

Riflessione e rifrazione della luce

Concetti da rivedere

- Fase (Paragrafo 11.5)
- Riflessione e rifrazione (Paragrafo 11.8)
- Indici di rifrazione, dispersione (Paragrafo 20.5)
- Polarizzazione per diffusione e per riflessione (Paragrafo 20.8)

APPLICAZIONI BIOMEDICHE

- Endoscopio (Paragrafo 23.4, Quesito 15)



21.1 FRONTI D'ONDA, RAGGI DI LUCE E PRINCIPIO DI HUYGENS

Sorgenti di luce

Quando parliamo di *luce*, parliamo di una radiazione elettromagnetica che possiamo vedere con i nostri occhi. La luce può essere prodotta in diversi modi. Quando la superficie del filamento di una lampada a incandescenza raggiunge un'alta temperatura (circa 3000 K) emette luce, dato che una frazione significativa della radiazione termica emessa ricade nella zona del visibile. Nel caso di una lucciola, la luce emessa è invece il risultato di una reazione chimica. Altro è il caso di una sostanza fluorescente – come quella all'interno di una lampada a fluorescenza – che emette luce visibile dopo aver assorbito radiazione ultravioletta.

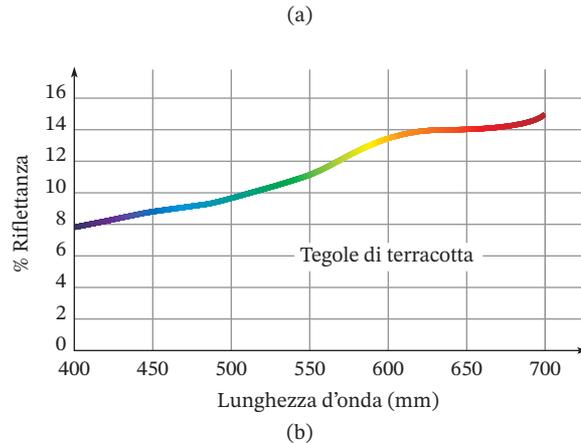
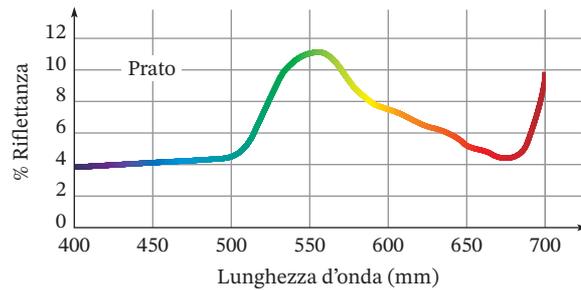
Per la maggior parte gli oggetti visibili non sono vere e proprie sorgenti di luce, dato che essi riflettono oppure trasmettono la luce proveniente da sorgenti esterne. Quando la radiazione luminosa colpisce un oggetto, infatti, una parte viene assorbita, una viene trasmessa e una viene riflessa. La natura del materiale e la sua superficie determinano le relative quantità di luce assorbita, trasmessa e riflessa a una data lunghezza d'onda. Un prato ci appare verde perché riflette lunghezze d'onda differenti che il nostro cervello interpreta come verdi. Le tegole di terracotta riflettono invece una luce di lunghezza d'onda che il cervello interpreta come rosso/arancio (Figura 21.1).



I colori sono dovuti alla riflessione e all'assorbimento della luce

Figura 21.1 Riflettanza – ovvero, percentuale di luce incidente riflessa da una superficie – in funzione della lunghezza d'onda per un prato (a) e per le tegole in terracotta dei tetti (b).

Fonte: Riprodotta dall'ASTER Spectral Library per gentile concessione del Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.



Fronti d'onda e raggi di luce

Per descrivere la propagazione delle onde elettromagnetiche utilizzeremo un modello semplice da visualizzare, ovvero quello delle onde che si producono sulla superficie dell'acqua. Un sasso gettato in uno stagno genera onde, cerchi concentrici che si propagano radialmente verso l'esterno in tutte le direzioni sulla superficie (Figura 21.2). Il **fronte d'onda** è il luogo geometrico dei punti che hanno la stessa fase. Nel caso delle onde sullo stagno, ciascuna delle creste delle onde circolari di Figura 21.2 è un fronte d'onda. Si noti che possono essere generate onde di forma geometrica differente: per esempio, un'onda con fronte d'onda rettilineo e parallelo può essere generata immergendo ripetutamente una lunga barra nell'acqua.

Figura 21.2 Onde circolari e concentriche che viaggiano sulla superficie di uno stagno allontanandosi dal punto di origine, dove un pesce, afferrando un insetto, ha rotto la calma della superficie.



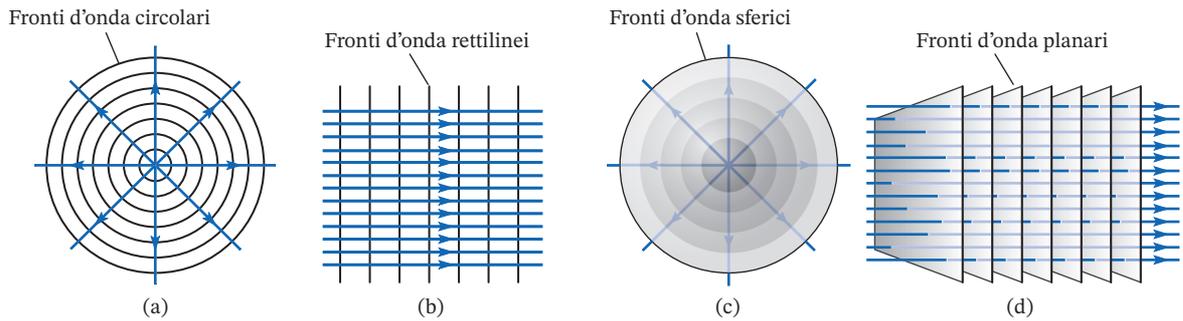


Figura 21.3 Fronti d'onda e raggi di varie geometrie: (a) fronti d'onda circolari, (b) fronti d'onda rettilinei, (c) fronti d'onda sferici e (d) fronti d'onda piani. I raggi sono indicati in blu. Le frecce indicano il verso di propagazione.

Con il termine **raggio** intendiamo la direzione che punta nel verso di propagazione dell'onda e ha direzione perpendicolare ai fronti d'onda. Per un'onda circolare i raggi partono dal punto d'origine dell'onda e puntano verso l'esterno (Figura 21.3a) mentre per un'onda con fronte d'onda rettilineo i raggi sono linee parallele una all'altra ma sempre perpendicolare ai fronti d'onda (Figura 21.3b).

Un'onda elettromagnetica come la luce si propaga nello spazio tridimensionale per cui i fronti d'onda possono essere superfici sferiche, superfici piane o in generale *superfici* con forme diverse. Se una sorgente emette la stessa quantità di luce in tutte le direzioni, i fronti d'onda sono superfici sferiche e i raggi di luce puntano radialmente verso l'esterno (Figura 21.3c). Molto lontano dalla sorgente i raggi diventano tra loro paralleli e i fronti d'onda piani cosicché l'onda può essere considerata un'onda piana (Figura 21.3d). Quando il sole viene osservato da molto lontano, come dall'altra parte della galassia, può essere considerato una sorgente puntiforme; anche sulla terra possiamo trattare la luce solare con raggi paralleli ovvero con fronti d'onda piani.

Principio di Huygens

Molto prima dello sviluppo dell'elettromagnetismo, lo scienziato olandese Christiaan Huygens (1629-1695) sviluppò un metodo geometrico per descrivere la propagazione della luce che prese il nome di *principio di Huygens*.

Principio di Huygens

In ogni istante t ciascun punto del fronte d'onda può essere considerato come una sorgente di una nuova onda sferica. Il fronte d'onda di queste sorgenti, dette elementari o secondarie, si muove verso l'esterno con la stessa velocità dell'onda originale. A un certo istante successivo di tempo, $t + \Delta t$, ciascuna di queste onde elementari ha un raggio $v\Delta t$, dove v è la velocità di propagazione dell'onda. Il fronte d'onda all'istante $t + \Delta t$ è una superficie tangente al fronte d'onda delle onde secondarie.

Ottica geometrica

L'**ottica geometrica** descrive il comportamento della luce nell'*approssimazione* in cui i fenomeni d'interferenza e diffrazione possano essere trascurati, ovvero quando le dimensioni degli oggetti, lenti, fenditure e collimatori sono molto *più grandi* della lunghezza d'onda della luce. In questo caso la propagazione può essere descritta come se la luce fosse costituita da un insieme di raggi rettilinei. Si

noti che nel vuoto e nei mezzi omogenei, come aria, acqua e vetro, i raggi sono rettilinei; invece nelle superfici di passaggio da un mezzo a un altro avvengono dei fenomeni particolari come la riflessione e la trasmissione, che il principio di Huygens ci permette di descrivere.

Esempio 21.1

Fronti d'onda delle onde piane

Applica il principio di Huygens a un'onda piana. Per fare questo devi disegnare le onde elementari che partono dai punti di un fronte d'onda piano e usare il loro inviluppo per determinare il fronte d'onda dopo un certo intervallo di tempo.

Impostazione Poiché il foglio in cui disegniamo ha solo due dimensioni, il fronte d'onda dell'onda piana è una linea retta. Scegliamo alcuni punti del fronte d'onda come sorgenti di altrettante onde elementari (secondarie); poiché non ci sono onde riflesse, ovvero che tornano indietro, tali onde elementari hanno fronti d'onda semicircolari. Se ora disegniamo una linea tangente ai fronti d'onda semicircolari otteniamo la superficie del nuovo fronte d'onda dell'onda piana.

Soluzione e discussione Cominciamo con il disegnare quattro punti su un fronte d'onda (Figura 21.4a). Immaginiamo che ciascun punto sia una sorgente di altrettante onde elementari e disegniamo quattro semicerchi di uguale raggio centrati in ciascuno dei quattro punti. Disegniamo ora una linea tangente ai quattro semicerchi; questa linea rappresenta il fronte d'onda dopo un breve intervallo di tempo.

Il motivo per cui il nuovo fronte d'onda è una linea retta invece di una linea ondulata come in Figura 21.4b dipende dal fatto che il principio di Huygens afferma che *ogni* punto del fronte d'onda è una sorgente di onde elementari. Quindi avremmo dovuto disegnare un semicerchio per ogni punto del fronte d'onda iniziale e in questo caso la superficie tangente

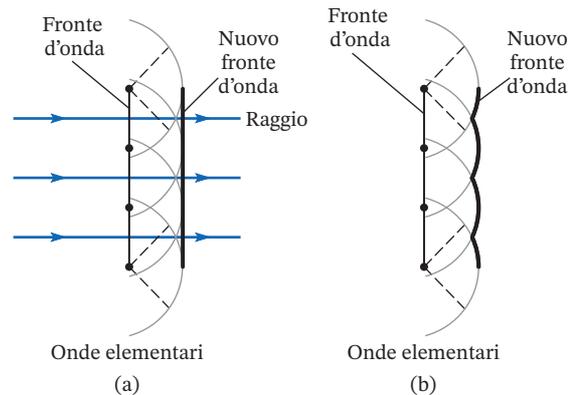


Figura 21.4

(a) Applicazione del principio di Huygens a un'onda piana. (b) Questa costruzione non è proprio completa perché non mostra le onde elementari generate da *ogni punto* del fronte d'onda.

a tutti questi semicerchi sarebbe senza ondulazioni, ovvero una retta.

Alle due estremità il nuovo fronte d'onda è curvo. Questa distorsione del fronte d'onda è legata al fenomeno della diffrazione. Ogni fronte d'onda piano si allarga leggermente mentre si propaga, ma spesso in ottica geometrica questo effetto è trascurabile.

Problema di verifica 21.1 Un'onda sferica

Ripetere l'Esempio 21.1 per un'onda luminosa sferica prodotta da una sorgente puntiforme.

21.2 RIFLESSIONE DELLA LUCE

Riflessione e diffusione

Quando la luce incide su una superficie liscia, si verifica il fenomeno della *riflessione* e i raggi di luce che incidono con un determinato angolo sono riflessi tutti con lo stesso angolo (Figura 21.5a). Quando la luce incide su una superficie ruvida e irregolare, si verifica invece il fenomeno della *diffusione* che può essere chiamata anche *riflessione diffusa* (Figura 21.5b).

La regolarità di una superficie non è semplice da definire, dato che ciò che appare liscio a occhio nudo potrebbe essere molto irregolare se osservato con un

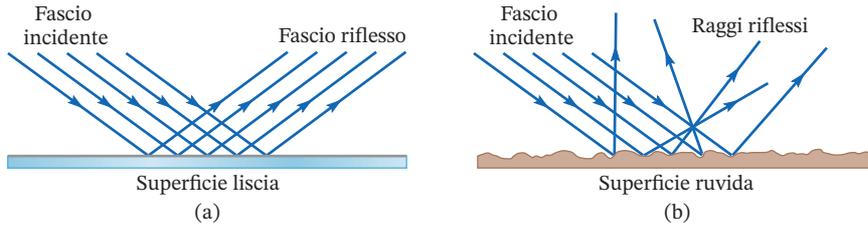


Figura 21.5 (a) Un fascio di luce riflesso da uno specchio è un esempio del fenomeno della riflessione. (b) La diffusione avviene quando lo stesso fascio viene riflesso da una superficie irregolare.

forte ingrandimento. La distinzione tra riflessione e diffusione è perciò legata alle dimensioni delle asperità della superficie in confronto con la lunghezza d'onda della luce incidente: se le irregolarità della superficie sono inferiori alla lunghezza d'onda della luce, allora si verifica il fenomeno della riflessione; se invece le irregolarità sono più grandi della lunghezza d'onda della luce, allora si verifica il fenomeno della diffusione. Come esempio possiamo considerare che una superficie pulita di vetro risulta liscia per la luce visibile perché le sue lunghezze d'onda sono migliaia di volte più grandi della distanza tra gli atomi degli elementi che costituiscono il vetro. La stessa superficie è invece irregolare se su di essa incidono dei raggi X, che hanno lunghezza d'onda più piccola dello spazio interatomico.

