocità parallela alla superficie e inverte quella perpendicolare, come la pallina contro la parete (capitolo 1), e rispetta così la legge della riflessione (capitolo 14); la stessa legge si ottiene con la costruzione di Huygens. Newton aveva però un'obiezione forte contro le onde: il suono gira dietro gli angoli, la luce no, e le ombre sono nette. Vedremo più avanti, parlando di diffrazione, che l'obiezione aveva una risposta, che allora nessuno conosceva.

16.1.2 La rifrazione nei due modelli

La vera prova era la rifrazione (capitolo 15): un raggio che passa dall'aria all'acqua si avvicina alla normale. La Figura 16.1 mostra come la spiegano i due modelli. Nel modello di Huygens (a)

un fronte d'onda piano arriva obliquo sulla superficie: l'estremo A tocca l'acqua per primo, e da lì parte un'onda secondaria che in acqua si allarga *più lentamente*. Quando l'altro estremo, B, arriva in B′, l'onda partita da A ha un raggio minore del tratto BB′ percorso in aria nello stesso tempo; il nuovo fronte, tangente alle onde secondarie, risulta così meno inclinato, e il raggio, perpendicolare al fronte, piega verso la normale. Il rapporto fra le velocità nei due mezzi fissa di quanto piega: è proprio l'indice di rifrazione $n = c/v$ che conosci dal capitolo 15, una definizione che nasce dal modello ondulatorio.

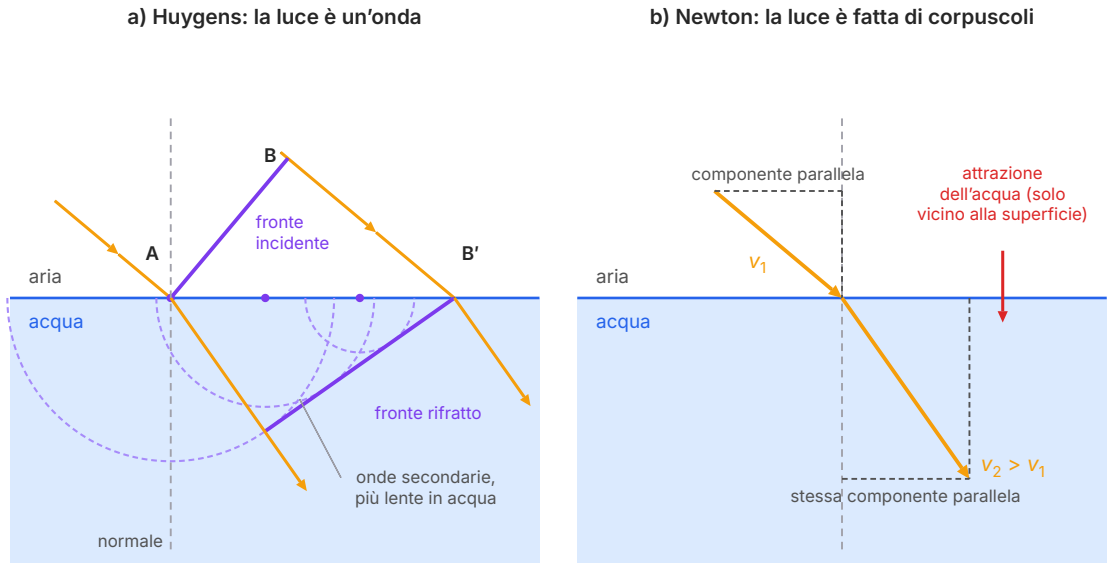


Figura 16.1 La rifrazione dall'aria all'acqua (n = 1,33) nei due modelli, per un angolo di incidenza di 50°. a) Huygens: le onde secondarie partite dai punti della superficie si allargano in acqua più lentamente che in aria; il fronte rifratto, tangente a tutte, piega verso la normale. b) Newton: l'acqua attrae i corpuscoli che le arrivano vicini e ne aumenta solo la componente perpendicolare della velocità; il corpuscolo piega verso la normale, ma in acqua è *più veloce* (le lunghezze delle frecce sono in proporzione).

Newton (b) spiegava la stessa deviazione con una forza: vicino alla superficie l'acqua attrae i corpuscoli, e ne aumenta la componente della velocità perpendicolare alla superficie, lasciando invariata quella parallela. Anche così il raggio piega verso la normale, ma con una differenza decisiva: in acqua il corpuscolo è *più veloce* che in aria. I conti, che qui non facciamo, mostrano che entrambi i modelli riproducono la legge di Snell, con lo stesso indice 1,33; ma per Huygens la luce in acqua dovrebbe andare a $c/1{,}33 \approx 2{,}26 \times 10^8$ m/s, per Newton a $1{,}33\ c \approx 4{,}0 \times 10^8$ m/s. Basterebbe misurare la velocità della luce in acqua per decidere.

16.1.3 La prova decisiva

Ai tempi di Newton quella misura era impossibile: la luce percorre un metro d'acqua in pochi miliardesimi di secondo. Per più di un secolo il prestigio di Newton fece prevalere il modello corpuscolare, benché lui stesso, nell'*Opticks*, presentasse molte delle sue idee sulla natura della luce come domande aperte. Solo nel 1850 Léon Foucault, con un apparato a specchio rotante che, a differenza della ruota dentata di Fizeau (capitolo 14), funzionava su un percorso di pochi metri e permetteva quindi di far passare la luce in un tubo pieno d'acqua, riuscì a confrontare la velocità della luce in aria e in acqua: in acqua è *minore*, come prevedeva Huygens.

Quando arrivò la misura di Foucault, però, la maggior parte dei fisici era già convinta. Dal 1801 in poi, infatti, la luce aveva mostrato i due comportamenti tipici delle onde che hai studiato nel capitolo 12: l'interferenza e la diffrazione. Una pioggia di particelle non può produrne nessuno dei due.

DA RICORDARE

Dal capitolo 12: sovrapposizione e interferenza

Quando due onde arrivano nello stesso punto, la perturbazione risultante è la somma delle due (principio di sovrapposizione). Se due sorgenti oscillano insieme, allo stesso ritmo, in un punto che dista r_1 dalla prima e r_2 dalla seconda conta la **differenza di cammino** $\Delta = r_2 - r_1$:

• se $\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \ldots$ (un numero intero di lunghezze d'onda), le due onde arrivano «in fase», cresta con cresta: interferenza **costruttiva**, l'oscillazione è massima;
• se $\Delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \ldots$ (un numero dispari di mezze lunghezze d'onda), arrivano «in opposizione», cresta con ventre: interferenza **distruttiva**, e con onde di uguale ampiezza l'oscillazione si annulla.

Nella vasca ondosa del capitolo 12 i punti di interferenza distruttiva formano linee di acqua ferma che separano zone agitate. Se la luce è un'onda, due fasci di luce devono poter dare, in certi punti, il buio.

16.2 L'interferenza della luce

16.2.1 Perché due lampade non danno frange

Due lampadine che illuminano la stessa parete la rendono semplicemente più chiara, senza zone buie. Il motivo è che l'interferenza si osserva solo con **sorgenti coerenti**, che emettono onde della stessa frequenza con un rapporto di fase che resta fisso nel tempo, come i due vibratori della vasca ondosa, mossi dallo stesso motore. In una lampadina, come nel Sole, ogni atomo emette per conto suo brevi treni d'onda indipendenti: il rapporto di fase fra le due lam-

pade cambia a caso in molto meno di un milionesimo di secondo, e le eventuali frange si spostano così in fretta che l'occhio vede solo un'illuminazione uniforme.

Il rimedio è prendere la luce di *una sola* sorgente piccola e dividerla in due parti. Le due parti sono copie della stessa onda: se una cambia fase, cambia anche l'altra, e il loro rapporto resta fisso. Oggi è molto più comodo usare un laser, che emette una luce quasi di un solo colore (luce monocromatica) e coerente su distanze grandi; un comune puntatore laser basta per tutti gli esperimenti di questo capitolo.

16.2.2 L'esperimento di Young

Thomas Young (1773–1829), medico inglese con una cultura enciclopedica, presentò fra il 1801 e il 1803 alla Royal Society di Londra una serie di ricerche in cui difendeva il modello ondulatorio e formulava quella che chiamò la legge dell'«interferenza» della luce. Nella forma oggi classica, il suo esperimento è questo (Figura 16.2): luce monocromatica illumina due fenditure sottilissime e parallele, S_1 e S_2, distanti d (qualche decimo di millimetro); su uno schermo posto a una distanza L di qualche metro compare non una macchia chiara, ma una serie di bande chiare e scure alternate, parallele alle fenditure e ugualmente distanziate: le **frange di interferenza**.

Al centro dello schermo, nel punto O equidistante dalle due fenditure, le due onde percorrono cammini uguali e arrivano in fase: c'è una frangia chiara, la **frangia centrale**. Spostandosi di lato, uno dei due cammini si allunga rispetto all'altro; dove la differenza vale mezza lunghezza d'onda le onde si annullano, e lo schermo è buio; dove vale una lunghezza d'onda intera si rafforzano di nuovo, e così via. Coprendo una delle due fenditure le frange spariscono: la luce che arriva dall'altra illumina lo schermo in modo continuo, anche nei punti che prima erano bui. Luce più luce, dunque, può dare buio: è il comportamento di un'onda.