Leggi della riflessione

Sebbene sia una costruzione geometrica, il principio di Huygens può essere utilizzato per descrivere il fenomeno della riflessione, dato che i risultati ottenuti coincidono con quelli della moderna teoria ondulatoria. Prendiamo in considerazione un'onda piana che incide su una superficie lucida di un metallo. Questo processo è schematizzato in Figura 21.6, dove alcuni fronti d'onda piani viaggiano verso una superficie riflettente. Secondo il principio di Huygens, ogni punto sul fronte d'onda può essere pensato come una sorgente di onde elementari secondarie e l'involuppo di tali onde forma il nuovo fronte che avanza verso la superficie riflettente. Quando un punto del fronte d'onda raggiunge il metallo, l'onda elementare generata in quel punto torna verso l'alto in quanto la luce non riesce a penetrare il metallo, formando così un fronte d'onda riflesso che si propaga in una nuova direzione.

Le leggi della riflessione riassumono la relazione esistente tra la direzione dei raggi incidenti e la direzione dei raggi riflessi. Le leggi sono formulate utilizzando gli angoli che il raggio incidente e il raggio riflesso formano con la *normale* alla superficie. L'**angolo d'incidenza** (θ_i) è l'angolo tra un raggio incidente e la normale (Figura 21.7); l'**angolo di riflessione** (θ_r) è l'angolo tra un raggio riflesso e la normale. Si può dimostrare che (vedi anche Problema 9):

$$\theta_i = \theta_r \tag{21-1}$$

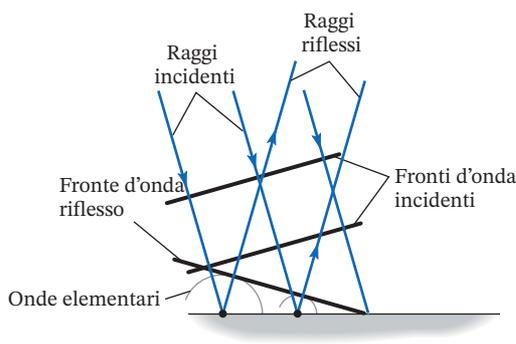
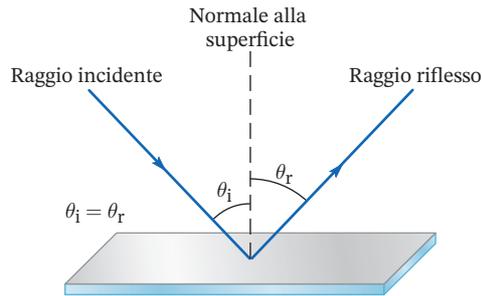


Figura 21.6 Un'onda piana colpisce una superficie metallica. Le onde elementari emesse da ciascun punto del fronte d'onda incidente, quando raggiungono la superficie, danno origine all'onda riflessa.

Figura 21.7 Gli angoli d'incidenza e di riflessione sono quelli compresi tra il raggio incidente e la *normale* alla superficie. Il raggio incidente, quello riflesso e la normale alla superficie giacciono tutti nello stesso piano.



La seconda legge sulla riflessione dice che raggio incidente, raggio riflesso e normale al piano giacciono tutti nello stesso piano (il **piano d'incidenza**).

Leggi della riflessione

1. L'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di riflessione.
2. Il raggio riflesso giace sullo stesso piano del raggio incidente e della normale alla superficie in quel punto. Il raggio incidente e quello riflesso stanno da parti opposte rispetto alla normale.

Considerando il fenomeno della diffusione, ci possiamo accorgere che anche in questo caso l'angolo di riflessione è uguale all'angolo d'incidenza; tuttavia le normali a una superficie irregolare non hanno la stessa direzione in ogni punto della superficie, ma direzioni perpendicolari alla rugosità in quel punto, per cui i raggi verranno riflessi in direzioni diverse.

Riflessione e trasmissione

Quando la luce raggiunge la superficie di separazione tra due *mezzi trasparenti*, come per esempio aria-vetro, parte della luce viene riflessa e parte viene trasmessa nel nuovo mezzo. La luce riflessa segue le leggi della riflessione; la luce non riflessa, che generalmente è la maggior parte, viene trasmessa seguendo invece il percorso descritto dalla legge di Snell. Quando un fascio di luce passa dall'aria al vetro incidendo perpendicolarmente alla superficie, solo il 4% dell'intensità incidente viene riflessa, mentre il 96% viene trasmessa.

21.3 RIFRAZIONE DELLA LUCE: LEGGE DI SNELL

Nel Paragrafo 20.5 abbiamo visto che quando la luce passa da un mezzo a un altro la lunghezza d'onda cambia (a meno che la velocità della luce nei due mezzi sia la stessa) mentre la frequenza resta invariata. Il principio di Huygens ci aiuta a capire il motivo per il quale *i raggi di luce cambiano direzione* quando passano da un mezzo a un altro originando il fenomeno della **rifrazione**.

La Figura 21.8a mostra una serie di fronti d'onda di un'onda piana che viaggia nell'aria e incide su una superficie piana di vetro. La distanza tra i fronti d'onda è pari alla lunghezza d'onda della luce incidente. Una volta che il fronte d'onda raggiunge la superficie del vetro, verrà in parte riflesso e in parte trasmesso. Ora prenderemo in considerazione solo la parte trasmessa in quanto le leggi che governano la parte riflessa sono state descritte nel paragrafo precedente. Poiché il fronte d'onda si avvicina alla superficie del vetro con un certo angolo rispetto alla normale, vi sarà un momento in cui, di uno stesso fronte d'onda, una parte sarà

Rifrazione: Cambiamento della direzione del raggio di luce quando passa da un mezzo a un altro.

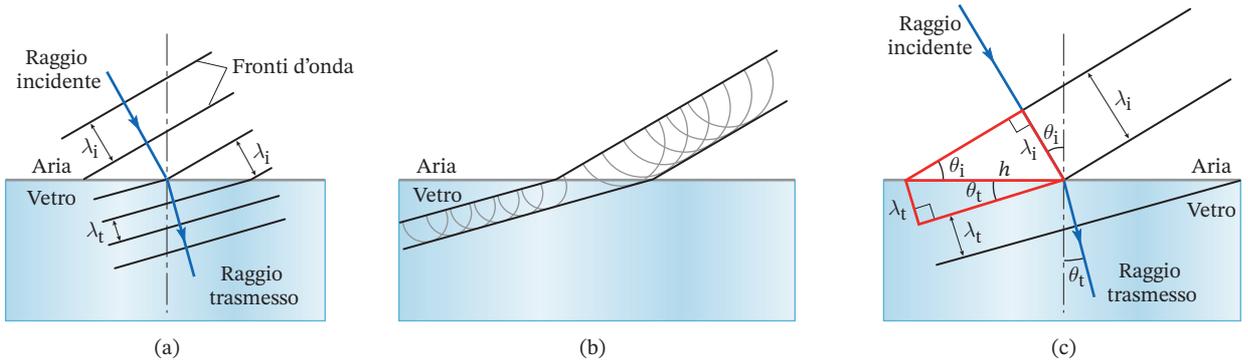


Figura 21.8 (a) Fronti d’onda e raggi nell’interfaccia vetro-aria. I fronti d’onda riflessi sono omessi. I fronti d’onda sono più vicini nel vetro che nell’aria perché la lunghezza d’onda è minore. (b) Costruzione di Huygens per un fronte d’onda parzialmente in aria e parzialmente in vetro. (c) Costruzione geometrica per determinare la direzione del raggio trasmesso.

ancora in aria e una parte sarà già penetrata nel vetro, dove si propaga più lentamente. La Figura 21.8b mostra la costruzione di Huygens per un tale fronte d’onda. Le onde elementari secondarie hanno raggio più piccolo nel vetro poiché la lunghezza d’onda della luce nel vetro è minore della lunghezza d’onda nell’aria.

La Figura 21.8c mostra due triangoli rettangoli costruiti tenendo conto delle orientazioni del fronte d’onda in aria e nel vetro rispetto a quella dell’interfaccia aria-vetro. Le proprietà dei triangoli rettangoli possono essere usate per mettere in relazione l’angolo d’incidenza θ_i con l’angolo del raggio trasmesso (o angolo di rifrazione) θ_t . I due triangoli hanno la stessa ipotenusa (h), per cui:

$$\sin\theta_i \lambda \frac{\lambda_i}{h} \quad \text{e} \quad \sin\theta_t = \frac{\lambda_t}{h}$$

Eliminando h :

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{\lambda_i}{\lambda_t} \tag{21-2}$$

Questa relazione viene generalmente scritta usando degli indici di rifrazione dei mezzi attraversati. Considerando che quando la luce passa da un mezzo a un altro la *frequenza f non cambia* (vedi Paragrafo 20.5), poiché $v = f\lambda$, λ risulta direttamente proporzionale a v . Per definizione [$n = c/v$, Equazione (20-2)], l’indice di rifrazione n è *inversamente* proporzionale a v . Dunque, sostituendo:

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_t} = \frac{v_i/f}{v_t/f} = \frac{v_i}{v_t} = \frac{c/n_i}{c/n_t} = \frac{n_t}{n_i} \tag{21-3}$$

Sostituendo λ_i/λ_t con n_t/n_i nell’Equazione (21-2) e moltiplicando, otteniamo la:

Legge di Snell

$$n_i \sin\theta_i = n_t \sin\theta_t \tag{21-4}$$

Questa è la legge della rifrazione, scoperta sperimentalmente dall’olandese Wilibrord Snell (1580-1626). Per la determinazione univoca della direzione del raggio trasmesso sono necessarie però altre asserzioni:

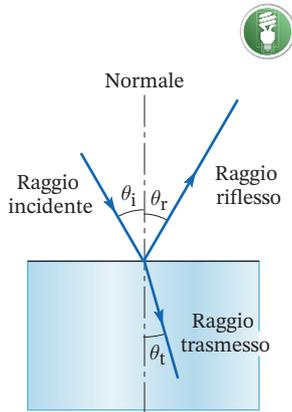


Figura 21.9 Il raggio incidente, quello riflesso, quello trasmesso e la normale alla superficie giacciono tutti nello stesso piano. Tutti gli angoli sono misurati rispetto alla normale. Il raggio riflesso e quello trasmesso si trovano sempre dalla parte opposta del raggio incidente rispetto alla normale alla superficie nel punto d'incidenza.

Leggi della rifrazione

1. $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$, dove gli angoli sono quelli formati con la normale alla superficie.
2. Il raggio incidente, il raggio trasmesso e la normale giacciono tutti sullo stesso piano – il piano d'incidenza.
3. Il raggio incidente e il raggio trasmesso stanno da parti opposte rispetto alla normale (Figura 21.9).

Matematicamente nella legge di Snell i due mezzi sono intercambiabili, ossia il percorso della luce è lo stesso anche invertendo il punto di partenza dal raggio luminoso.

È opportuno ricordare che l'indice di rifrazione di un materiale dipende dalla temperatura e dalla frequenza della luce. Nella Tabella 21.1 sono riportati gli indici di rifrazione per alcuni materiali alla frequenza della luce gialla a cui corrisponde, nel vuoto, una lunghezza d'onda di 589.3 nm. (Quando si specifica la lunghezza d'onda di una radiazione luminosa ci si riferisce a quella nel vuoto.)

Mettili alla prova 21.3

Un acquario con pareti di vetro ($n = 1.5$) è riempito con acqua ($n = 1.33$). Un raggio di luce che passa dalla parete di vetro all'acqua viene deviato verso la normale alla parete o allontanato da questa direzione? Prova a spiegare. (Assumi che il raggio di luce non abbia la direzione della normale alla superficie di vetro)

Tabella 21.1 Indici di rifrazione per $\lambda = 589.3$ nm nel vuoto (dove non specificato diversamente, si intende alla temperatura di 20 °C)

Materiale	Indice	Materiale	Indice
Solidi		Liquidi	
Ghiaccio (a 0 °C)	1.309	Acqua	1.333
Fluorite	1.434	Acetone	1.36
Quarzo fuso	1.458	Alcol etilico	1.361
Polistirene	1.49	Tetracloruro di carbonio	1.461
Lucite	1.5	Glicerina	1.473
Plexiglass	1.51	Soluzione zuccherina (80%)	1.49
Vetro crown	1.517	Benzene	1.501
Lastra di vetro	1.523	Disolfuro di carbonio	1.628
Cloruro di sodio	1.544	Ioduro di metilene	1.74
Vetro flint leggero	1.58		
Vetro flint spesso	1.655	Gas a 0 °C e 1 atm	
Zaffiro	1.77		
Zircone	1.923	Elio	1.000036
Diamante	2.419	Etere etilico	1.000152
Biossido di titanio	2.9	Vapore acqueo	1.000250
Fosforo di gallio	3.5	Aria secca	1.000293
		Biossido di carbonio	1.000449

LA FISICA NEL QUOTIDIANO

Riempi con acqua un bicchiere di vetro, metti una penna dentro al bicchiere e guarda la penna da differenti angolazioni. Perché la penna sembra piegata?

Esempio 21.2
Raggio di luce che attraversa una lastra di vetro

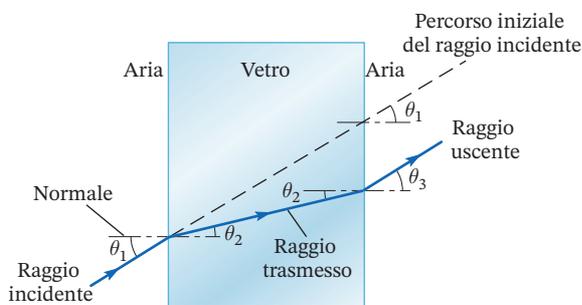
Si consideri un fascio di luce che incide su una lastra di vetro con un angolo di 30.0° per poi attraversarla ed uscire dall'altra parte (la lastra di vetro ha le facce parallele). Trascurando il fenomeno della riflessione e sapendo che l'indice di rifrazione del vetro è 1.52, (a) trovare l'angolo di rifrazione del raggio all'interno del vetro, (b) dimostrare che il raggio entrante e il raggio uscente sono paralleli.

Impostazione Disegniamo la lastra e i raggi di luce. Essendo interessati ai raggi rifratti trascuriamo i raggi riflessi. Disegniamo le normali alla superficie di separazione dei due mezzi (aria-vetro) e individuiamo gli angoli d'incidenza e di rifrazione; applichiamo quindi la legge di Snell. Quando il raggio passa dall'aria ($n = 1.00$) al vetro ($n = 1.52$) esso si avvicina alla normale: poiché $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, un n più grande implica un angolo più piccolo. In base a un ragionamento analogo, si trova che quando il raggio passa dal vetro all'aria si deve allontanare dalla normale.