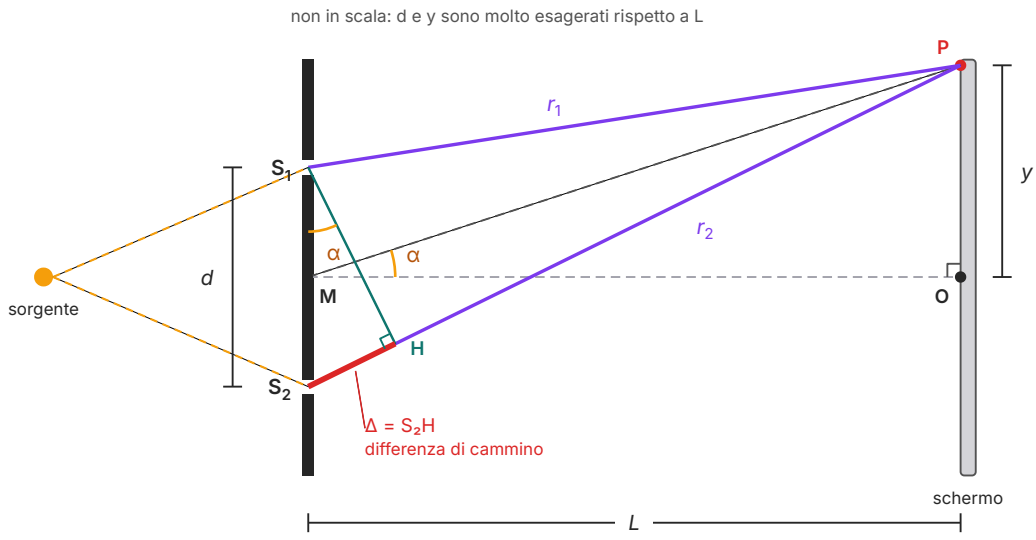


Figura 16.2 La geometria dell'esperimento di Young (non in scala). Le onde che partono dalle fenditure S_1 e S_2, distanti d, raggiungono il punto P dello schermo, a distanza y dal centro O, con cammini r_1 e r_2; S_1H è perpendicolare a S_2P, e il tratto rosso S_2H è la differenza di cammino Δ. I triangoli rettangoli S_1S_2H e MOP hanno l'angolo α uguale, quindi sono simili.

COLLEGAMENTI

Storia: Young e la stele di Rosetta

Thomas Young intuì anche che la visione dei colori dipende da tre tipi di recettori nella retina, e fu uno dei primi a studiare la stele di Rosetta, che riporta lo stesso decreto in geroglifici, in demotico e in greco: riconobbe che i nomi dei sovrani erano racchiusi nei cartigli e lesse in parte quello di Tolomeo. La decifrazione completa fu poi opera di Jean-François Champollion. Per Young il greco era la chiave dell'egiziano, la geometria quella della luce.

16.2.3 Dove cadono le frange

Calcoliamo dove si trovano le frange. Il punto P della Figura 16.2 è sullo schermo a distanza y dal centro O; M è il punto medio fra le fenditure. Poiché lo schermo è lontanissimo rispetto alla distanza fra le fenditure ($L \gg d$), i due raggi S_1P e S_2P sono praticamente paralleli. Sul raggio S_2P segniamo il piede H della perpendicolare condotta da S_1: i tratti HP e S_1P sono, con ottima approssimazione, uguali, e la differenza di cammino $\Delta = r_2 - r_1$ è il piccolo segmento S_2H.

Ora guardiamo due triangoli rettangoli: S_1S_2H, retto in H, e MOP, retto in O. L'angolo in S_1 del primo è uguale all'angolo α in M del secondo, perché hanno i lati a due a due perpendicolari (S_1S_2 è perpendicolare a MO, e S_1H è perpendicolare a S_2P, quindi anche a MP, che le è paralle-

lo). I due triangoli sono dunque simili, e i lati opposti all'angolo α stanno alle ipotenuse nello stesso rapporto:

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{y}{\mathrm{MP}} \approx \frac{y}{L} \qquad \text{quindi} \qquad \Delta = \frac{d\,y}{L}$$

L'ultimo passaggio sostituisce l'ipotenusa MP con il cateto L: è l'**approssimazione dei piccoli angoli**, lecita finché y è piccolo rispetto a L. Imponendo la condizione di interferenza costruttiva, $\Delta = n\lambda$, si trovano le posizioni delle frange chiare:

$$y_n = n\frac{\lambda\,L}{d} \qquad (n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots)$$

La frangia $n = 0$ è quella centrale; le altre si susseguono alla stessa distanza l'una dall'altra, da entrambe le parti, e le frange scure cadono a metà strada. La distanza fra due frange chiare (o scure) consecutive è l'**interfrangia**:

$$\Delta y = \frac{\lambda\,L}{d}$$

La formula si legge come una proporzione. L'interfrangia cresce con la lunghezza d'onda (le frange della luce rossa sono più larghe di quelle della luce blu), cresce allontanando lo schermo, e cresce *avvicinando* le fenditure. Con luce di 600 nm, fenditure distanti 0,30 mm e uno schermo a 1,5 m si ottiene $\Delta y = (6{,}00 \times 10^{-7}\ \mathrm{m} \cdot 1{,}5\ \mathrm{m})/(3{,}0 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}) = 3{,}0$ mm: frange ben visibili a occhio nudo, perché il rapporto L/d, qui 5000, «ingrandisce» la lunghezza d'onda fino a renderla misurabile con un righello.

DA RICORDARE

Strumenti matematici: quando si può confondere MP con L

Per il teorema di Pitagora $\mathrm{MP} = \sqrt{(L^2 + y^2)}$, un po' più di L. Con $L = 1{,}00$ m e $y = 1{,}0$ cm, MP ≈ 1,00005 m: cinque parti su centomila. Anche con $y = L/10$, MP supera L di appena lo 0,5%.

Finché le frange osservate sono vicine al centro (y non oltre un decimo di L), le formule $\Delta = dy/L$ e $\Delta y = \lambda L/d$ sono accurate entro l'incertezza delle misure; più lontano le frange non sono più equidistanti.

ESEMPIO SVOLTO

Le frange di un laser verde

Problema. Un puntatore laser verde ($\lambda = 532$ nm) illumina due fenditure distanti $d = 0{,}200$ mm; lo schermo è a $L = 1{,}50$ m. a) Quanto vale l'interfrangia? b) A che distanza dal centro si trova la terza frangia chiara? E la seconda frangia scura? c) Con un laser rosso ($\lambda = 650$ nm) e lo stesso apparato, l'interfrangia aumenta o diminuisce, e di quanto?

a) $\Delta y = \lambda L/d = (5{,}32 \times 10^{-7}\ \text{m} \cdot 1{,}50\ \text{m})/(2{,}00 \times 10^{-4}\ \text{m}) = 3{,}99 \times 10^{-3}\ \text{m} \approx 3{,}99$ mm.

b) Le frange chiare sono a $y_n = n\Delta y$: la terza a $3 \cdot 3{,}99$ mm $\approx 12{,}0$ mm dal centro (da una parte e dall'altra, quindi le due terze frange distano 23,9 mm fra loro). Le frange scure sono a metà strada: la prima a $0{,}5\ \Delta y$, la seconda a $1{,}5\ \Delta y \approx 5{,}99$ mm.

c) Δy è proporzionale a λ: con 650 nm diventa $3{,}99\ \text{mm} \cdot 650/532 \approx 4{,}88$ mm, cioè circa il 22% in più.

Controllo. La terza frangia è a 12 mm su 1,50 m: $y/L \approx 0{,}008$, ben dentro l'approssimazione dei piccoli angoli.

16.2.4 La lunghezza d'onda dei colori

Rovesciando la formula, $\lambda = d\Delta y/L$: misurando l'interfrangia, la distanza fra le fenditure e quella dello schermo si misura la lunghezza d'onda della luce. Young ricavò in questo modo, partendo anche dalle misure di Newton sugli anelli colorati (ne parleremo con le lamine sottili), le prime stime della lunghezza d'onda dei diversi colori. Sono lunghezze minuscole: il violetto ha $\lambda \approx 400$ nm, il verde circa 530 nm, il rosso circa 650 nm, e l'intera **luce visibile** sta fra circa 400 nm e 700 nm (Tabella A.6). Nello spessore di un capello, circa 70 µm, stanno un centinaio di lunghezze d'onda di luce rossa.

Dalla lunghezza d'onda si ricava la frequenza, con la relazione $v = \lambda f$ del capitolo 12: nel vuoto $f = c/\lambda$, cioè circa $4{,}3 \times 10^{14}$ Hz per il rosso più profondo e $7{,}5 \times 10^{14}$ Hz per il violetto (Tabella 16.1): centinaia di migliaia di miliardi di oscillazioni al secondo. In acqua o nel vetro la frequenza non cambia (capitolo 15), mentre velocità e lunghezza d'onda si dividono per n: la luce rossa di 650 nm, in acqua, ha $\lambda \approx 489$ nm. Il colore percepito è legato alla frequenza: sott'acqua una boa rossa resta rossa.

Tabella 16.1 I colori della luce visibile: intervalli indicativi di lunghezza d'onda nel vuoto e di frequenza ($f = c/\lambda$, arrotondata). I confini fra un colore e l'altro sono convenzionali: lo spettro passa con continuità da una tinta alla successiva.