Soluzione (a) Nella Figura 21.10 è disegnato il percorso del raggio di luce trasmesso. Nel primo passaggio aria-vetro la legge di Snell porta a:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \frac{1.00}{1.52} \sin 30.0^\circ = 0.3289$$


Figura 21.10

Un raggio di luce che attraversa una lastra di vetro.

L'angolo di rifrazione è:

$$\theta_2 = \sin^{-1} 0.3289 = 19.2^\circ$$

(b) Nel secondo passaggio, quello dal vetro all'aria, è necessario applicare nuovamente la legge di Snell. Poiché le superfici sono parallele, anche le rispettive normali sono parallele. L'angolo di rifrazione nel primo passaggio e l'angolo d'incidenza nel secondo sono angoli alterni interni, e quindi, nel passaggio vetro-aria l'angolo d'incidenza è uguale a θ_2 :

$$n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3$$

Non è necessario calcolare numericamente θ_3 . Infatti nel passaggio della prima superficie di separazione (aria-vetro) avevamo ottenuto che $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ e quindi $n_1 \sin \theta_1 = n_3 \sin \theta_3$. Poiché $n_1 = n_3$, $\theta_1 = \theta_3$. I due raggi – incidente e uscente – sono paralleli uno all'altro.

Discussione Nota che il raggio uscente è parallelo al raggio incidente ma è *traslato* di una certa quantità legata anche allo spessore della lastra di vetro (vedi la linea tratteggiata nella Figura 21.10). Se le superfici della lastra di vetro non fossero parallele, allora le due normali non sarebbero parallele, l'angolo d'incidenza nel secondo passaggio non sarebbe uguale all'angolo di rifrazione del primo e il raggio uscente non sarebbe parallelo al raggio incidente.

Problema di verifica 21.2 Come vede l'occhio del pesce

Un pesce è fermo sul fondo di uno stagno. Se il Sole è a 33° sopra l'orizzonte, con quale angolo viene visto dal pesce? (*Aiuto:* fare un disegno che includa la normale alla superficie e porre attenzione a identificare correttamente gli angoli d'incidenza e rifrazione.)



Figura 21.11 La rifrazione nell'interfaccia acqua-aria devia i raggi di luce che provengono dalla moneta.

LA FISICA NEL QUOTIDIANO

Metti una moneta sul fondo di una tazza vuota. Guarda la tazza da una posizione in cui il bordo della tazza si allinea con il bordo esterno della moneta, la moneta è praticamente coperta dalla parete della tazza. Ora, senza muovere la testa, versa lentamente dell'acqua nella tazza e pronuncia la parola magica RIFRAZIONE. Versa lentamente in modo da essere sicuro che la moneta non si muova. quando la tazza è piena d'acqua la moneta diventa visibile (Figura 21.11).

Miraggi

I *miraggi* sono fenomeni che si verificano nei deserti oppure sulle strade asfaltate scaldate dal sole durante l'estate. Questi fenomeni sono dovuti alla rifrazione della luce da parte dell'aria (Figura 21.12a). Il terreno caldo scalda l'aria immediatamente vicina, cosicché i raggi di luce provenienti dal cielo attraversano aria via via sempre più calda. Poiché la velocità della luce in aria aumenta con l'aumentare della temperatura, la luce viaggia più veloce nell'aria più calda che è vicina al terreno. La variazione di temperatura è graduale e quindi non c'è un brusco cambiamento dell'indice di rifrazione; questo fa sì che i raggi, invece di essere bruscamente deviati, curvino gradualmente verso l'alto (Figura 21.12b).

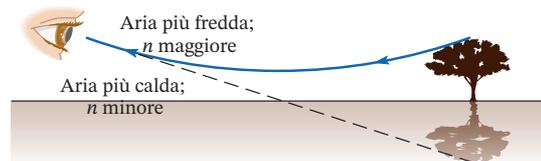
Se applichiamo il principio di Huygens a questo fenomeno, dobbiamo considerare che le onde elementari che partono dai punti del fronte d'onda viaggiano a velocità differenti e il loro raggio (lunghezza d'onda) è più grande quando sono vicine al terreno. Per conseguenza, i fronti d'onda non sono più paralleli (Figura 21.12c). Il sistema occhio-cervello interpreta questi raggi come raggi provenienti dal terreno anche se in realtà provengono da un'altra direzione.

Il fenomeno opposto, ovvero un miraggio sopra la linea dell'orizzonte, si verifica quando lo strato d'aria vicino alla superficie terrestre è *più freddo* dell'aria soprastante. Una nave che si trova appena *dietro* l'orizzonte può qualche volta essere vista perché i raggi di luce provenienti dalla nave sono gradualmente curvati verso il basso (Figura 21.13). Le navi e i fari sembrano fluttuare nel cielo oppure sembrano molto più alti di quanto siano nella realtà. Si ricordi che la rifrazione permette di vedere il sole prima che superi l'orizzonte all'alba e dopo essere sceso sotto l'orizzonte al tramonto.

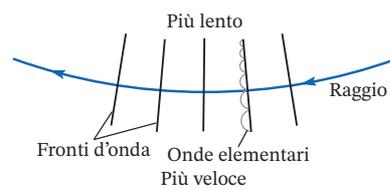


©Pete Turner/Getty Images

(a)



(b)



(c)

Figura 21.12 (a) Miraggio nel deserto della Namibia. Si noti che le immagini sono a testa in giù. (b) Un raggio di luce proveniente dal Sole viene deviato verso l'alto. (c) La parte bassa del fronte d'onda si muove più velocemente di quella alta.

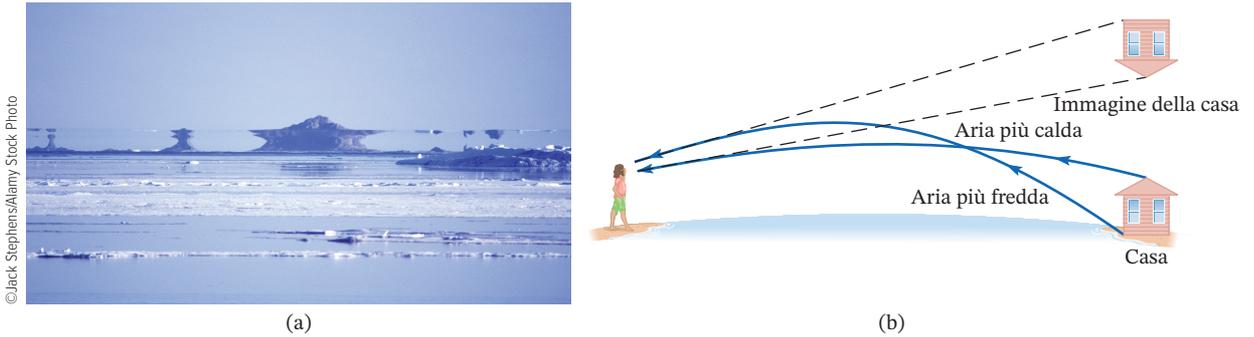


Figura 21.13 (a) Miraggio nella base aerea di Thule in Groenlandia. Si noti che il miraggio è sopra la linea dell'orizzonte. (b) Uno schema dei raggi di luce che formano il miraggio della casa.

Dispersione in un prisma

Quando la luce bianca entrata in una faccia di un prisma triangolare esce dall'altra faccia come uno spettro continuo di colori dal rosso al violetto (Figura 21.14). La separazione avviene perché il prisma è dispersivo – cioè, la velocità della luce nel prisma dipende dalla frequenza della luce (vedi Paragrafo 20.5).

La luce bianca naturale è composta dalla somma di “luci” di diverso colore e comprende tutte le frequenze dell'intervallo del visibile. All'ingresso del prisma ogni colore (frequenza) rifrange con un angolo determinato dall'indice di rifrazione del prisma. Dato che l'indice di rifrazione aumenta con l'aumentare della frequenza, l'angolo di rifrazione sarà minore per il colore rosso e aumenterà con gradualità fino al viola. Di conseguenza, la luce bianca verrà separata nei suoi colori spettrali. Si noti anche che nel vetro del prisma il viola avrà un cammino maggiore del rosso.

Arcobaleno

Gli arcobaleni sono formati dal fenomeno della dispersione della luce nelle gocce d'acqua. Un raggio di luce solare che entra in una goccia di pioggia viene separato nei diversi colori dello spettro. I raggi che contribuiscono all'*arcobaleno primario* – il più luminoso e spesso l'unico visibile – attraversano la goccia di pioggia si riflettono all'interno della goccia ed escono nuovamente nell'aria (Figura 21.15a). La rifrazione avviene sia all'ingresso che all'uscita della goccia. Poiché anche per l'acqua l'indice di rifrazione varia con la frequenza, la luce solare viene separata nei suoi colori spettrali. Per gocce d'acqua relativamente grandi come quelle degli acquazzoni estivi la separazione angolare tra il rosso e il viola può raggiungere anche i 2° (Figura 21.15b).

Una persona che guardi una porzione di cielo pieno di gocce cadenti vedrà luce rossa uscire dalle gocce poste a quota maggiore e luce viola uscire dalle gocce più basse (Figura 21.15c). L'arcobaleno è un arco di cerchio che sottende un angolo di 42° per il rosso e 40° per il violetto; per gli altri colori gli angoli si collocano all'interno di questi valori.

Con le giuste condizioni è possibile vedere anche un doppio arcobaleno. L'arcobaleno secondario ha un raggio più largo, è meno intenso e ha i colori invertiti (Figura 21.15d). Esso si origina dai raggi che subiscono *due riflessioni* dentro alla goccia prima di uscire. Gli angoli sottesi dall'arcobaleno secondario sono 50.5° per il rosso e 54° per il violetto.

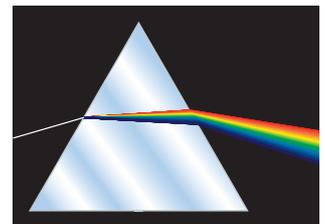


Figura 21.14 Dispersione della luce bianca dovuta a un prisma.

21.4 RIFLESSIONE TOTALE

Secondo la legge di Snell, se un raggio passa da un mezzo con indice di rifrazione maggiore a uno con indice di rifrazione inferiore, viene rifratto allontanandosi dalla normale (Figura 21.16; raggio *b*): in altre parole, l'angolo di rifrazione è

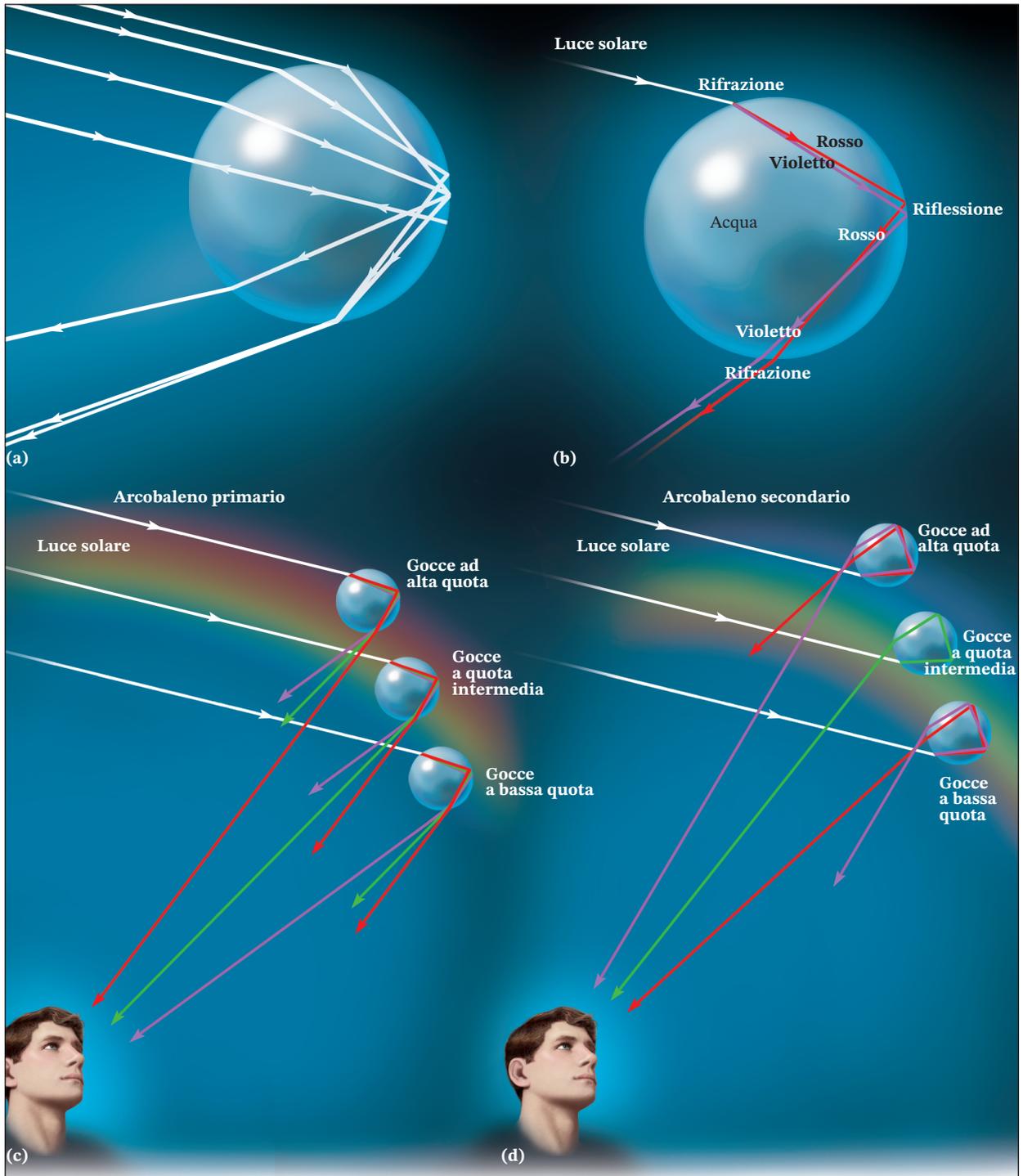


Figura 21.15 (a) Raggi del sole che incidono su una goccia e si riflettono solamente una volta all'interno della goccia stessa. I raggi incidenti sono paralleli, quelli uscenti no. La vicinanza della coppia di raggi uscenti dalla parte inferiore della goccia indica che da quella zona esce l'intensità massima. In (b) e (c) sono mostrati solamente i raggi d'intensità massima. Poiché l'indice di rifrazione dell'acqua dipende dalla frequenza, l'angolo con il quale la luce lascia la goccia varia con la frequenza. A ogni interfaccia avvengono sia la riflessione sia la trasmissione. Il raggio riflesso e quello trasmesso che non contribuiscono all'arcobaleno primario sono omessi. (c) L'arcobaleno è formato dalla luce proveniente da moltissime gocce. Per maggiore chiarezza espositiva si sono usati angoli più grandi di quelli reali. (d) I raggi di luce che si riflettono due volte all'interno della goccia formano l'arcobaleno secondario nel quale l'ordine dei colori è invertito: il violetto si trova più in alto mentre il rosso più in basso.

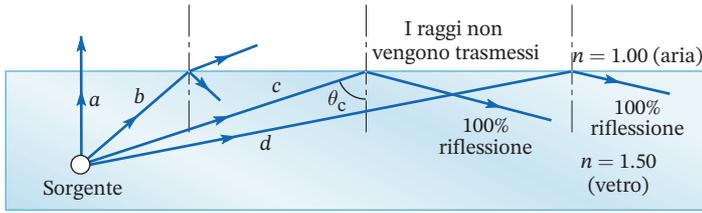


Figura 21.16

Riflessione parziale e riflessione totale in un blocco di vetro rettangolare. Gli angoli d'incidenza dei raggi *a* e *b* sono minori dell'angolo critico; il raggio *c* incide con angolo critico θ_c e il raggio *d* incide con un angolo maggiore di quello critico.

maggiore dell'angolo d'incidenza. Se aumenta l'angolo d'incidenza, aumenta anche l'angolo di rifrazione fino a raggiungere il valore limite di 90° (Figura 21.16; raggio *c*). Quando l'angolo di rifrazione vale 90° , il raggio rifratto è diventato parallelo alla superficie d'uscita e non può più uscire dal mezzo. L'angolo d'incidenza a cui corrisponde un angolo di rifrazione pari a 90° è chiamato **angolo critico** θ_c .

Dalla legge di Snell:

$$n_i \sin \theta_c = n_t \sin 90^\circ$$

Angolo critico

$$\theta_c = \sin^{-1} n_t/n_i \tag{21-5a}$$

dove i pedici “i” e “t” si riferiscono rispettivamente al mezzo attraversato dal raggio incidente e a quello attraversato dal raggio trasmesso. Se l'angolo d'incidenza è maggiore di θ_c , per il raggio avviene il fenomeno della **riflessione totale**. Infatti la funzione seno non può assumere valori maggiori di 1, per cui non è possibile soddisfare la legge di Snell: in queste condizioni non si osserva più rifrazione e tutta la luce viene riflessa (Figura 21.16; raggio *d*).

● **L'angolo critico** è il minimo angolo d'incidenza per il quale la luce non viene trasmessa oltre l'interfaccia tra i due mezzi.

Nessun raggio trasmesso per $\theta_i \geq \theta_c$ (21-5b)

La riflessione totale non può avvenire quando la luce passa da un mezzo con indice di rifrazione inferiore a uno con indice di rifrazione maggiore. In questo caso il raggio rifratto piega verso la normale, cosicché l'angolo di rifrazione è sempre minore dell'angolo d'incidenza.

Esempio 21.3

Riflessione totale in un prisma triangolare di vetro

Un fascio di luce in aria entra in un prisma triangolare di vetro. Per quale valore massimo di angolo d'incidenza θ_i (Figura 21.17) il fascio subisce riflessione totale dalla superficie posteriore del prisma? Il vetro del prisma ha un indice di rifrazione $n = 1.50$.

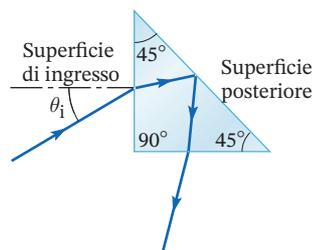


Figura 21.17

Fascio di luce che entra in un prisma di vetro di forma triangolare.

Impostazione In questo problema è più facile lavorare a ritroso. La riflessione totale avviene se l'angolo d'in-

cidenza sulla superficie posteriore del prisma è maggiore o uguale all'angolo critico. Partiamo trovando l'angolo critico e poi lavoriamo a ritroso usando la geometria e la legge di Snell per trovare il corrispondente angolo d'incidenza sulla superficie d'ingresso del prisma.

Soluzione Per trovare l'angolo critico dalla legge di Snell, impostiamo l'angolo di rifrazione uguale a 90° .

$$n_i \sin \theta_c = n_a \sin 90^\circ$$

Dalla superficie posteriore il raggio dal vetro “vorrebbe” passare nell'aria e dunque, $n_i = 1.50$ e $n_a = 1.00$

$$\sin \theta_c = \frac{n_a}{n_i} \sin 90^\circ = \frac{1.00}{1.50} \times 1.00 = 0.667$$

$$\theta_c = \sin^{-1} 0.667 = 41.8^\circ$$

La Figura 21.18 è solamente un ingrandimento della Figura 21.17, in cui è evidenziato l'angolo critico θ_c d'incidenza sulla superficie posteriore del prisma. Gli angoli d'incidenza e rifrazione sulla superficie frontale sono contrassegnati come θ_i e θ_t ; essi sono legati dalla legge di Snell:

$$1.00 \sin \theta_i = 1.50 \sin \theta_t$$

Ciò che rimane da trovare è la relazione tra θ_t e θ_c . Disegnando una linea parallela alla normale della superficie d'ingresso del prisma, nel punto in cui il raggio colpisce la superficie posteriore, possiamo usare la legge degli angoli alterni interni per contrassegnare gli angoli uguali θ_t (Figura 21.18). Visto che l'angolo formato dalle due normali è 45.0° , avremo:

$$\theta_t = 45.0^\circ - \theta_c = 45.0^\circ - 41.8^\circ = 3.2^\circ$$

Quindi:

$$\sin \theta_i = 1.50 \sin \theta_t = 1.50 \times 0.05582 = 0.0837$$

$$\theta_i = \sin^{-1} 0.0837 = 4.8^\circ$$

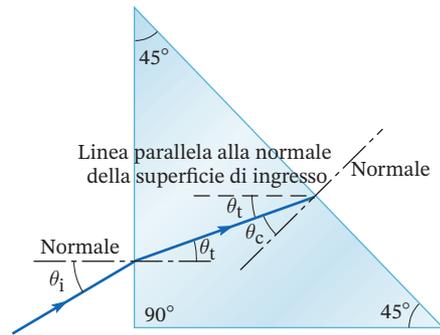


Figura 21.18

Ingrandimento della Figura 21.7.

Discussione Per un fascio che incide dal basso formando un angolo con la normale alla superficie d'ingresso del prisma compreso tra 0 e 4.8° , sulla superficie posteriore del prisma avviene il fenomeno della riflessione totale. Se un fascio incide con un angolo maggiore di 4.8° , allora l'angolo d'incidenza sulla superficie posteriore del prisma è minore dell'angolo critico, quindi parte del fascio viene trasmesso. Il Problema di verifica 21.3 prende in considerazione il comportamento del prisma quando un fascio è incidente da sopra la normale. Se in questi esercizi troviamo il valore del seno di un angolo maggiore di 1 (cosa impossibile), dobbiamo controllare la corretta scelta degli indici nella soluzione del problema.

Problema di verifica 21.3 Raggio incidente da sopra la normale

Disegnare un fascio di luce incidente sul prisma della Figura 21.17 con una direzione di provenienza sopra alla normale. Dimostrare che per qualsiasi angolo d'incidenza il fascio subisce sempre riflessione totale sulla superficie posteriore del prisma.

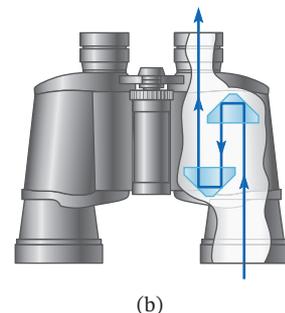
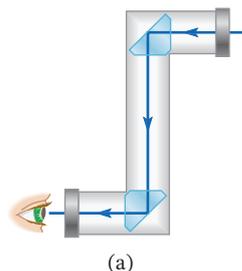
Riflessione totale nei prismi

Periscopio



Gli strumenti ottici come i periscopi, le fotocamere reflex, i binocoli e i telescopi spesso usano dei prismi per riflettere la luce. La Figura 21.19a mostra lo schema

Figura 21.19 (a) Un periscopio usa due prismi riflettenti per spostare il fascio di luce. (b) Nei binocoli la luce subisce la riflessione totale per due volte in ciascun prisma.



di un semplice periscopio. La luce è riflessa con un angolo di 90° da ciascuno dei due prismi; il risultato è quello dello spostamento ottico del fascio di luce. Un dispositivo simile ma leggermente più complicato è usato nei binocoli (Figura 21.19b). In questi due dispositivi si sarebbero potuti usare degli specchi per ottenere risultati analoghi. Il vantaggio nell'uso dei prismi al posto degli specchi è quello che mentre i prismi riflettono il 100% della luce, gli specchi arrivano solo al 90%. (Gli elettroni che oscillano nel metallo dello specchio per produrre l'onda riflessa dissipano una parte d'energia a causa della resistività del metallo.)

La brillantezza dei diamanti è dovuta alla riflessione totale. I tagli sono fatti in modo tale che la maggior parte della luce incidente sulle facce frontali subisca molte riflessioni totali fino a riemergere verso l'osservatore. Un taglio di diamanti mediocre lascia uscire meno luce verso l'osservatore (Figura 21.20).

Fibre ottiche

La riflessione totale è il principio sul quale si basano le fibre ottiche, una tecnologia che ha rivoluzionato sia le telecomunicazioni sia la medicina. Al centro di una fibra ottica c'è un nucleo cilindrico trasparente fatto di vetro o di materiale plastico con un indice di rifrazione relativamente alto (Figura 21.21). Il nucleo può essere molto sottile, con diametro fino a qualche millesimo di millimetro – più piccolo di un capello. Il nucleo ha un rivestimento trasparente chiamato *cladding* con un indice di rifrazione più basso del nucleo. La differenza tra i due indici di rifrazione è massimizzata in modo tale che l'angolo critico per l'interfaccia nucleo-cladding sia il più piccolo possibile.

Nelle fibre ottiche i segnali di luce viaggiano paralleli all'asse del nucleo. È molto difficile però che i raggi di luce entrino nella fibra ottica *perfettamente* paralleli al suo asse, per cui molti raggi colpiranno il cladding con un *grande angolo d'incidenza*. Se l'angolo d'incidenza è maggiore dell'angolo critico, il raggio viene riflesso totalmente e torna nel nucleo senza perdite di luce. Un raggio di luce in un metro di fibra può essere riflesso anche migliaia di volte, ma grazie alla riflessione totale può viaggiare per lunghe distanze, anche chilometri, prima di subire apprezzabili perdite. Le fibre ottiche sono flessibili e possono essere piegate con facilità; tanto più piccolo è l'angolo critico, tanto maggiore può essere la piegatura della fibra. Se questa viene piegata eccessivamente, i raggi possono colpire l'interfaccia nucleo-cladding con un angolo minore dell'angolo critico, la luce viene trasmessa dal cladding e il segnale cala drasticamente.

Le fibre ottiche possono trasportare una quantità di informazioni molto superiore rispetto ai conduttori di rame. Una singola fibra ottica può trasmettere decine di migliaia di conversazioni telefoniche, mentre una coppia di fili di rame

Figura 21.20

(a) Il raggio di luce subisce due volte la riflessione interna prima di uscire dalla faccia frontale (che è anche quella d'ingresso) del diamante. (b) Un taglio di diamante mal fatto. Il raggio di luce in questo diamante incide su una delle superfici posteriori con un angolo minore di quello critico: la maggior parte della luce non viene riflessa verso l'osservatore, ma sarà trasmessa fuori dal diamante nella parte posteriore.

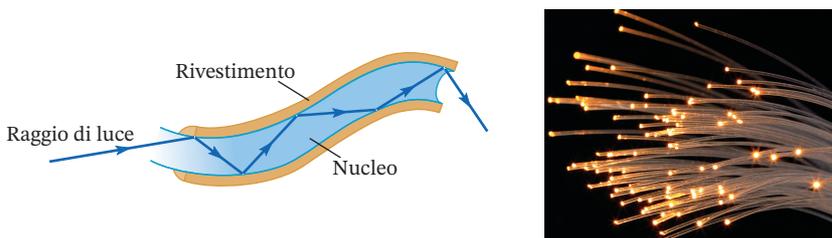
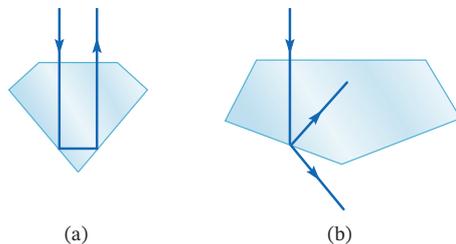
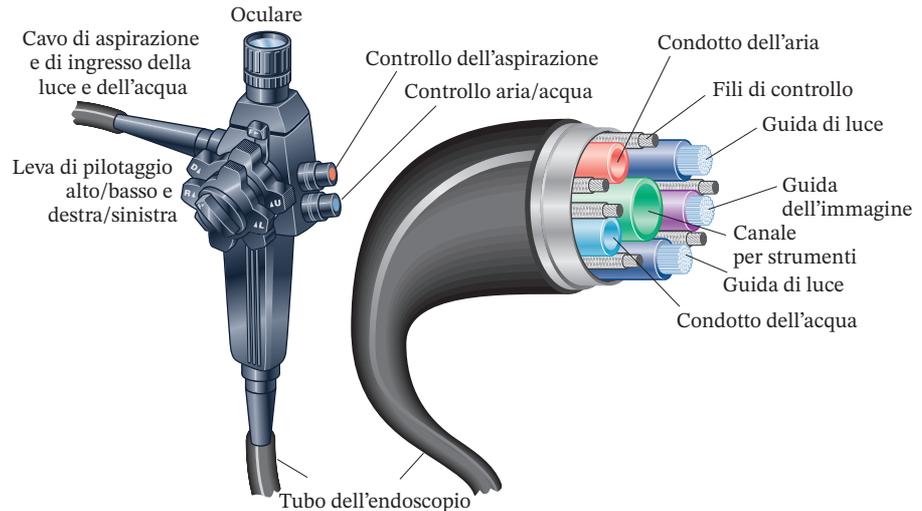


Figura 21.21 Una fibra ottica.