Colore	λ (nm)	f (10^{14} Hz)
violetto	400–450	7,5–6,7
blu	450–490	6,7–6,1
verde	490–560	6,1–5,4
giallo	560–590	5,4–5,1
arancione	590–630	5,1–4,8
rosso	630–700	4,8–4,3

ERRORE FREQUENTE

Nelle frange scure la luce viene «distrutta»?

No: l'interferenza *ridistribuisce* l'energia. Con due fenditure uguali, al centro delle frange chiare l'intensità è quattro volte quella di una fenditura sola (le ampiezze si sommano, e l'intensità cresce con il quadrato dell'ampiezza), nelle frange scure è zero; in media è il doppio, quanto ci si aspetta da due fenditure. La luce che manca nelle frange scure è in più in quelle chiare.

Un secondo errore è usare $\Delta y = \lambda L/d$ per frange lontanissime dal centro, o per fenditure distanti quanto lo schermo: la formula nasce dall'approssimazione dei piccoli angoli e vale solo quando y e d sono piccoli rispetto a L.

16.3 La diffrazione

16.3.1 La luce aggira gli ostacoli

Torniamo all'obiezione di Newton: perché le ombre sono nette, mentre il suono si sente anche da dietro un muro? La risposta è nel capitolo 12: un'onda si allarga dopo un'apertura o dietro un ostacolo in modo apprezzabile solo se la loro dimensione è paragonabile alla lunghezza d'onda (diffrazione). La voce ha lunghezze d'onda di decimetri o di un metro, quanto una porta; la luce di mezzo milionesimo di metro, e per una finestra o una mano la sua diffrazione è trascurabile: per vederla servono aperture di qualche decimo di millimetro.

Il primo a descriverla fu il gesuita bolognese Francesco Maria Grimaldi. Facendo entrare la luce del Sole in una stanza buia da un forellino, osservò che l'ombra di un'asticciola sottile era più larga di quanto prevedesse la propagazione rettilinea, e bordata di frange colorate. Nel trat-

tato *De lumine*, uscito nel 1665, due anni dopo la sua morte, chiamò il fenomeno *diffractio*: la luce sembrava «spezzarsi» passando vicino ai bordi.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Diffrazione viene dal latino *diffringere*, «spezzare in pezzi» (da *dis-*, «in parti», e *frangere*, «rompere»): il termine *diffractio* è di Grimaldi (1665), che vedeva il fascio di luce come «spezzato» dai bordi dell'ostacolo. Dalla stessa radice di *frangere* vengono *frammento*, *frattura* e la *rifrazione* del capitolo 15 (*refringere*); *frangia*, invece, nonostante il suono, viene da un'altra parola latina, *fimbria*, «orlo».

Interferenza arriva dal francese e dall'inglese (Young parlava di *interference*), che la formano sul latino *inter*, «fra», e *ferire*, «colpire»: due onde che «si colpiscono a vicenda», scontrandosi nello stesso punto.

Coerente viene dal latino *cohaerens*, participio di *cohaerere*, «stare attaccato insieme, essere unito»: due sorgenti coerenti oscillano «unite», con un passo che non si perde.

Fotone, parola introdotta nel Novecento, è costruita sul greco φῶς, φωτός, «luce», la stessa radice di *fotografia*, «scrittura con la luce».

16.3.2 La figura di una fenditura singola

Facciamo passare il fascio di un laser attraverso una sola fenditura sottile, di larghezza a. Sullo schermo non compare una striscia larga quanto la fenditura, ma una banda chiara centrale molto più ampia, affiancata da frange laterali sempre più deboli: la figura di diffrazione di una **fenditura singola** (Figura 16.3). E c'è una sorpresa: *restringendo* la fenditura, la banda centrale si *allarga*. Il modello dei raggi prevederebbe il contrario: una fenditura più stretta, una striscia di luce più stretta.

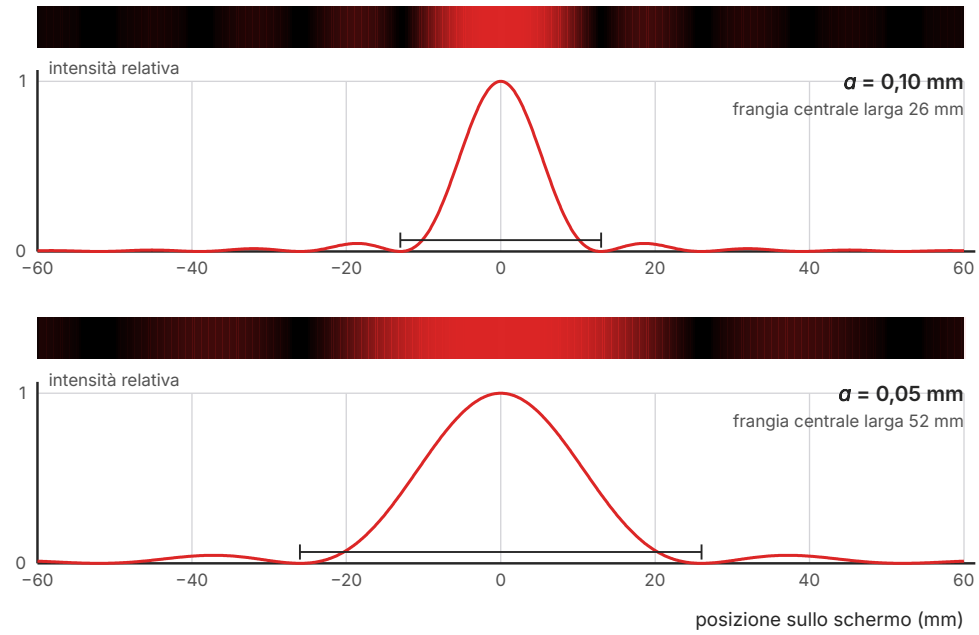


Figura 16.3 La figura di diffrazione di una fenditura singola, calcolata per luce di 650 nm e uno schermo a 2,00 m: sopra, come appare sullo schermo; sotto, l'intensità relativa al centro. Dimezzando la larghezza della fenditura, da 0,10 mm a 0,05 mm, la frangia centrale raddoppia, da 26 mm a 52 mm.

Il principio di Huygens spiega il fenomeno: ogni punto della fenditura è una sorgente di onde secondarie, e in un punto dello schermo arrivano onde da tutta la larghezza della fenditura, con cammini un po' diversi. Al centro arrivano tutte in fase. Spostandosi di lato, si raggiunge un punto in cui le onde provenienti dalla metà superiore della fenditura sono in opposizione con quelle della metà inferiore e si annullano a coppie: lì c'è la prima frangia scura. Si dimostra (non lo facciamo) che, nell'approssimazione dei piccoli angoli, le prime frange scure sono a distanza $\lambda L/a$ dal centro, da una parte e dall'altra, e quindi la frangia centrale ha larghezza

$$\text{larghezza della frangia centrale} = \frac{2\,\lambda\,L}{a}$$

Con λ = 650 nm, L = 2,00 m e a = 0,10 mm si ottengono 26 mm, come nella figura. La relazione vale anche per un ostacolo sottile, per esempio un capello teso davanti al laser: la sua figura di diffrazione è uguale a quella di una fenditura larga quanto il capello. Misurando la frangia centrale si misura così il diametro di un capello con un righello.

16.3.3 Interferenza e diffrazione insieme

Ora possiamo leggere meglio l'esperimento di Young. Ogni fenditura, avendo una larghezza finita, diffrange la luce; le frange di interferenza si formano dove le luci delle due fenditure si sovrappongono, cioè dentro la figura di diffrazione di una fenditura sola, che ne modula la luminosità (Figura 16.4). Le frange sono ugualmente distanziate, ma le più lontane dal centro sono via via più deboli, e dove la figura di una fenditura ha uno zero manca anche la frangia di interferenza.

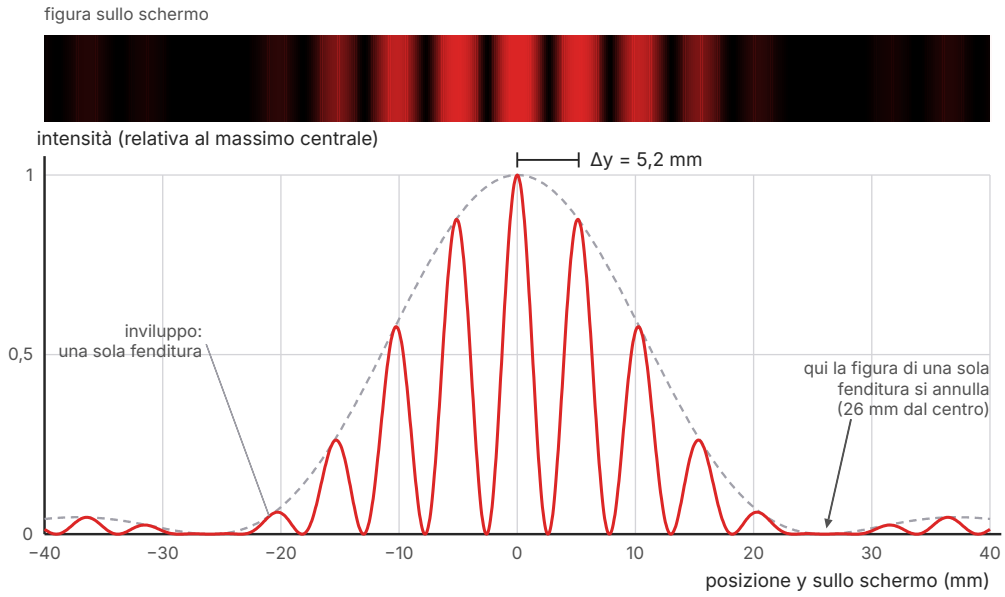


Figura 16.4 La figura sullo schermo per due fenditure di larghezza a = 0,050 mm e distanza d = 0,25 mm, illuminate da luce di 650 nm, con lo schermo a 2,00 m (calcolata). Le frange di interferenza sono equidistanti (Δy = 5,2 mm); la loro luminosità segue la curva tratteggiata, la figura di diffrazione di una sola fenditura, che si annulla a 26 mm dal centro.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere una figura di interferenza

Problema. La Figura 16.4 è stata calcolata per luce di 650 nm e uno schermo a $L = 2{,}00$ m. Ricava dal grafico a) la distanza d fra le fenditure, b) la larghezza a di ciascuna, c) il numero di frange chiare visibili dentro la banda centrale di diffrazione.

a) Conviene misurare più interfrange insieme, per ridurre l'incertezza di lettura: fra la quarta frangia chiara a sinistra e la quarta a destra ci sono 8 interfrange, che sul grafico coprono circa 41,6 mm (da −20,8 mm a +20,8 mm). Quindi $\Delta y \approx 41{,}6\ \text{mm}/8 = 5{,}2$ mm e $d = \lambda L/\Delta y = (6{,}50 \times 10^{-7}\ \text{m} \cdot 2{,}00\ \text{m})/(5{,}2 \times 10^{-3}\ \text{m}) = 2{,}5 \times 10^{-4}\ \text{m} = 0{,}25$ mm.

b) La curva tratteggiata, la figura di una fenditura, si annulla a 26 mm dal centro. Le prime frange scure di diffrazione sono a $\lambda L/a$, quindi $a = \lambda L/(26\ \text{mm}) = (6{,}50 \times 10^{-7}\ \text{m} \cdot 2{,}00\ \text{m})/(2{,}6 \times 10^{-2}\ \text{m}) = 5{,}0 \times 10^{-5}\ \text{m} = 0{,}050$ mm.

c) La quinta frangia chiara cadrebbe a $5 \cdot 5{,}2\ \text{mm} = 26$ mm, esattamente sullo zero della diffrazione, e quindi manca. Dentro la banda centrale restano le frange da $n = -4$ a $n = +4$: nove frange chiare.

Osservazione. Il rapporto $d/a = 5$ dice quale frangia manca: la quinta. Dal grafico si leggono così due misure diverse dell'apparato, una dall'interferenza e una dalla diffrazione.

La diffrazione diede al modello ondulatorio la conferma più spettacolare. Negli anni dopo Young il francese Augustin Fresnel costruì una teoria ondulatoria completa della diffrazione. Siméon-Denis Poisson, che non ne era convinto, ne ricavò una conseguenza che gli sembrava assurda: al centro dell'ombra di un piccolo disco opaco, illuminato da una sorgente puntiforme, doveva esserci un punto luminoso. François Arago fece l'esperimento, e il punto c'era. Lo chiamiamo ancora **macchia di Poisson**, dal nome di chi voleva usarla per confutare la teoria.

COLLEGAMENTI

Scienze: perché un virus non si vede al microscopio ottico

La diffrazione limita tutti gli strumenti ottici: l'immagine di un punto non è mai un punto, ma una piccola macchia di diffrazione, e due dettagli più vicini di questa macchia si confondono, per quanto si ingrandisca.

In un buon microscopio ottico il limite è circa metà della lunghezza d'onda, intorno a 0,2 µm: un batterio (1–2 µm) si vede, la maggior parte dei virus (da qualche decina a qualche centinaio di nanometri) no, e serve il microscopio elettronico. Per la stessa ragione i telescopi hanno specchi grandi: un'apertura maggiore riduce la diffrazione.

16.3.4 Il reticolo di diffrazione e i colori di un CD

Se invece di due fenditure se ne usano moltissime, centinaia per millimetro, tutte uguali e ugualmente distanziate, si ottiene un **reticolo di diffrazione**. Le frange chiare diventano righe sottili e molto luminose, separate da ampie zone buie, e la loro posizione dipende dalla lunghezza d'onda. Illuminato con luce bianca, un reticolo manda i diversi colori in direzioni diverse e apre la luce in uno spettro, come un prisma ma per una ragione diversa: non la dispersione del capitolo 15, ma l'interferenza. Con un reticolo si misurano con grande precisione le lunghezze d'onda della luce emessa da una lampada o da una stella.

Un CD è un reticolo che funziona per riflessione: le informazioni sono scritte lungo una spirale le cui spire distano 1,6 µm, appena qualche lunghezza d'onda di luce visibile. La luce riflessa dalle spire interferisce, e in ogni direzione si rafforza un colore diverso: per questo i colori del CD cambiano quando lo si inclina. In un DVD le spire sono più fitte, 0,74 µm, e i colori risultano più «aperti».

16.4 Lamine sottili e colori

16.4.1 Bolle di sapone e macchie d'olio

Possiamo finalmente spiegare la bolla dell'inizio. Una **lamina sottile** è uno strato trasparente con uno spessore paragonabile alla lunghezza d'onda della luce, da qualche decimo di micrometro a qualche micrometro: la parete di una bolla di sapone, un velo d'olio sull'acqua. La luce che la colpisce viene riflessa in parte dalla prima superficie e in parte dalla seconda (Figura 16.5a). Le due onde riflesse sono coerenti, perché sono parti dello stesso fascio, ma la seconda ha percorso in più due volte lo spessore della lamina: le due onde interferiscono.

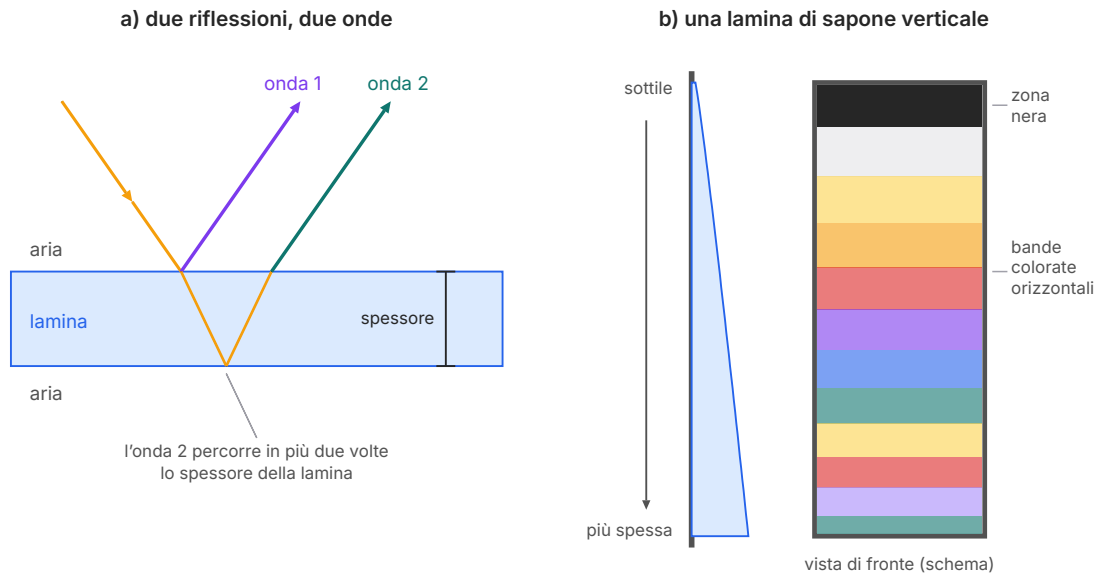


Figura 16.5 a) In una lamina sottile la luce viene riflessa dalla prima superficie (onda 1) e dalla seconda (onda 2), che ha percorso in più due volte lo spessore della lamina; le due onde riflesse interferiscono. b) Una lamina d'acqua saponata in un telaio verticale si assottiglia verso l'alto, perché il liquido scende; le zone di uguale spessore sono orizzontali, e così le bande colorate. In alto, dove lo spessore è molto minore della lunghezza d'onda, la lamina appare nera (schema, spessori molto esagerati; i colori delle bande sono indicativi).

Se la differenza di cammino corrisponde a un'interferenza distruttiva per un certo colore, quel colore sparisce dalla luce riflessa; se corrisponde a un'interferenza costruttiva, quel colore è rafforzato. Poiché la condizione dipende dalla lunghezza d'onda, con la luce bianca in ogni punto della lamina alcuni colori si spengono e altri si rafforzano, e la luce riflessa appare colorata. Dove lo spessore cambia, cambia il colore: in una lamina verticale il liquido scende per gravità, la lamina si assottiglia verso l'alto e si formano bande orizzontali che scivolano lentamente verso il basso (Figura 16.5b). Una macchia d'olio sull'acqua, più spessa al centro e più sottile ai bordi, mostra invece anelli colorati.

Resta la macchia nera della bolla prossima a scoppiare. Lì lo spessore è molto minore della lunghezza d'onda e la differenza di cammino è quasi nulla, eppure le due onde si annullano. Come l'onda su una corda che si riflette su un estremo fisso (capitolo 12), la luce che si riflette su un mezzo con indice di rifrazione maggiore viene *invertita*, quella che si riflette dalla lamina verso l'aria no: in una lamina sottilissima le due onde sono in opposizione. Newton aveva visto la stessa macchia scura al centro degli *anelli di Newton*, i colori dello strato d'aria fra una lente e una lastra di vetro; Young la spiegò con l'interferenza.