Figura 21.22

Un endoscopio.
L'artroscopio è simile a un endoscopio, ma è usato nella diagnosi e nel trattamento chirurgico delle malattie articolari.



ne può trasmettere al massimo una ventina. Più dell'80% delle chiamate telefoniche mondiali a lunga distanza sono effettuate tramite fibra ottica e anche le reti informatiche e le stazioni televisive stanno aumentando notevolmente l'uso della fibra ottica per le loro connessioni.

In medicina, i fasci di fibre ottiche sono la componente fondamentale degli endoscopi (Figura 21.22). Questi vengono inseriti nel corpo attraverso il naso, la bocca, il retto oppure attraverso una piccola incisione. Nell'endoscopio un fascio di fibre ottiche trasporta luce all'interno del corpo per poter illuminare l'organo, mentre un altro trasmette l'immagine sul monitor di osservazione dei medici.

L'endoscopio non si limita solo alla diagnosi ma, opportunamente adattato, permette ai medici di prelevare piccoli campioni di tessuto, effettuare piccoli interventi chirurgici, cauterizzare vasi sanguigni o aspirare residui. La chirurgia effettuata tramite endoscopio necessita di aperture chirurgiche molto più piccole rispetto alla chirurgia convenzionale e il ricovero dei pazienti è assai più breve.

Endoscopio**21.5 POLARIZZAZIONE PER RIFLESSIONE**

Nel Paragrafo 20.8 abbiamo visto che la luce può essere parzialmente o totalmente polarizzata per diffusione e riflessione (Figura 21.23a). Usando la legge di Snell possiamo trovare l'angolo d'incidenza per cui la luce riflessa risulta totalmente polarizzata. Questo angolo viene chiamato **angolo di Brewster** θ_B . La luce riflessa è completamente polarizzata *quando il raggio riflesso e quello trasmesso sono tra loro perpendicolari* (Figura 21.23b). Questi raggi sono perpendicolari se $\theta_B + \theta_t = 90^\circ$. Visto che i due angoli sono complementari, $\sin \theta_t = \cos \theta_B$. Allora:

$$n_i \sin \theta_B = n_t \sin \theta_t = n_t \cos \theta_B$$

$$\frac{\sin \theta_B}{\cos \theta_B} = \frac{n_t}{n_i} = \tan \theta_B$$

Angolo di Brewster: l'angolo d'incidenza per il quale la luce riflessa è totalmente polarizzata.

Angolo di Brewster

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_t}{n_i} \quad (21-6)$$

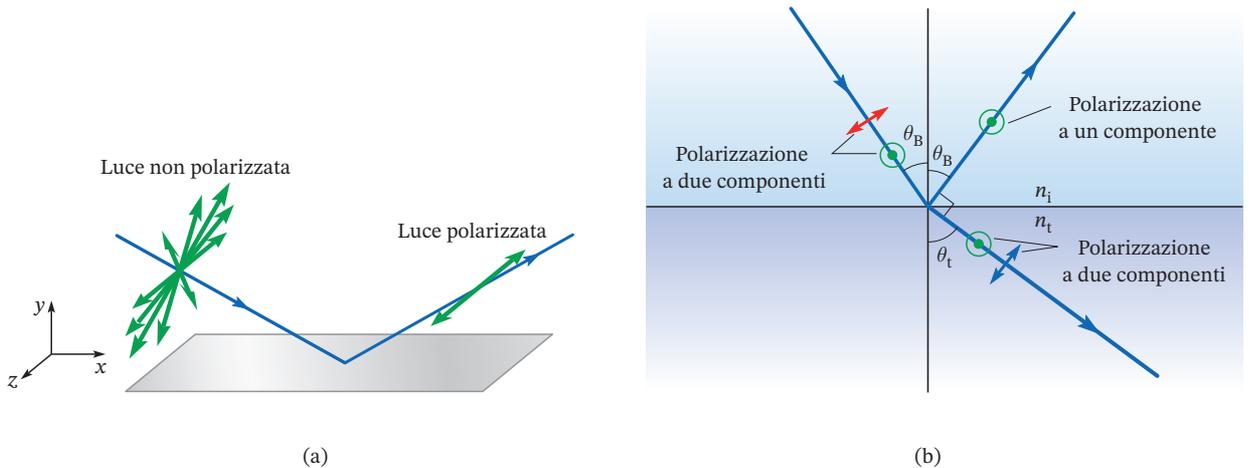


Figura 21.23 (a) La luce non polarizzata è parzialmente o totalmente polarizzata dalla riflessione. (b) Quando la luce incide con l'angolo di Brewster i raggi riflessi e trasmessi sono perpendicolari e la luce riflessa è totalmente polarizzata. La direzione di polarizzazione è perpendicolare al piano della pagina. [Le direzioni di polarizzazione sono mostrate in (b) con colori diversi per aiutarci a distinguerle: la componente della polarizzazione riportata in verde ha direzione perpendicolare al piano della pagina, le componenti indicate in rosso e in blu hanno direzione parallela al piano della pagina, ma hanno orientazioni differenti; questi colori non hanno niente a che fare con il colore della luce.]

Il valore dell'angolo di Brewster dipende dagli indici di rifrazione dei due mezzi. Diversamente dall'angolo critico per la riflessione totale, l'angolo di Brewster esiste indipendentemente dal valore relativo dei due indici di rifrazione.

Perché la luce riflessa è totalmente polarizzata quando i raggi riflesso e trasmesso sono perpendicolari? In Figura 21.23 un fascio di luce non polarizzato è rappresentato come un misto di due componenti di polarizzazioni tra loro perpendicolari: una perpendicolare al piano d'incidenza e l'altra nel piano d'incidenza. Si noti che le componenti di polarizzazione nel piano d'incidenza, rappresentate dalle frecce rosse e blu, non hanno la stessa direzione; le componenti di polarizzazione devono essere perpendicolari al raggio perché la luce è un'onda trasversale.

Le cariche oscillanti sulla superficie del secondo mezzo irradiano sia la luce riflessa sia la luce trasmessa. Le oscillazioni sono lungo le direzioni blu e verde. La direzione di oscillazione blu non contribuisce alla produzione del raggio riflesso perché una carica oscillante non irradia lungo il suo asse di oscillazione. Quando la luce incide con un angolo pari a quello di Brewster, *la luce riflessa è completamente polarizzata perpendicolarmente al piano d'incidenza*. Ad altri angoli d'incidenza la luce riflessa è *parzialmente* polarizzata, sempre perpendicolarmente al piano d'incidenza. Se un fascio di luce polarizzata nel piano d'incidenza colpisce una superficie riflettente con l'angolo di Brewster, non avviene il fenomeno della riflessione perché la luce incidente non ha componente di polarizzazione perpendicolare al piano d'incidenza.

✓ Mettiti alla prova 21.5

Gli occhiali da sole con lenti polarizzate sono molto utili per eliminare la luce riflessa da superfici orizzontali (come la superficie del mare o della neve e la carrozzeria delle automobili). In quale direzione (orizzontale o verticale) deve essere orientato l'asse di trasmissione delle lenti? Prova a spiegare.

21.6 FORMAZIONE DELLE IMMAGINI ATTRAVERSO LA RIFLESSIONE O LA RIFRAZIONE

Quando ti guardi allo specchio vedi l'immagine di te stesso. Ma cosa intendiamo per *immagine*? È come se ci fosse un gemello identico a te stesso che sta in piedi dietro allo specchio. Se tu guardassi un vero gemello ciascun punto del tuo gemello diffonderebbe luce in molte direzioni e una parte di questa luce entrerebbe nei tuoi occhi. In sostanza, i tuoi occhi raccolgono i raggi divergenti che si diffondono da un dato punto e in qualche modo ricostruiscono il loro punto di partenza. Il tuo cervello interpreta la luce riflessa dallo specchio nello stesso modo: tutti i raggi di luce riflessi verso di te dell'oggetto, la cui immagine si sta formando, provengono dallo specchio, ma il sistema occhio-cervello li ricostruisce *come se provenissero da un singolo punto che sta dietro allo specchio*.

● Un'immagine è *reale* se i raggi di luce provenienti da un punto dell'oggetto convergono sul punto corrispondente dell'immagine. Un'immagine è *virtuale* se i raggi di luce provenienti da un punto dell'oggetto assumono una direzione divergente dai punti dell'immagine.

In ottica geometrica ci troveremo a lavorare con due tipi d'immagine: l'immagine virtuale e l'immagine reale. Per la costruzione di un'**immagine virtuale** dobbiamo tracciare i raggi di luce che provengono da un punto dell'oggetto fino al punto dal quale sembrano provenire, anche se, in realtà, i raggi non partono effettivamente da quel punto. Per esempio, nel caso dello specchio piano considerato in precedenza, i raggi di luce sembrano provenire da un punto che si trova dietro allo specchio, un punto da dove in realtà non arriva nessun raggio di luce: questo è il classico esempio d'immagine virtuale. Nella costruzione geometrica di un'**immagine reale**, i raggi di luce passano realmente attraverso i punti dell'immagine. Nella macchina fotografica, la pellicola viene impressionata dall'immagine reale dell'oggetto. Come vedremo più avanti, per avere una buona immagine fotografica è necessario che i raggi che partono da un punto sull'oggetto raggiungano lo stesso punto sulla pellicola, altrimenti l'immagine risulterebbe sfuocata. Inoltre, se la pellicola e il dorso della macchina fotografica non si trovassero esattamente nel punto di convergenza, alcuni raggi di luce attraverserebbero il piano dell'immagine e divergerebbero nuovamente (Figura 21.24). Un'immagine, per essere proiettata sulla superficie di un rivelatore come la pellicola fotografica o un rivelatore della fotocamera del telefonino, oppure su uno schermo di presentazione o sulla stessa retina dell'occhio, deve essere reale!

Per vedere un'immagine reale è necessario proiettarla su uno schermo. Come spiegato più avanti, le immagini reali possono essere viste direttamente se vengono trasformate in immagini virtuali con l'ausilio di specchi o di lenti.

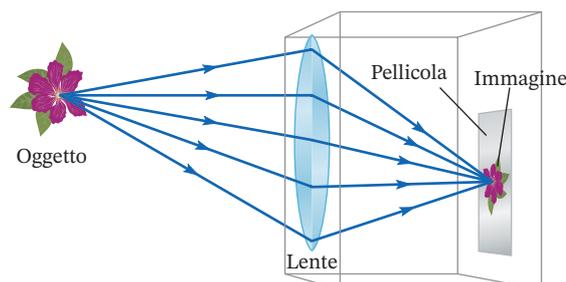


Costruire un'immagine con lo schema dei raggi

- Disegna due (o più) raggi emergenti da un singolo punto dell'oggetto che incidono su una lente o qualche dispositivo ottico in grado di formare un'immagine. (Sono sufficienti solo due raggi poiché tutti quelli

Figura 21.24

Formazione di un'immagine reale in una fotocamera. Se la pellicola (e il dorso della macchina) non ci fossero, i raggi continuerebbero la loro corsa divergendo dal piano dell'immagine.



emessi all'interno del loro angolo di uscita finiscono sullo stesso punto dell'immagine.)

- Traccia i raggi applicando, a seconda dei casi, le leggi della riflessione o della rifrazione finché questi non raggiungono l'osservatore.
- Prolunga il percorso dei raggi con percorsi rettilinei fino a intersecare il piano dell'immagine.
- Se i raggi di luce in uscita dall'oggetto passano effettivamente per il piano dell'immagine allora l'immagine è reale; se i raggi in uscita divergono, e si intersecano i raggi estrapolati nel verso opposto, allora l'immagine è virtuale.
- Per individuare il piano dell'immagine di un oggetto esteso costruisci le immagini di almeno due punti dell'oggetto.

Esempio 21.4

Un martin pescatore sta cercando una preda

Un piccolo pesce si trova a una profondità d sotto la superficie di uno stagno tranquillo. Qual è la profondità *apparente* del pesce visto da un martin pescatore? (Il martin pescatore è un uccello che si alimenta di pesci e si tuffa sott'acqua per catturare le sue prede.) Assumi che il martin pescatore si trovi perpendicolarmente sopra al pesce. Usa per l'esercizio un indice di rifrazione per l'acqua pari a $n = \frac{4}{3}$.

Impostazione La profondità apparente è la *profondità dell'immagine del pesce*. I raggi di luce che partono dal pesce quando arrivano sulla superficie dello stagno passano nell'aria e vengono rifratti. Scegliamo un punto sul pesce e tracciamo i raggi che partono da questo punto e arrivano nell'aria; ora prendiamo i raggi rifratti e li prolunghiamo all'indietro finché non si intersecano: il punto d'intersezione è un punto dell'immagine del pesce. Il martin pescatore che sta perpendicolarmente sopra il pesce non vede solo un raggio (quello diretto a lui $\theta_i = 0$) ma vede tutti quelli che stanno in un piccolo angolo (diverso da zero) d'incidenza legato alle dimensioni dell'occhio dell'uccello.

Soluzione Nella Figura 21.25a il pesce sta a una profondità d . Da un punto del pesce i raggi divergono verso la superficie. Sulla superficie essi si allontanano dalla normale poiché l'aria ha un indice di rifrazione inferiore di quello dell'acqua. Il punto immagine si trova nel punto d'incontro dei prolungamenti all'indietro dei raggi rifratti (linee tratteggiate in figura).

Per trovare l'immagine bastano solamente due raggi. Per semplificare la matematica uno dei due può essere il raggio normale alla superficie. L'altro raggio avrà un angolo d'incidenza con la superficie pari a θ_i .