Il *trattamento antiriflesso* delle lenti fotografiche e di molti occhiali è uno strato spesso circa un quarto della lunghezza d'onda (nel materiale), in cui le due riflessioni si annullano per i colori centrali dello spettro; resta un debole riflesso violaceo. In natura, molti colori «metallici»

che cambiano con l'angolo di osservazione, l'**iridescenza** delle ali di alcune farfalle, delle penne del pavone o della madreperla, non vengono da pigmenti ma da strutture microscopiche a strati, che fanno interferire la luce come una lamina sottile.

16.4.2 Il colore dei corpi

La luce del Sole è una mescolanza di tutti i colori (capitolo 15); l'insieme delle lunghezze d'onda visibili, dal violetto al rosso, è lo **spettro visibile**. Un oggetto che non emette luce propria ha il colore delle lunghezze d'onda che riflette: la clorofilla di una foglia assorbe soprattutto il rosso e il blu e rimanda il verde; un oggetto bianco riflette quasi tutto, uno nero assorbe quasi tutto (e al Sole si scalda di più, capitolo 7); un filtro trasmette solo alcuni colori. Il colore dipende dunque anche dalla luce che illumina: una mela rossa sotto una luce soltanto verde appare quasi nera.

Ogni pixel di uno schermo è formato da tre elementi luminosi, rosso, verde e blu, accesi con intensità diverse: è la **sintesi additiva** dei colori. Rosso e verde insieme danno la sensazione del giallo, tutti e tre quella del bianco, perché la retina ha tre tipi di recettori del colore (Scienze naturali). Mescolare tempere è un'altra cosa: ogni pigmento *toglie* alla luce alcuni colori, e la mescolanza si scurisce.

16.5 Quali onde? La luce come onda elettromagnetica

16.5.1 Il problema dell'etere

Un'onda meccanica ha bisogno di un mezzo che vibri: il suono non attraversa il vuoto (capitoli 12 e 13). La luce del Sole e delle stelle, invece, ci raggiunge attraversando lo spazio vuoto: 150 milioni di chilometri dal Sole, decine di migliaia di miliardi di chilometri dalle stelle più vicine. Per conservare l'analogia con il suono, i fisici dell'Ottocento immaginarono che tutto lo spazio fosse riempito da un mezzo invisibile, l'**etere**, le cui vibrazioni sarebbero state la luce. Era un mezzo ben strano: per trasmettere onde così veloci doveva essere rigidissimo, eppure i pianeti lo attraversavano senza alcun attrito.

Se l'etere esisteva, la Terra vi si muoveva attraverso, e la velocità della luce misurata sulla Terra doveva cambiare un poco con la direzione. Nel 1887 Albert Michelson ed Edward Morley costruirono uno strumento a interferenza abbastanza sensibile da rivelare l'effetto. Non trovarono nulla. Il risultato, confermato da molti esperimenti successivi, portò ad abbandonare l'etere, e nel 1905 Einstein ne trasse le conseguenze con la teoria della relatività: la luce non ha bisogno di alcun mezzo, e la sua velocità nel vuoto è la stessa per tutti gli osservatori. Lo studierai il prossimo anno.

16.5.2 Maxwell e lo spettro elettromagnetico

Che cosa oscilla, allora, in un'onda luminosa? La risposta venne da una direzione inattesa, lo studio dell'elettricità e del magnetismo. Nel 1865 James Clerk Maxwell riunì in una sola teoria le leggi dei fenomeni elettrici e magnetici, e ne dedusse che dovevano esistere onde fatte di campi elettrici e magnetici oscillanti, capaci di propagarsi anche nel vuoto. La loro velocità, calcolata con costanti misurate in laboratorio con cariche e calamite, risultava uguale alla velocità della luce: la luce è un'**onda elettromagnetica**. Una ventina d'anni dopo Heinrich Hertz produsse queste onde con circuiti elettrici. I campi elettrici e magnetici sono l'argomento del prossimo volume.

La luce visibile è soltanto una piccola parte dello **spettro elettromagnetico**, l'insieme di tutte le onde elettromagnetiche (Figura 16.6). Nel vuoto viaggiano tutte alla stessa velocità c, e si distinguono per la lunghezza d'onda, e quindi per la frequenza $f = c/\lambda$. Dalle lunghezze d'onda maggiori alle minori: onde radio, microonde (forni, telefoni, radar), infrarosso (emesso dai corpi caldi, capitolo 7), luce visibile, ultravioletto (che scotta la pelle), raggi X (radiografie) e raggi gamma, emessi dai nuclei atomici. Il nostro occhio è adattato alla piccola finestra in cui il Sole emette di più e l'atmosfera è trasparente.

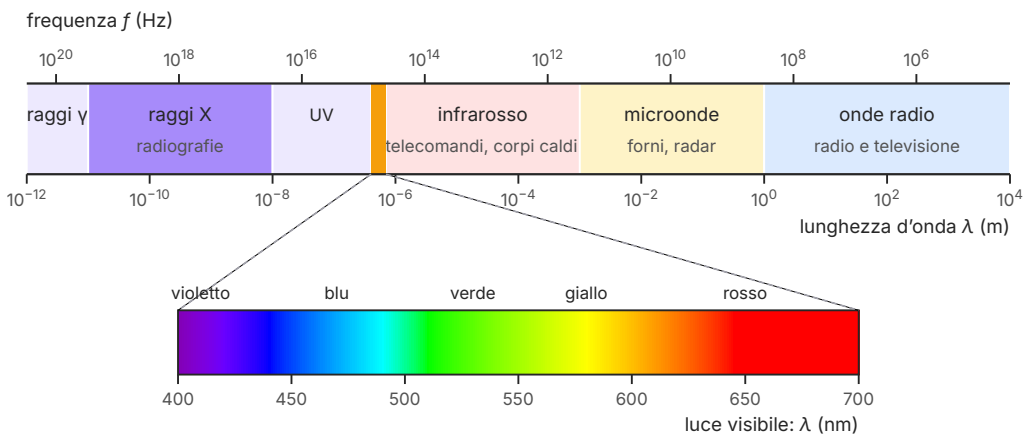


Figura 16.6 Lo spettro elettromagnetico, con la lunghezza d'onda (sotto) e la frequenza (sopra) in scala logaritmica: ogni tacca corrisponde a un fattore 100. La luce visibile, ingrandita in basso, occupa un intervallo minuscolo, da circa 400 nm a circa 700 nm. I confini fra le regioni sono indicativi.

16.5.3 Onda o particella?

La storia, però, non finisce qui. Nel 1905 Einstein mostrò che, quando viene emessa o assorbita dalla materia, la luce si comporta come se fosse fatta di pacchetti di energia, i **fotoni**: un aspet-

to «corpuscolare» diverso dai corpuscoli di Newton, che convive con quello ondulatorio. Come la luce possa essere insieme onda e particella è una delle domande da cui è nata la fisica moderna, che incontrerai l'anno prossimo.

APPROFONDIMENTO

La polarizzazione: la luce è un'onda trasversale

Le onde possono essere longitudinali, come il suono, o trasversali, come quelle su una corda (capitolo 12). Di che tipo è la luce? Un indizio veniva dallo spato d'Islanda (calcite), un cristallo che sdoppia le immagini: Huygens studiò questa doppia rifrazione nel *Traité de la lumière* e notò che i due raggi avevano proprietà diverse, senza riuscire a spiegarlo. All'inizio dell'Ottocento Young e Fresnel conclusero che la luce è un'onda *trasversale*: le sue oscillazioni avvengono perpendicolarmente alla direzione di propagazione, e possono avere orientazioni diverse.

Nella luce del Sole o di una lampada le orientazioni sono mescolate a caso. Un **polarizzatore**, per esempio un foglio di materiale plastico «polaroid», lascia passare soltanto le oscillazioni in una direzione: la luce che esce è **luce polarizzata**. Lo si verifica con due polarizzatori sovrapposti: ruotando l'uno rispetto all'altro, la luce trasmessa diminuisce, e quando le loro direzioni sono perpendicolari passa pochissima luce. Con il suono, onda longitudinale, non c'è nulla da filtrare.

La luce riflessa dall'acqua o dall'asfalto bagnato è in buona parte polarizzata orizzontalmente: gli occhiali da sole polarizzati trasmettono solo le oscillazioni verticali e spengono i riflessi. Anche gli schermi a cristalli liquidi emettono luce polarizzata: guardati con quegli occhiali, a un certo angolo si oscurano.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la lunghezza d'onda di un puntatore laser

Materiali. Un puntatore laser rosso di classe 2 (potenza minore di 1 mW); un vetrino con una doppia fenditura, con distanza fra le fenditure dichiarata dal costruttore $d = (0{,}250 \pm 0{,}005)$ mm; due supporti con morsetti; uno schermo di cartoncino bianco con un foglio di carta millimetrata; un metro a nastro (sensibilità 0,5 cm) e un righello (sensibilità 1 mm).