Questo raggio lascia la superficie dello stagno con un angolo θ_t , dove

$$n_w \sin \theta_i = n_a \sin \theta_t \quad (1)$$

Per trovare d' usiamo i due triangoli rettangoli di Figura 21.25b che hanno in comune lo stesso lato s – la distanza tra i punti dove i due raggi intersecano la superficie dell'acqua. Gli angoli θ_i e θ_t sono noti perché sono angoli alterni interni con gli angoli alla superficie. Da questi triangoli e sulla base delle funzioni trigonometriche si ottiene:

$$\tan \theta_i = \frac{s}{d} \quad \text{e} \quad \tan \theta_t = \frac{s}{d'}$$

Poiché gli angoli in gioco sono piccoli, possiamo usare l'approssimazione $\tan \theta \approx \sin \theta$. Allora l'equazione (1) diventa:

$$n_w \frac{s}{d} = n_a \frac{s}{d'}$$

Eliminando s , risolviamo per ottenere il rapporto d'/d :

$$\frac{\text{profondità apparente}}{\text{profondità reale}} = \frac{d'}{d} = \frac{n_a}{n_w} = \frac{3}{4}$$

La profondità apparente del pesce è $\frac{3}{4}$ della profondità reale.

Discussione Il risultato è valido solo per piccoli angoli d'incidenza – cioè, per un osservatore che stia perpendicolare sopra al pesce. Infatti, la profondità apparente dipende dall'angolo sotto cui il pesce viene guardato.

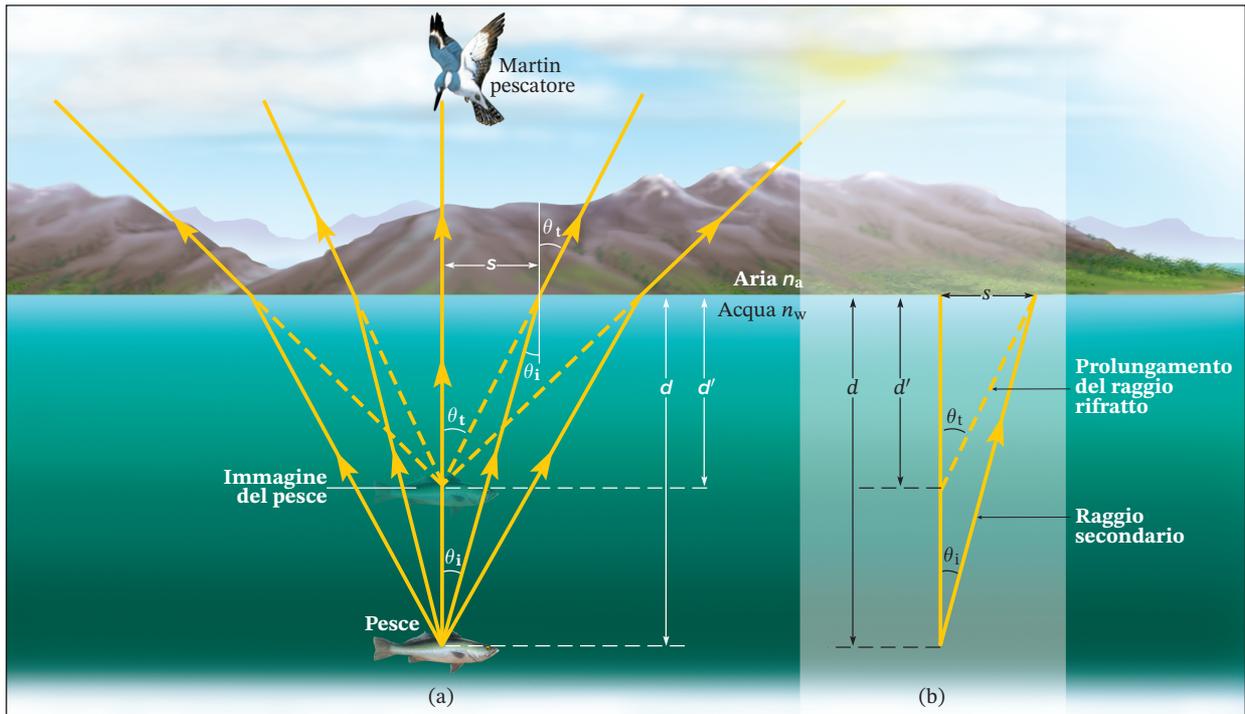


Figura 21.25

(a) Formazione dell'immagine di un pesce. (b) I due triangoli rettangoli che hanno in comune il lato s permettono di trovare la profondità dell'immagine d' in funzione della profondità del pesce d .

Problema di verifica 21.4 Evitare il predatore

Supponiamo che il pesce guardi in alto e veda il martin pescatore. Se l'uccello si trova a un'altezza h sopra

la superficie dello stagno, qual è l'altezza apparente h' vista dal pesce?

Mettiti alla prova 21.6

Nella Figura 21.25, l'immagine del pesce è reale o virtuale? Prova a spiegare.

21.7 SPECCHI PIANI

Una superficie metallica ben levigata è un buon sistema per riflettere la luce. Infatti un comune specchio è costituito da un vetro con uno strato metallico argentato depositato sul retro. Uno specchio argentato in realtà produce due riflessioni: una debolissima, osservata raramente e determinata dalla superficie del vetro e una più intensa, causata proprio dallo strato metallico. Gli specchi argentati sono utilizzati nei lavori di precisione poiché producono praticamente una sola riflessione. Se ignoriamo la debole riflessione del vetro, gli specchi comuni che utilizzano come superficie riflettente uno strato di alluminio hanno lo stesso comportamento di quelli con la superficie argentata.

Il comportamento degli specchi può essere descritto dalle leggi della riflessione discusse nel Paragrafo 21.2. La Figura 21.26a mostra una sorgente di luce

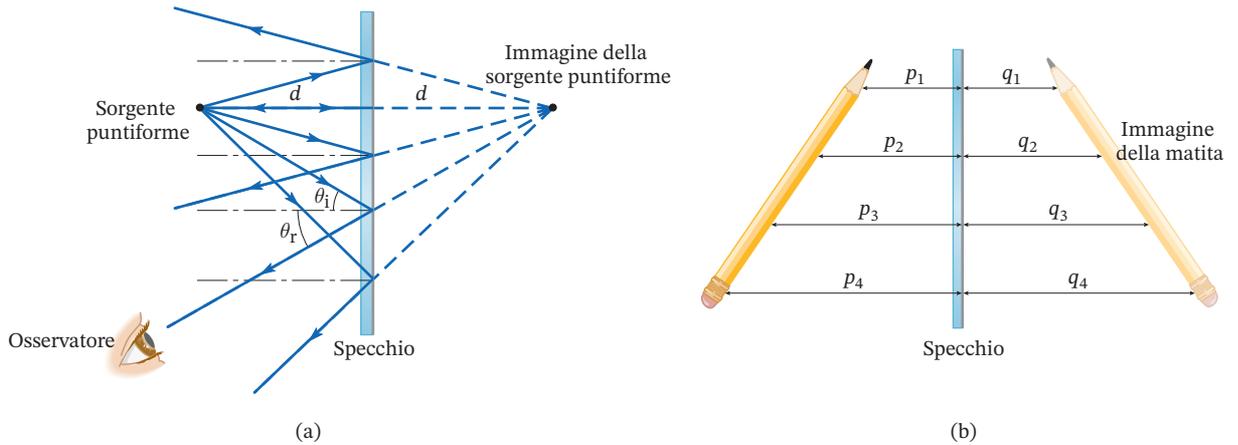


Figura 21.26 (a) Uno specchio piano forma l'immagine di una sorgente puntiforme. La sorgente e l'immagine sono equidistanti dallo specchio e giacciono sulla stessa linea normale allo specchio. (b) Immagine di una penna davanti a uno specchio piano.

puntiforme davanti a uno specchio piano e un osservatore che guarda lo specchio. Si noti che i raggi riflessi divergono, ma se vengono prolungati in verso opposto dentro allo specchio essi si intersecano tutti in uno stesso punto, che altro non è che l'immagine (virtuale) della sorgente puntiforme. Usando due qualsiasi raggi riflessi e un po' di geometria si può dimostrare che (vedi anche Problema 40):

Per uno specchio piano, una sorgente puntiforme e la sua immagine si trovano alla stessa distanza dallo specchio (ovviamente da parti opposte); entrambe giacciono sulla stessa linea normale allo specchio.

Come detto in precedenza, si noti che i raggi *sembrano* partire dall'immagine che si trova dietro lo specchio ma nessun raggio passa oltre lo specchio.

Un oggetto esteso di fronte a uno specchio piano può essere trattato come una serie di sorgenti puntiformi (i punti della superficie dell'oggetto). In Figura 21.26b è rappresentata una penna davanti a uno specchio. Per disegnare l'immagine, per prima cosa bisogna riportare le normali allo specchio a partire da alcuni punti della penna. Poi ciascun punto dell'immagine viene riportato a una distanza all'interno dello specchio uguale alla sua distanza dallo specchio stesso.

Esempio 21.5

Altezza di uno specchio per potersi specchiare completamente, dalla testa ai piedi

Grant sta portando sulle spalle sua nipote Dana (Figura 21.27). Qual è la lunghezza verticale minima dello specchio piano nel quale Grant può vedere un'intera immagine (dai suoi piedi alla testa di Dana)? Come deve essere posizionato sulla parete lo specchio di minima lunghezza?

Impostazione I diagrammi dei raggi sono essenziali in ottica geometrica. Il diagramma dei raggi è più utile se si individuano attentamente quelli più importanti per la soluzione. Qui, noi vogliamo essere

sicuri che Grant possa vedere le immagini di due particolari: i suoi piedi e l'estremità superiore della testa di Dana. Se Grant può vedere questi due punti allora può vedere anche tutto quello che è compreso tra essi. Affinché Grant possa vedere l'immagine di un determinato punto, da quel punto deve partire un raggio di luce che dopo essersi riflesso sullo specchio deve entrare nei suoi occhi.

Soluzione e discussione Dopo aver disegnato Grant, Dana e lo specchio (Figura 21.27), vogliamo

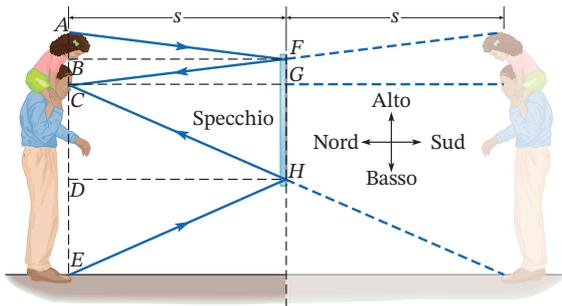


Figura 21.27
Esempio 21.5

disegnare un raggio che parte dai piedi di Grant, che colpisce lo specchio e che sia riflesso verso i suoi occhi. La linea DH è una normale alla superficie dello specchio. Poiché l'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di riflessione, i triangoli CHD e EHD sono congruenti e $CD = DE = GH$. Dunque:

$$GH = \frac{1}{2}CE$$

Allo stesso modo disegniamo il raggio che parte dall'estremità superiore della testa di Dana, arriva allo specchio ed è riflesso negli occhi di Grant. Troviamo che:

$$FG = \frac{1}{2}C$$

La lunghezza dello specchio è:

$$FH = FG + GH = \frac{1}{2}(AC + CE) = \frac{1}{2}AE$$

Dunque l'altezza dello specchio deve essere pari alla metà della distanza che c'è tra i piedi di Grant e la testa di Dana.

La lunghezza minima dello specchio permette una visione completa solamente se lo specchio è collocato alla giusta altezza. La parte alta dello specchio (F) deve trovarsi a una distanza AB sotto la testa di Dana. Non è necessario avere uno specchio alto come sé stessi per vedersi completamente; infatti il lato inferiore dello specchio deve stare a metà altezza tra il pavimento e gli occhi di chi si deve specchiare. Si noti che la distanza s tra Grant e lo specchio non influenza il risultato; vale a dire che, indipendentemente dall'essere più vicini o lontani dallo specchio, si ha bisogno sempre di uno specchio della stessa altezza.

Problema di verifica 21.5 Due sorelle e uno specchio

Gli occhi di Sara si trovano a 1.72 m dal pavimento quando lei indossa le scarpe, mentre la parte più alta della sua testa si trova a 1.84 m dal pavimento. Sara ha uno specchio che è lungo 0.92 m ed è appeso alla parete in modo tale da riuscire a vedersi completamente allo specchio. Si supponga che la sorella di Sara, Michela, sia alta 1.62 m e che i suoi occhi si trovino a 1.52 m sopra il pavimento. Se Michela usa lo specchio di Sara senza muoverlo, può vedere una immagine completa di se stessa? Disegnare uno schema dei raggi e illustrarlo.

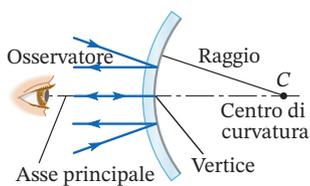


Figura 21.28 Il centro di curvatura di uno specchio convesso si trova dietro lo specchio. La linea tratteggiata indica l'asse principale dello specchio.

21.8 SPECCHI SFERICI

Specchio sferico convesso

In uno specchio sferico la superficie riflettente è una calotta di una sfera. In uno **specchio convesso** il centro di curvatura si trova *dietro* allo specchio (Figura 21.28). Il prolungamento del raggio che parte dal centro di curvatura e che passa per il **vertice** dello specchio (centro della superficie dello specchio) è chiamato **asse principale** dello specchio.

La Figura 21.29a illustra la determinazione del punto focale. Si consideri un raggio parallelo all'asse principale che incide sulla superficie dello specchio convesso nel punto A non molto lontano dal vertice dello specchio V . (Nel disegno, la distanza tra i punti A e V è stata volutamente aumentata per maggiore chiarezza.) Una linea che parte dal centro di curvatura e passa per il punto A è normale allo specchio ovvero alla tangente allo specchio nel punto A . Visto che per le leggi della riflessione l'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di riflessione, avremo che $\theta_i = \theta_r = \theta$.