Procedimento. Nella stanza in penombra, fissa il laser e il vetrino in modo che il fascio colpisca le fenditure perpendicolarmente, e misura la distanza L fra il vetrino e lo schermo. Sulla carta millimetrata segna con la matita il centro della quinta frangia chiara a sinistra e della quinta a destra della frangia centrale: la loro distanza D comprende dieci interfrange, $D = 10\,\Delta y$. Misurare dieci interfrange invece di una riduce di dieci volte l'incertezza relativa. Ripeti la misura per quattro valori di L e calcola ogni volta $\lambda = d\,\Delta y / L$.

Tabella 16.2 La lunghezza d'onda di un puntatore laser misurata con una doppia fenditura ($d = 0{,}250 \pm 0{,}005$ mm; dati tipici). L'incertezza di λ è la somma delle incertezze relative di d (2,0%), di D (± 1 mm) e di L (± 0,5 cm).

L (m)	$D = 10\,\Delta y$ (mm)	Δy (mm)	λ (nm)
1,000	26	2,60	650 ± 41
1,500	39,5	3,95	658 ± 32
2,000	51,5	5,15	644 ± 27
2,500	65,5	6,55	655 ± 24

Che cosa concludere. Le quattro misure sono compatibili fra loro, e la loro media, 652 nm, è compatibile con il valore indicato sull'etichetta del puntatore, 650 nm. La misura più precisa è quella con lo schermo più lontano, dove le frange sono più larghe e l'incertezza relativa su D è minore. Riportando D in funzione di L si ottiene una retta che passa per l'origine, come prevede la formula, con pendenza di circa 26,1 mm/m; da questa λ = pendenza · $d/10 \approx 652$ nm. Il contributo maggiore all'incertezza, alla fine, viene da d.

Sicurezza. Non guardare mai dentro il fascio e non puntarlo verso le persone; usa solo laser di classe 2 o inferiore; togli anelli e orologi e tieni lontani dal fascio gli oggetti lucidi, che potrebbero rifletterlo verso gli occhi.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4: la tabella delle misure con le incertezze, il grafico di D in funzione di L con le barre d'errore e la retta, il valore di λ con la sua incertezza, il confronto con il valore dichiarato. Discuti se l'approssimazione dei piccoli angoli è giustificata (quanto vale y/L per la quinta frangia?) e che cosa cambierebbe con un laser verde.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Interferenza: due onde coerenti si rafforzano dove la differenza di cammino è $\Delta = n\lambda$ ($n = 0, 1, 2, \ldots$), si annullano dove è $\Delta = (n + \tfrac{1}{2})\lambda$.

Esperimento di Young: differenza di cammino nel punto dello schermo a distanza y dal centro, $\Delta = dy/L$; frange chiare a $y_n = n\lambda L/d$; interfrangia $\Delta y = \lambda L/d$ (tutte le lunghezze in metri, o tutte nella stessa unità). Vale nell'approssimazione dei piccoli angoli, y e d piccoli rispetto a L.

Misura della lunghezza d'onda: $\lambda = d\Delta y/L$; luce visibile da circa 400 nm (violetto) a circa 700 nm (rosso).

Fenditura singola (relazione data): la frangia centrale ha larghezza $2\lambda L/a$; più stretta la fenditura, più larga la frangia.

Onde elettromagnetiche nel vuoto: $c = \lambda f$, con $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s; in un mezzo di indice n la frequenza resta la stessa, la velocità e la lunghezza d'onda si dividono per n.

Con questo capitolo si chiudono la sesta parte e il volume. Dalla quantità di moto alla luce hai visto la fisica cercare ciò che si conserva e ciò che si trasmette: l'energia che cambia forma, il calore che va dal caldo al freddo, le onde che portano energia senza portare materia. La luce è la porta del prossimo anno: per capirla davvero serviranno l'elettricità, il magnetismo, la relatività e la fisica dei quanti.

SINTESI

- Alla fine del Seicento si confrontarono due modelli della luce: il modello corpuscolare di Newton (un flusso di particelle) e il modello ondulatorio di Huygens (un'onda che si propaga per onde secondarie).
- Entrambi spiegano propagazione rettilinea, riflessione e rifrazione, ma prevedono velocità opposte in acqua: minore per Huygens, maggiore per Newton. Foucault (1850) misurò che la luce in acqua è più lenta.
- L'interferenza della luce si osserva solo con sorgenti coerenti, che mantengono un rapporto di fase fisso: due lampade non lo sono, due fenditure illuminate dalla stessa sorgente sì, e così la luce di un laser.
- Nell'esperimento di Young (1801–1803) due fenditure vicine producono sullo schermo frange chiare e scure equidistanti: chiare dove la differenza di cammino è un numero intero di lunghezze d'onda, scure dove è un numero dispari di mezze lunghezze d'onda.
- Con i triangoli simili e l'approssimazione dei piccoli angoli la differenza di cammino è $\Delta = d\,y/L$, e l'interfrangia è $\Delta y = \lambda L/d$: cresce con la lunghezza d'onda e con la distanza dello schermo, diminuisce allontanando le fenditure.
- Misurando l'interfrangia si misura la lunghezza d'onda: la luce visibile va da circa 400 nm (violetto) a circa 700 nm (rosso), con frequenze dell'ordine di 10^{14} Hz. Il colore è legato alla frequenza, che non cambia nella rifrazione.
- L'interferenza non distrugge energia: la ridistribuisce, togliendola alle frange scure e aggiungendola a quelle chiare.
- La diffrazione, scoperta da Grimaldi (*De lumine*, 1665), è apprezzabile quando aperture e ostacoli sono paragonabili alla lunghezza d'onda; per questo le ombre ordinarie sono nette. In una fenditura singola la frangia centrale si allarga quando la fenditura si restringe (larghezza $2\lambda L/a$).
- Un reticolo di diffrazione, con moltissime fenditure equidistanti, separa i colori per interferenza; un CD è un reticolo a riflessione. La diffrazione limita il potere separatore di microscopi e telescopi.
- Nelle lamine sottili (bolle di sapone, veli d'olio) la luce riflessa dalle due superfici interferisce: alcuni colori si spengono, altri si rafforzano, a seconda dello spessore. Lo stesso principio spiega i trattamenti antiriflesso e l'iridescenza.
- Il colore di un corpo dipende dalle lunghezze d'onda che riflette e assorbe e dalla luce che lo illumina; gli schermi producono i colori per sintesi additiva di rosso, verde e blu.
- La luce non ha bisogno di un mezzo: l'etere fu abbandonato dopo l'esperimento di Michelson e Morley (1887). Per la teoria di Maxwell (1865) la luce è un'onda elettromagnetica, una piccola parte dello spettro che va dalle onde radio ai raggi gamma.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Nel modello corpuscolare di Newton, un raggio di luce che passa dall'aria all'acqua:
   A. rallenta e piega verso la normale
   B. accelera e piega verso la normale
   C. accelera e si allontana dalla normale
   D. non cambia velocità né direzione

2. ● Chi misurò, nel 1850, che la luce in acqua è più lenta che in aria?
   A. Thomas Young
   B. Christiaan Huygens
   C. Léon Foucault
   D. Francesco Maria Grimaldi

3. ● Due lampadine accese che illuminano la stessa parete non producono frange di interferenza perché:
   A. le due sorgenti non sono coerenti
   B. la luce di una lampadina non è un'onda
   C. le frange sarebbero troppo larghe per essere viste
   D. la luce delle lampadine è polarizzata

4. ●● In un esperimento di Young si riduce la distanza d fra le fenditure, lasciando tutto il resto invariato. L'interfrangia:
   A. diminuisce
   B. resta uguale
   C. si annulla
   D. aumenta

5. ● Nel centro O dello schermo, nell'esperimento di Young, c'è una frangia chiara perché:
   A. lì arriva la luce di una sola fenditura
   B. le onde delle due fenditure percorrono cammini uguali
   C. lì la luce non subisce diffrazione
   D. la differenza di cammino è mezza lunghezza d'onda

6. ● Quale di queste radiazioni ha la lunghezza d'onda maggiore?
   A. i raggi X
   B. la luce verde
   C. l'ultravioletto
   D. le microonde

7. ●● Restringendo la fenditura singola attraverso cui passa il fascio di un laser, la frangia centrale sullo schermo:

   A. si allarga

   B. si restringe

   C. scompare

   D. resta uguale ma diventa più luminosa

Vero o falso

8. ● Nelle frange scure dell'esperimento di Young l'energia della luce viene distrutta. V / F

9. ● La luce rossa ha una lunghezza d'onda maggiore e una frequenza minore della luce violetta. V / F

10. ● Il modello ondulatorio di Huygens prevede che la luce sia più lenta in acqua che in aria. V / F

11. ● Le onde elettromagnetiche, come il suono, non si propagano nel vuoto. V / F

12. ●● La formula $\Delta y = \lambda L/d$ vale in qualunque punto dello schermo, anche molto lontano dalla frangia centrale. V / F

Applicare

13. ● Luce gialla di 590 nm illumina due fenditure distanti 0,30 mm; lo schermo è a 2,0 m. Calcola l'interfrangia.

14. ● In un esperimento di Young l'interfrangia è 2,4 mm, con lo schermo a 1,20 m e fenditure distanti 0,25 mm. Qual è la lunghezza d'onda della luce?

15. ● Calcola la frequenza della luce verde di lunghezza d'onda 530 nm nel vuoto.

16. ●● La luce rossa di un laser (λ = 650 nm nell'aria) entra in acqua (n = 1,33). Calcola la sua frequenza, la sua velocità e la sua lunghezza d'onda in acqua.

17. ●● Completa. In un esperimento di Young, se si raddoppia la distanza L dello schermo e si dimezza la distanza d fra le fenditure, l'interfrangia diventa _____ volte quella iniziale.

18. ●● Leggi la Figura 16.3: quanto è larga la frangia centrale per a = 0,10 mm? Verifica il valore con la relazione $2\lambda L/a$ e prevedi la larghezza per una fenditura di 0,20 mm.

19. ●● Usa la Figura 16.6: in quale regione dello spettro cadono le lunghezze d'onda di 3 cm, di 1 µm e di 1 nm? Calcola la frequenza della prima.

Problemi

20. ●● Un laser verde (λ = 532 nm) illumina due fenditure distanti 0,18 mm; lo schermo è a 2,50 m. a) Calcola l'interfrangia. b) Quanto distano fra loro la seconda frangia scura a destra e la seconda a sinistra della frangia centrale? c) Quante frange chiare cadono in un tratto di 5,0 cm centrato sulla frangia centrale?

21. ●● Per misurare la distanza fra due fenditure si usa un laser di 650 nm e uno schermo a 3,00 m. La distanza fra i centri di 11 frange chiare consecutive è 4,9 cm. Quanto distano le fenditure?

22. ●●● Un apparato di Young viene immerso in una vasca d'acqua (n = 1,33), lasciando invariati laser, fenditure e schermo. a) Che cosa succede alla frequenza e alla lunghezza d'onda della luce in acqua (capitolo 15)? b) Se nell'aria l'interfrangia era 4,0 mm, quanto vale in acqua? c) Spiega perché questa misura avrebbe potuto decidere, come quella di Foucault, fra il modello di Huygens e quello di Newton.

23. ●●● Una lampada emette luce di due sole lunghezze d'onda, 650 nm (rossa) e 520 nm (verde), e illumina due fenditure distanti 0,30 mm; lo schermo è a 1,20 m. a) Calcola l'interfrangia per ciascun colore. b) A che distanza dal centro, la più vicina diversa da zero, una frangia chiara rossa e una verde cadono nello stesso punto? c) Di che colore appare la frangia centrale? Giustifica con la sintesi additiva.

24. ●● Un capello è teso verticalmente davanti a un laser di 650 nm; sullo schermo, a 2,00 m, la frangia centrale della figura di diffrazione è larga 4,0 cm. a) Usando la relazione della fenditura singola, valida anche per un ostacolo largo quanto il capello, calcola il diametro del capello. b) Quanto sarebbe larga la frangia centrale con un capello di 100 μm?

25. ●●● Due altoparlanti all'aperto, distanti 1,5 m, emettono lo stesso suono di 1,0 kHz, in fase (v = 343 m/s, capitolo 13). Un ascoltatore cammina lungo una linea parallela alla congiungente degli altoparlanti, a 6,0 m da essa. a) Calcola la lunghezza d'onda del suono. b) Stima con la formula di Young la distanza fra due punti consecutivi in cui il suono è più forte. c) La formula è affidabile in questo caso? Confronta il rapporto y/L con quello dell'esperimento con la luce.

Ragionare e argomentare

26. ●● Commenta la fonte. Nelle domande finali dell'*Opticks* (edizione del 1730, Questione 29) Newton chiede: «Are not the Rays of Light very small Bodies emitted from shining Substances?», cioè «I raggi di luce non sono forse corpi piccolissimi emessi dalle sostanze luminose?» (traduzione della redazione). Che cosa sostiene Newton? Quali fenomeni di questo capitolo un modello puramente corpuscolare non riesce a spiegare? Quale misura del 1850 lo contraddisse direttamente?

27. ●● Stima di Fermi. Quante lunghezze d'onda di luce verde stanno nello spessore di un foglio di carta (circa 0,1 mm)? Usa il risultato per spiegare perché un foglio di carta, o una lastra di vetro di finestra, non mostra i colori di una bolla di sapone.

28. ●●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Se nell'esperimento di Young copro una delle due fenditure, le frange chiare diventano più deboli ma restano al loro posto, e le frange scure restano scure». Spiega che cosa succede davvero sullo schermo e perché questo è un argomento a favore del modello ondulatorio.

29. ●●● Progetta un esperimento. Vuoi stabilire se la luce di un LED rosso e quella di un puntatore laser rosso hanno la stessa lunghezza d'onda, usando un vetrino con una doppia fenditura. Descrivi l'apparato, le misure e il modo di confrontare i risultati con le loro incertezze. Quale difficoltà in più presenta il LED, e come la supereresti?

PER APPROFONDIRE

- [HUY] C. Huygens, *Traité de la lumière*: il primo capitolo presenta la luce come un moto che si propaga per onde secondarie, e i capitoli successivi ne ricavano la riflessione, la rifrazione e la doppia rifrazione dello spato d'Islanda.
- [NEW] I. Newton, *Opticks*: le «Questioni» finali mostrano un Newton molto meno dogmatico dei suoi seguaci, che si interroga sulla natura della luce e sugli anelli colorati delle lamine sottili.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sulla luce raccontano il confronto fra corpuscoli e onde, il problema dell'etere e il passaggio al campo elettromagnetico.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: i capitoli sull'interferenza e la diffrazione trattano la luce con l'idea della somma delle onde, con molti esempi.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sull'interferenza propone l'esperimento di Young e le lamine sottili con numerosi problemi.

Glossario del capitolo

Approssimazione dei piccoli angoli
Sostituzione dell'ipotenusa con il cateto maggiore in un triangolo rettangolo molto allungato; lecita quando y è piccolo rispetto a L.

Esperimento di Young
Esperimento in cui la luce di una sola sorgente passa per due fenditure vicine e forma su uno schermo frange chiare e scure di interferenza.

Etere
Mezzo ipotetico in cui si sarebbe propagata la luce; abbandonato dopo l'esperimento di Michelson e Morley (1887).

Fenditura singola
Apertura sottile che, illuminata da un laser, produce una frangia centrale larga $2\lambda L/a$ e frange laterali più deboli.

Frange di interferenza
Bande chiare e scure alternate prodotte dalla sovrapposizione di due onde luminose coerenti.

Frangia centrale
Frangia chiara nel punto equidistante dalle due sorgenti, dove la differenza di cammino è nulla.

Interfrangia
Distanza fra due frange chiare (o scure) consecutive: $\Delta y = \lambda L/d$ nell'esperimento di Young.

Iridescenza
Colorazione che cambia con l'angolo di osservazione, prodotta dall'interferenza in strutture a strati sottili (bolle, ali di farfalla, madreperla).

Lamina sottile
Strato trasparente di spessore paragonabile alla lunghezza d'onda; la luce riflessa dalle sue due superfici interferisce e produce colori.

Luce polarizzata
Luce le cui oscillazioni avvengono in una sola direzione perpendicolare alla propagazione; si ottiene con un polarizzatore.

Luce visibile
Onde elettromagnetiche che l'occhio percepisce, con lunghezze d'onda nel vuoto da circa 400 nm (violetto) a circa 700 nm (rosso).

Modello corpuscolare
Descrizione della luce come flusso di particelle piccolissime emesse dai corpi luminosi (Newton); prevede che la luce sia più veloce in acqua che in aria.

Modello ondulatorio
Descrizione della luce come onda che si propaga per onde secondarie (Huygens); prevede che la luce sia più lenta in acqua che in aria, come misurò Foucault.

Onda elettromagnetica
Onda di campi elettrici e magnetici oscillanti, che si propaga anche nel vuoto alla velocità c; la luce è un'onda elettromagnetica (Maxwell, 1865).

Reticolo di diffrazione
Insieme di moltissime fenditure uguali ed equidistanti, che separa per interferenza le diverse lunghezze d'onda.

Sintesi additiva
Produzione dei colori sommando luci rosse, verdi e blu di diversa intensità, come negli schermi.

Sorgenti coerenti
Sorgenti che emettono onde della stessa frequenza con un rapporto di fase costante nel tempo; solo la loro luce dà interferenza osservabile.

Spettro elettromagnetico
L'insieme delle onde elettromagnetiche ordinate per lunghezza d'onda: onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X, raggi gamma.

Soluzioni

1. B. Per Newton l'acqua attrae i corpuscoli e ne aumenta la componente perpendicolare della velocità: il raggio piega verso la normale e la luce, in acqua, è più veloce.

2. C. Foucault confrontò la velocità della luce in aria e in acqua con uno specchio rotante: in acqua è minore, come prevede il modello ondulatorio.

3. A. La luce delle due lampade è emessa da atomi indipendenti, e il loro rapporto di fase cambia a caso continuamente: le sorgenti non sono coerenti, e le eventuali frange si spostano troppo in fretta per essere viste.

4. D. $\Delta y = \lambda L/d$ è inversamente proporzionale a d: avvicinando le fenditure le frange si allargano.

5. B. O è equidistante dalle due fenditure: la differenza di cammino è zero, e le onde arrivano in fase.

6. D. Le microonde hanno lunghezze d'onda dal millimetro al metro circa; la luce verde circa 530 nm, l'ultravioletto e i raggi X ancora meno.

7. A. La larghezza della frangia centrale, $2\lambda L/a$, è inversamente proporzionale alla larghezza a della fenditura.

8. F. L'energia viene ridistribuita: manca nelle frange scure ed è in più nelle frange chiare, e in media l'intensità è quella delle due fenditure sommate.