Considerando la geometria del sistema, risulta che l'angolo in C e i due angoli in A devono essere uguali (e uguali a θ). Di conseguenza, il triangolo AFC è isoscele (ha due angoli uguali); dunque:

$$\overline{AF} = \overline{FC}$$

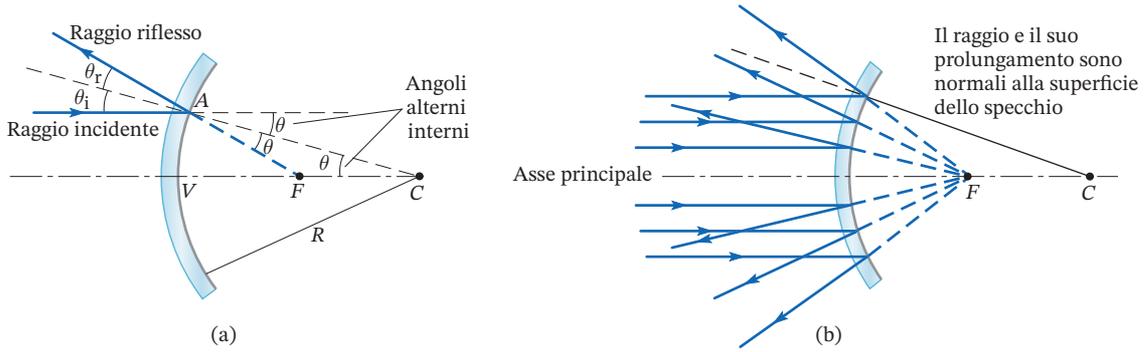


Figura 21.29 (a) Posizione del punto focale (F) di uno specchio convesso. (b) I raggi paralleli all’asse principale riflessi da uno specchio convesso *sembrano provenire* dal punto focale.

Poiché il raggio incidente è vicino all’asse principale, θ è piccolo. Di conseguenza:

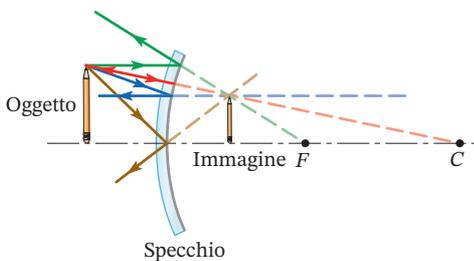
$$\overline{AF} + \overline{FC} \approx R \quad \text{e} \quad \overline{VF} \approx \overline{AF} \approx \frac{1}{2}R$$

dove $\overline{AC} = \overline{VC} = R$ è il raggio di curvatura dello specchio. Si noti che questa deduzione è vera per *qualsiasi angolo θ a patto che l’angolo sia sufficientemente piccolo*. Dunque, tutti i raggi paralleli all’asse che *sono incidenti vicino al vertice* sono riflessi dallo specchio convesso in modo tale che i loro prolungamenti dietro allo specchio passino per il punto F , che è anche chiamato **punto focale** dello specchio (Figura 21.29b). Uno specchio convesso è anche chiamato **specchio divergente** perché, se viene investito da un fascio di luce parallela, dopo la riflessione si otterrà un fascio di luce divergente.

● La notazione \overline{AF} indica la lunghezza del segmento di estremi A e F .

Il punto focale di uno specchio convesso si trova sull’asse principale dello specchio a una distanza $\frac{1}{2}R$ dal vertice dello specchio.

Per costruire l’immagine di un oggetto posizionato di fronte a uno specchio convesso, è necessario fare una semplice costruzione disegnando qualche raggio. La Figura 21.30 mostra una matita posizionata davanti a uno specchio convesso. Facciamo partire quattro raggi dalla punta della matita verso la superficie dello specchio. Un raggio (in verde) è parallelo all’asse principale ed è riflesso come se uscisse dal punto focale. Un altro raggio (rosso) è diretto verso il centro di curvatura C ; esso si riflette su se stesso poiché l’angolo d’incidenza è nullo. Un terzo raggio (blu) è diretto verso il punto focale F e viene riflesso parallelamente all’asse principale dello specchio. Perché avviene questo? Il motivo è legato al fatto che



Raggi principali per specchi convessi

1. Un raggio parallelo all’asse principale viene riflesso come se provenisse dal punto focale.
2. Un raggio diretto verso il centro di curvatura viene riflesso all’indietro su se stesso.
3. Un raggio diretto verso il punto focale viene riflesso parallelamente all’asse principale.
4. Un raggio incidente sul vertice dello specchio si riflette a un angolo uguale rispetto all’asse principale.

Figura 21.30 Usiamo i raggi principali per localizzare l’immagine virtuale formata da uno specchio convesso. I raggi sono disegnati con diversi colori per distinguerli meglio.



© Todd Griststein/Getty Images

Figura 21.31 Uno specchio convesso permette di avere una visuale molto più ampia di quella che si avrebbe con uno specchio piano.



la legge della riflessione è reversibile: possiamo invertire il verso del raggio e la legge di riflessione continua a essere valida. Un quarto raggio (marrone) incidente nel vertice dello specchio si riflette con un angolo uguale a quello d'incidenza (perché l'asse principale è normale allo specchio).

Se i quattro raggi riflessi vengono prolungati al di là dello specchio, si trova che si incontrano in un punto – si noti che se fossimo stati in grado di tracciare il percorso di tutti i raggi che dalla punta della matita si dirigono verso lo specchio ci saremmo accorti che tutti i loro prolungamenti sarebbero passati per lo stesso punto d'incontro dei quattro raggi colorati. Questa è la posizione in cui si forma l'immagine della punta della matita. L'altra estremità dell'immagine della matita giace sull'asse principale perché anche l'estremità della matita si trova sull'asse principale; i raggi lungo l'asse principale sono raggi radiali e quando raggiungono la superficie dello specchio si riflettono su sé stessi. Analizzando il diagramma dei raggi possiamo osservare che l'immagine della matita ottenuta è *virtuale*, la matita appare verticale, più piccola e più vicina allo specchio dell'oggetto stesso. Si noti che l'immagine non è nel punto focale; infatti, i raggi che escono dai punti dell'oggetto non sono paralleli all'asse principale. Se l'oggetto fosse molto lontano dallo specchio, allora tutti i raggi dell'oggetto colpirebbero lo specchio quasi paralleli uno all'altro e l'immagine si formerebbe sul **piano focale** dello specchio, cioè il piano perpendicolare all'asse principale che passa per il punto focale.

I quattro raggi che abbiamo scelto di disegnare sono chiamati **raggi principali** perché sono più facili da disegnare. Anche se per individuare l'immagine possono bastare solo due raggi principali, è saggio disegnarne un terzo per fare la verifica della costruzione ottenuta.

Specchio convesso permette di vedere un'area maggiore rispetto a uno specchio piano delle stesse dimensioni (Figura 21.31). Qualche volta gli specchi convessi sono usati nei negozi per permettere ai commessi di prevenire furti. Lo specchietto del lato passeggero in molte auto è convesso per permettere al guidatore di avere una visione posteriore più ampia.

Specchio sferico concavo

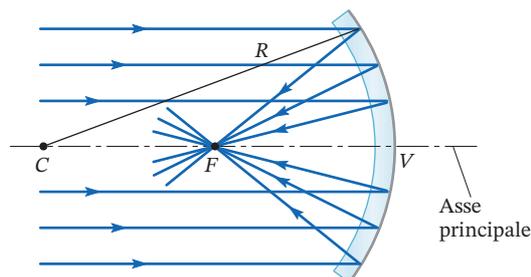
La superficie sferica di uno **specchio concavo** ha il centro di curvatura *davanti* allo specchio (Figura 21.32). Lo specchio concavo è chiamato anche **specchio convergente** perché fa convergere in un punto un fascio di luce parallela che lo investe. Si può dimostrare anche in questo caso (vedi Problema 44) che, nell'ipotesi di piccoli angoli d'incidenza, raggi paralleli all'asse principale convergono nel punto focale F , che si trova a una distanza $R/2$ dal vertice dello specchio.

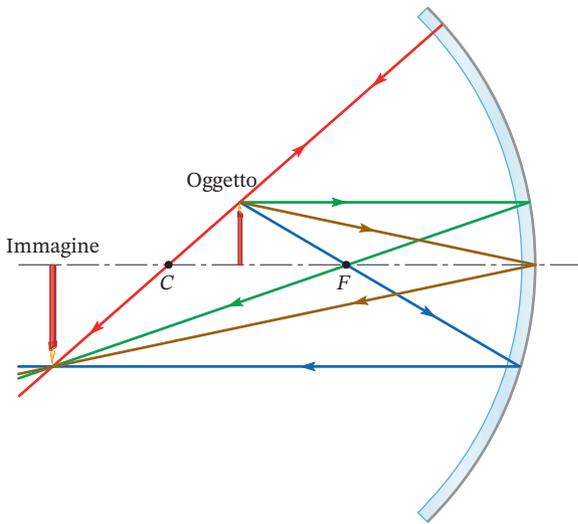
Questa volta l'immagine dell'oggetto si forma davanti allo specchio e, come per gli specchi convessi, la sua posizione può essere individuata disegnando due o più raggi. Anche in questo caso conviene utilizzare quattro raggi principali (quelli più facili da disegnare) e considerare percorsi simili a quelli dello specchio convesso, con l'unica differenza che questa volta il punto focale si trova davanti allo specchio.

La Figura 21.33 mostra l'uso dei raggi principali per trovare l'immagine di una matita posizionata di fronte a uno specchio concavo, in una posizione che

Figura 21.32

Riflessione di raggi paralleli all'asse principale di uno specchio concavo. Il punto C è il centro di curvatura dello specchio e F è il punto focale. Entrambi i punti si trovano davanti allo specchio.





Raggi principali per specchi concavi

1. Un raggio parallelo all'asse principale viene riflesso in modo da dirigersi verso il punto focale.
2. Un raggio diretto lungo la direzione del raggio dello specchio concavo viene riflesso all'indietro su se stesso.
3. Un raggio diretto verso il punto focale viene riflesso parallelamente all'asse principale.
4. Un raggio incidente sul vertice dello specchio si riflette a un angolo uguale rispetto all'asse principale.

Figura 21.33 Un oggetto posizionato tra il punto focale e il centro di curvatura di uno specchio concavo forma un'immagine reale, che risulta capovolta e più grande dell'oggetto. (Gli angoli e la curvatura dello specchio sono amplificati per maggiore chiarezza.)

sta tra il punto focale e il centro di curvatura. L'immagine che si ottiene è *reale* perché sta davanti allo specchio e perché i raggi passano effettivamente per l'immagine. Si noti però che uno specchio concavo può generare sia immagini reali che virtuali, ingrandite o rimpicciolite a seconda della posizione dell'oggetto rispetto al fuoco dello specchio.

Gli specchi utilizzati per radersi o per truccarsi sono concavi in modo tale da ottenere un'immagine del viso ingrandita. Per la stessa ragione anche i dentisti usano specchi concavi. Infatti, quando l'oggetto si trova tra il punto focale e lo specchio, si ottiene un'immagine *virtuale* e ingrandita dell'oggetto e con la stessa orientazione (non rovesciata) (Figura 21.34).

Nei fanali delle automobili il filamento delle lampadine è posizionato sul punto focale di uno specchio concavo: in questo modo il fascio di luce del fanale è praticamente parallelo.

 **Specchi per radersi o per truccarsi**

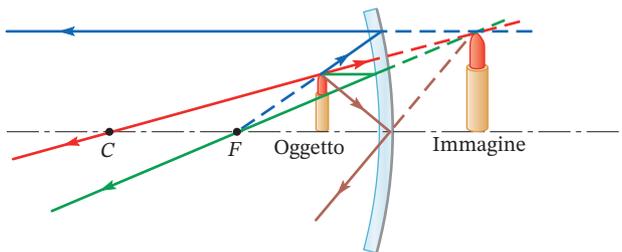


Figura 21.34 Formazione dell'immagine di un oggetto posto tra il punto focale e la superficie di uno specchio concavo. I colori utilizzati per i raggi hanno lo stesso significato delle figure precedenti.

Esempio 21.6

Disegno in scala per uno specchio concavo

Fai un disegno in scala che mostri un oggetto di 1.5 cm di altezza posizionato di fronte a uno specchio concavo avente raggio di curvatura di 8.0 cm. L'oggetto si trova a una distanza di 10.0 cm dal vertice dello specchio. Individua graficamente l'immagine, trova la sua posizione e stima la sua altezza.

Impostazione Per un disegno in scala è necessaria della carta millimetrata o quadrettata e si deve scegliere un opportuno fattore di scala. Disegnando due raggi principali riusciamo a costruire l'immagine, poi disegniamo un'altro asse principale per effettuare una verifica della costruzione. Lo specchio è concavo, per

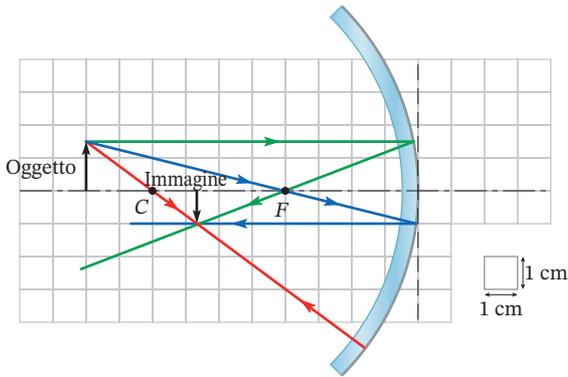


Figura 21.35

Esempio 21.6

cui sia il centro di curvatura che il punto focale stanno davanti allo specchio.

Soluzione Partiamo disegnando lo specchio e l'asse principale; poi segniamo il punto focale e il centro di curvatura rispettando la distanza reale dal vertice (naturalmente in scala) (Figura 21.35). Il raggio verde, parallelo all'asse principale, raggiunge lo specchio dall'estremità superiore dell'oggetto, viene riflesso e passa per il punto focale. Il raggio blu, sempre dal-

l'estremità superiore dell'oggetto, passa per il punto focale F e, quando viene riflesso, individua una linea parallela all'asse principale. L'intersezione dei due raggi individua l'estremità superiore dell'immagine. Grazie alla carta millimetrata, otteniamo che l'immagine si forma a 6.7 cm dallo specchio e ha un'altezza di 1.0 cm.

Discussione Per verificare la costruzione disegniamo il raggio rosso che dall'estremità superiore dell'oggetto passa per il centro di curvatura, colpisce perpendicolarmente la superficie dello specchio e ne viene riflesso all'indietro. Se il raggio interseca gli altri due raggi che individuano l'estremità superiore dell'immagine la costruzione è corretta!

Problema di verifica 21.6 Un'altra soluzione grafica

Tracciare un disegno in scala per localizzare l'immagine di un oggetto alto 1.5 cm che si trova davanti allo stesso specchio a 6.0 cm dal suo vertice. Individuare la posizione dell'immagine e stimarne l'altezza. È un'immagine virtuale o reale? (*Aiuto:* fare prima uno schizzo qualitativo.)