9. V. Il rosso ha $\lambda \approx 650$ nm, il violetto ≈ 400 nm; poiché $f = c/\lambda$, al rosso corrisponde la frequenza minore (circa $4{,}6 \times 10^{14}$ Hz contro $7{,}5 \times 10^{14}$ Hz).

10. V. Nella costruzione di Huygens il raggio piega verso la normale perché le onde secondarie in acqua si allargano più lentamente: $v = c/n$.

11. F. Le onde elettromagnetiche, come la luce del Sole, si propagano anche nel vuoto; il suono, onda meccanica, no.

12. F. La formula nasce dall'approssimazione dei piccoli angoli (MP $\approx L$): vale solo per frange vicine al centro, con y piccolo rispetto a L.

13. $\Delta y = \lambda L/d = (5{,}90 \times 10^{-7}\ \text{m} \cdot 2{,}0\ \text{m})/(3{,}0 \times 10^{-4}\ \text{m}) \approx 3{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m} = 3{,}9\ \text{mm}$.

14. $\lambda = d\,\Delta y/L = (2{,}5 \times 10^{-4}\ \text{m} \cdot 2{,}4 \times 10^{-3}\ \text{m})/1{,}20\ \text{m} = 5{,}0 \times 10^{-7}\ \text{m} = 500\ \text{nm}$ (luce verde-azzurra).

15. $f = c/\lambda = (3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m/s})/(5{,}30 \times 10^{-7}\ \text{m}) \approx 5{,}66 \times 10^{14}$ Hz.

16. La frequenza non cambia: $f = c/\lambda = (3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m/s})/(6{,}50 \times 10^{-7}\ \text{m}) \approx 4{,}62 \times 10^{14}$ Hz. In acqua $v = c/n = 3{,}00 \times 10^{8}/1{,}33 \approx 2{,}26 \times 10^{8}$ m/s e $\lambda = v/f = 650\ \text{nm}/1{,}33 \approx 489$ nm.

17. 4. $\Delta y = \lambda L/d$: raddoppiare L raddoppia Δy, dimezzare d lo raddoppia ancora: $2 \cdot 2 = 4$.

18. Dal grafico la frangia centrale va da −13 mm a +13 mm: è larga 26 mm. Verifica: $2\lambda L/a = 2 \cdot 6{,}50 \times 10^{-7}\ \text{m} \cdot 2{,}00\ \text{m}/(1{,}0 \times 10^{-4}\ \text{m}) = 2{,}6 \times 10^{-2}\ \text{m} = 26\ \text{mm}$. Con $a = 0{,}20$ mm la larghezza si dimezza: 13 mm.

19. 3 cm $= 3 \times 10^{-2}$ m: microonde; 1 μm $= 10^{-6}$ m: infrarosso (poco oltre il rosso); 1 nm $= 10^{-9}$ m: raggi X. Per le microonde $f = c/\lambda = (3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m/s})/(3 \times 10^{-2}\ \text{m}) = 1 \times 10^{10}$ Hz.

20. a) $\Delta y = (5{,}32 \times 10^{-7}\ \text{m} \cdot 2{,}50\ \text{m})/(1{,}8 \times 10^{-4}\ \text{m}) \approx 7{,}4 \times 10^{-3}\ \text{m} = 7{,}4\ \text{mm}$. b) Le frange scure sono a $(n + ½)\Delta y$: la seconda a $1{,}5\ \Delta y$ da ciascuna parte, quindi le due distano $3\ \Delta y \approx 22$ mm. c) Le frange chiare sono a $n \cdot 7{,}39$ mm; nel tratto da −25 mm a +25 mm stanno quelle con $|n| \le 3$ ($3 \cdot 7{,}39 = 22{,}2$ mm; $4 \cdot 7{,}39 = 29{,}6$ mm è fuori): 7 frange chiare.

21. 11 frange chiare consecutive comprendono 10 interfrange: $\Delta y = 4{,}9\ \text{cm}/10 = 4{,}9$ mm. $d = \lambda L/\Delta y = (6{,}50 \times 10^{-7}\ \text{m} \cdot 3{,}00\ \text{m})/(4{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m}) \approx 4{,}0 \times 10^{-4}\ \text{m} = 0{,}40$ mm.

22. a) La frequenza resta quella del laser; la lunghezza d'onda si divide per n: $\lambda_{\text{acqua}} = \lambda/1{,}33$. b) Δy è proporzionale a λ: $\Delta y_{\text{acqua}} = 4{,}0\ \text{mm}/1{,}33 \approx 3{,}0$ mm. c) Frange più strette in acqua significano una lunghezza d'onda minore; con la stessa frequenza, $v =$

λf è minore: la luce in acqua è più lenta, come previsto da Huygens. (Il modello corpuscolare, del resto, non prevede frange affatto.)

23. a) Rosso: $\Delta y = (6{,}50 \times 10^{-7} \cdot 1{,}20)/(3{,}0 \times 10^{-4})$ m = 2,60 mm; verde: $(5{,}20 \times 10^{-7} \cdot 1{,}20)/(3{,}0 \times 10^{-4})$ m = 2,08 mm. b) Serve $n_R \cdot 650$ nm $= n_V \cdot 520$ nm, cioè $n_R/n_V = 520/650 = 4/5$: la quarta frangia rossa e la quinta verde coincidono, a $4 \cdot 2{,}60$ mm $= 5 \cdot 2{,}08$ mm = 10,4 mm dal centro. c) Al centro entrambi i colori sono in interferenza costruttiva: la frangia centrale contiene rosso e verde, che per sintesi additiva danno la sensazione del giallo.

24. a) $2\lambda L/a = 4{,}0$ cm, quindi $a = 2 \cdot 6{,}50 \times 10^{-7}$ m $\cdot$ 2,00 m/$(4{,}0 \times 10^{-2}$ m) $= 6{,}5 \times 10^{-5}$ m = 65 µm. b) Larghezza $= 2 \cdot 6{,}50 \times 10^{-7}$ m $\cdot$ 2,00 m/$(1{,}00 \times 10^{-4}$ m) $= 2{,}6 \times 10^{-2}$ m = 2,6 cm: il capello più spesso dà una frangia più stretta.

25. a) $\lambda = v/f = 343$ m/s/1000 Hz = 0,343 m. b) $\Delta y \approx \lambda L/d = 0{,}343$ m $\cdot$ 6,0 m/1,5 m $\approx 1{,}4$ m. c) Il primo massimo laterale è a $y/L \approx 1{,}4/6{,}0 \approx 0{,}23$, e anche $d/L = 0{,}25$ non è piccolo: l'approssimazione dei piccoli angoli è al limite, e la stima ha un errore di qualche per cento (che cresce per i massimi successivi, non più equidistanti). Con la luce y/L è dell'ordine di 0,001–0,01 e d/L di 10^{-4}: la formula è molto più accurata.

26. Traccia di risposta. Newton propone, in forma di domanda, che la luce sia fatta di particelle emesse dai corpi luminosi: il modello corpuscolare. Il modello spiega propagazione rettilinea, riflessione e rifrazione, ma non l'interferenza (due fasci che danno il buio, le frange di Young, i colori delle lamine sottili) né la diffrazione (la frangia centrale che si allarga restringendo la fenditura, la macchia di Poisson). La misura di Foucault (1850) mostrò che la luce è più lenta in acqua, contro la previsione corpuscolare (più veloce). Si noti la forma interrogativa: Newton stesso presentava l'idea come un'ipotesi da discutere.

27. $0{,}1 \times 10^{-3}$ m/$(5{,}3 \times 10^{-7}$ m) ≈ 190, cioè circa 200 lunghezze d'onda. In uno strato così spesso la differenza di cammino fra le due riflessioni è di centinaia di lunghezze d'onda: nella luce bianca moltissimi colori, molto vicini fra loro, sono alternativamente rafforzati e spenti, e la mescolanza appare bianca. Inoltre la carta non ha superfici lisce e parallele, e la luce ordinaria non resta coerente su differenze di cammino così grandi. I colori si vedono solo con spessori di poche lunghezze d'onda, come nelle bolle di sapone.

28. L'errore è pensare che una fenditura sola dia le stesse frange, più deboli. Coprendone una, le frange di interferenza spariscono: sullo schermo resta la figura di diffrazione di una fenditura, una banda chiara larga e continua, e i punti che prima erano bui ora sono illuminati. Aggiungere luce (aprire la seconda fenditura) crea zone buie: un insieme di corpuscoli può solo sommarsi, mentre due onde possono annullarsi.

29. Traccia di risposta. Apparato: sorgente, doppia fenditura di d noto, schermo con carta millimetrata a distanza L misurata. Misure: distanza D fra più frange (per esempio 10 interfrange) per ciascuna sorgente e per più valori di L; $\lambda = dD/(10\,L)$, con incertezza calcolata come nel laboratorio del capitolo. Confronto: le due lunghezze d'onda sono uguali se i loro intervalli di incertezza si sovrappongono (Fisica 3, capitolo 3). Difficoltà del LED: la sua luce è poco coerente, divergente e meno monocromatica, e le frange sono deboli e sfumate; si migliora mettendo davanti al LED una fenditura singola stretta, come faceva Young con la luce del Sole, lavorando al buio e usando uno schermo vicino o una lente; anche così si potrà misurare solo un valore medio, perché un LED emette un intervallo di lunghezze d'onda di qualche decina di nanometri.