Ingrandimento

L'immagine di un oggetto formata da uno specchio (o da una lente, come vedremo più avanti) non ha generalmente le stesse dimensioni dell'oggetto stesso (e abbiamo visto che l'immagine può essere capovolta). L'**ingrandimento** m (chiamato anche ingrandimento lineare o trasverso) è il rapporto tra la dimensione dell'immagine e quella dell'oggetto:

$$|m| = \frac{\text{dimensione immagine}}{\text{dimensione oggetto}} \quad (21-7)$$

Se $|m| < 1$, l'immagine è più piccola dell'oggetto. Si noti che m ha un segno algebrico, che indica l'orientazione dell'immagine: se l'immagine è capovolta rispetto all'oggetto m è *negativo*, mentre se m è *positivo* l'immagine ha la stessa orientazione dell'oggetto.

Consideriamo lo specchio in Figura 21.36. Sia h l'altezza dell'oggetto e h' l'altezza dell'immagine. La definizione d'ingrandimento è:

$$m = \frac{h'}{h} \quad (21-8)$$

Usando la Figura 21.36 possiamo trovare la relazione che lega l'ingrandimento alla distanza p che separa l'oggetto dal vertice dello specchio e la distanza q che invece separa l'immagine dal vertice dello stesso specchio. Visto che i due triangoli rettangoli PAV e QBV sono simili, si ha:

$$\frac{h}{p} = \frac{-h'}{q}$$

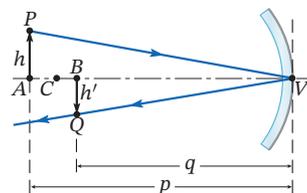


Figura 21.36

I triangoli rettangoli PAV e QBV sono simili, in quanto l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali.

Si noti il segno meno, dovuto al fatto che h è rivolto verso l'alto, quindi è positivo, mentre h' è rivolto verso il basso, quindi deve comparire con segno negativo. L'ingrandimento diventa:

Equazione dell'ingrandimento

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (21-9)$$

L'Equazione (21-9) non è valida solo per la geometria riportata in Figura 21.36, ma per qualsiasi geometria, ovvero continua a valere indipendentemente da dove l'oggetto è posizionato. Inoltre, l'equazione può essere applicata a qualsiasi specchio sferico, sia esso concavo o convesso (vedi Problema 47) e vale anche per gli specchi piani.

Mettilti alla prova 21.8

Uno specchio piano forma un'immagine dell'oggetto che vi si trova davanti. L'immagine che si forma è reale o virtuale? Quanto vale l'ingrandimento lineare?

Equazione degli specchi

La costruzione geometrica in Figura 21.37 permette di ricavare un'ulteriore relazione che lega la distanza dell'oggetto p , la distanza dell'immagine q e la **lunghezza focale** $f = \frac{1}{2}R$ (distanza tra il punto focale e il vertice dello specchio). I segmenti p , q e f sono misurati sull'asse principale a partire dal vertice V . I triangoli PAC e QBC sono simili, con $\overline{AC} = p - R$ e $\overline{BC} = R - q$, dove R è il raggio di curvatura. Allora:

$$\frac{\overline{PA}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{QB}}{\overline{BC}} \quad \text{o} \quad \frac{h}{p-R} = \frac{-h'}{R-q}$$

che può essere scritta nella forma:

$$\frac{h'}{h} = -\frac{R-q}{p-R}$$

Dato che h'/h è l'ingrandimento, si può scrivere:

$$\frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{R-q}{p-R} \quad (21-9)$$

Sostituendo $f = R/2$, moltiplicando e dividendo per p , q e f otteniamo l'**equazione degli specchi**.

Equazione degli specchi

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (21-10)$$

Le equazioni appena ricavate per lo specchio concavo possono essere applicate anche agli specchi convessi, a patto di usare le semplici convenzioni riportate in

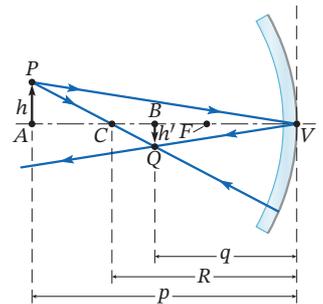


Figura 21.37 Triangoli simili PAC e QBC usati per ricavare l'equazione delle lenti.

Tabella 21.2 Convenzione sui segni per gli specchi

Quantità	Quando positivo (+)	Quando negativo (-)
Distanza oggetto p	Sempre*	Mai*
Distanza immagine q	Immagine reale	Immagine virtuale
Distanza focale f	Specchio convergente (concavo): $f = \frac{1}{2}R$	Specchio divergente (convesso): $f = -\frac{1}{2}R$
Ingrandimento m	Immagine non invertita	Immagine invertita

* Nel Capitolo 21 consideriamo solamente oggetti reali. Nel Capitolo 22 verranno discussi i sistemi a lenti multiple, nei quali gli oggetti *virtuali* sono possibili.

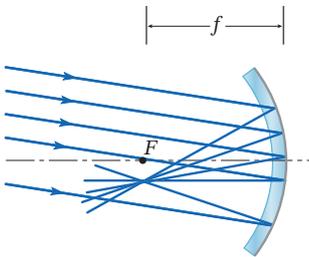


Figura 21.38 Un oggetto lontano che si trova sopra l'asse principale forma un'immagine a $q = f$.

Tabella 21.2 per i segni di q e f . Si noti che il segmento che identifica la posizione dell'immagine q è negativo quando l'immagine è dietro allo specchio e allo stesso modo f è negativo quando il punto focale è dietro allo specchio.

Le convenzioni adottate per i segni implicano che *le immagini reali di un oggetto sono sempre invertite* (se p e q sono positivi, m è negativo); *le immagini virtuali di un oggetto non sono mai invertite* (se p è positivo e q negativo, m è positivo). Un'immagine reale è sempre davanti allo specchio (dove passano veramente i raggi di luce); un'immagine virtuale è invece dietro allo specchio dove i raggi di luce non passano.

Se un oggetto è molto lontano dallo specchio ($p = \infty$), l'equazione degli specchi diventa $q = f$. I raggi che provengono da oggetti molto lontani sono all'incirca paralleli uno all'altro e dopo la riflessione da parte dello specchio convergono nel punto focale se lo specchio è concavo, oppure divergono dal punto focale se lo specchio è convesso. Se l'oggetto lontano non è sull'asse principale, l'immagine si forma sul piano focale, sotto o sopra il punto focale a seconda dei casi (Figura 21.38).

Esempio 21.7

Specchietto retrovisore del lato passeggero

Un oggetto è posizionato a 30.0 cm dallo specchietto retrovisore del lato passeggero. L'immagine formata è diritta e la sua dimensione è pari a $\frac{1}{3}$ di quella dell'oggetto. (a) L'immagine è reale o virtuale? (b) Qual è la lunghezza focale dello specchio? (c) Lo specchio è concavo oppure convesso?

Impostazione L'ingrandimento è il rapporto tra la dimensione dell'immagine e quella dell'oggetto, dunque $|m| = \frac{1}{3}$. Il segno dell'ingrandimento è positivo, infatti l'immagine ha la stessa orientazione dell'oggetto. Sapendo che $m = +\frac{1}{3}$ e che la distanza dell'oggetto è $p = 30.0$ cm possiamo ricavare q . Il segno di q ci dirà se l'immagine è reale o virtuale. L'equazione degli specchi può essere usata per trovare la lunghezza focale dello specchio e il segno della lunghezza focale ci dice se lo specchio è concavo o convesso.

Soluzione (a) L'ingrandimento è legato alle distanze dell'immagine p e dell'oggetto q dalla relazione:

$$m = -\frac{q}{p} \quad (21-9)$$

Risolvendo per la distanza dell'immagine q :

$$q = -mp = -\frac{1}{3} \times 30.0 \text{ cm} = -10.0 \text{ cm}$$

Poiché q è negativa, l'immagine è virtuale.

(b) Ora possiamo usare le equazioni degli specchi per trovare la lunghezza focale:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{q+p}{pq} \\ f &= \frac{pq}{q+p} \\ &= \frac{30.0 \text{ cm} \times (-10.0 \text{ cm})}{-10.0 \text{ cm} + 30.0 \text{ cm}} \\ &= -15.0 \text{ cm} \end{aligned}$$

(c) Poiché la lunghezza focale è negativa, lo specchio è convesso.

Discussione Come previsto, lo specchietto retrovisore del lato passeggero è convesso. Ora che conoscia-

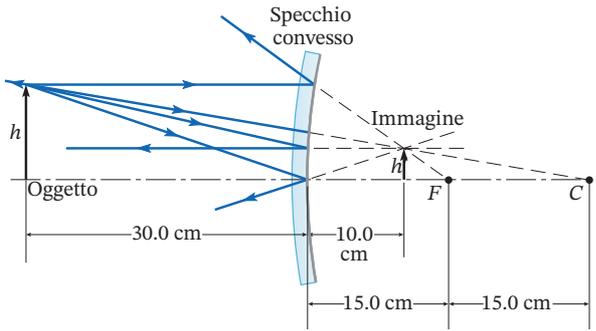


Figura 21.39
Diagramma dei raggi per uno specchio convesso (Esempio 21.7).

mo le distanze, con l'ausilio di carta millimetrata possiamo disegnare il diagramma dei raggi per verificare il risultato (Figura 21.39).

Problema di verifica 21.7 Specchio sferico di tipo sconosciuto

Un oggetto sta di fronte a uno specchio sferico; l'immagine dell'oggetto è diritta con una dimensione doppia di quella dell'oggetto e sembra provenire da un punto a 12 cm dietro lo specchio. Determinare quale è la distanza dell'oggetto, quale la lunghezza focale dello specchio e di quale tipo di specchio si tratta (concavo o convesso).

LA FISICA NEL QUOTIDIANO

Guarda ciascun lato di un cucchiaio di metallo *lucente*. (Un cucchiaio nuovo produce un'immagine migliore poiché, con l'uso, l'acciaio diventa opaco. Un cucchiaio d'argento ben pulito sarebbe l'ideale.) Un lato si comporta come uno specchio convesso, mentre l'altro come uno concavo. Per ciascun lato osserva se la tua immagine si inverte oppure no e se si ingrandisce o rimpicciolisce. Quale delle immagini è reale o virtuale? Quale lato fornisce una visuale maggiore? (In altre parole, quale lato ti permette di vedere una porzione maggiore della stanza?) Prova a tenere il cucchiaio a diverse distanze per vedere cosa succede. (Tieni presente che la lunghezza focale del cucchiaio è piccola. Se tieni il cucchiaio a una distanza dai tuoi occhi minore della lunghezza focale, non potrai avere una buona visione – i tuoi occhi non riescono a mettere a fuoco a queste piccole distanze. In sostanza, non è possibile posizionarsi abbastanza vicino al lato concavo per vedere un'immagine virtuale.)



21.9 LENTI SOTTILI

Le immagini prodotte dagli specchi si basano sul fenomeno della riflessione, mentre le immagini prodotte dalle lenti si basano sul fenomeno della rifrazione (Figure 21.40 e 21.41). Nelle lenti sferiche, ciascuna delle due superfici è una calotta sferica. L'asse principale di una lente passa attraverso i due centri di curvatura delle superfici delle lenti. Il centro ottico di una lente è un punto che si trova sull'asse principale e ha la caratteristica che i raggi che lo attraversano non vengono deviati (Figura 21.42).

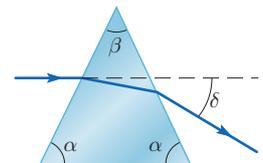


Figura 21.40 L'angolo di deviazione δ aumenta all'aumentare dell'angolo β tra le due facce. Quando β è piccolo, δ è proporzionale a β .

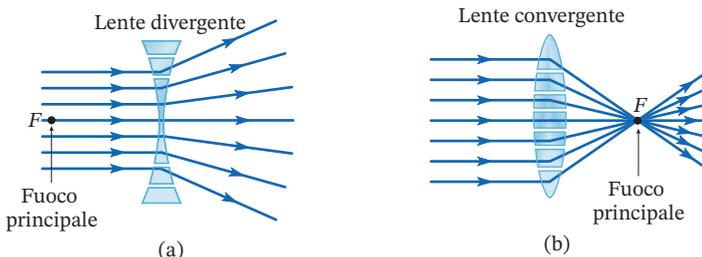


Figura 21.41 (a) e (b) Lenti composte da sezioni di prisma.

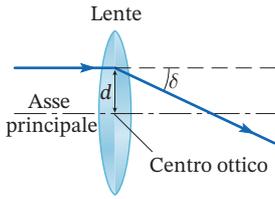


Figura 21.42 L'angolo di deviazione di un raggio parassiale che colpisce la lente a una distanza d dall'asse principale è proporzionale a d . Per semplificare il diagramma immaginiamo che il raggio parassiale sia deviato da una linea verticale passante per il centro ottico piuttosto che da ciascuna delle superfici della lente.

Possiamo capire il comportamento di una lente considerandola come un insieme di prismi (Figura 21.40). L'angolo di deviazione del raggio – l'angolo che il raggio uscente dal prisma forma con il raggio incidente – è proporzionale all'angolo tra le due facce del prisma (vedi Figura 21.41 e Problema 19). All'intersezione con l'asse principale, le due facce della lente sono praticamente parallele. Un raggio che colpisce la lente nel suo centro esce con la stessa direzione del raggio incidente (essendo $\beta = 0$, anche δ deve essere nullo). Se però il raggio non è perpendicolare alla lente, subisce uno *spostamento*, ovvero il raggio esce non percorrendo la stessa retta su cui si trova il raggio incidente, ma mantenendo una direzione parallela. Se le lenti sono *sottili* – lenti con spessore piccolo rispetto alla lunghezza focale – lo spostamento è trascurabile e il raggio passa praticamente attraverso il centro della lente senza subire deviazioni.

L'angolo β tra le facce dei piccoli prismi che immaginiamo comporgano la lente aumenta però gradualmente mano a mano che ci si allontana dal centro. Di conseguenza, anche l'angolo di deviazione del raggio aumenta a mano a mano che ci si allontana dal centro. Per semplificare un poco l'argomento, restringeremo le nostre considerazioni ai soli **raggi parassiali**: raggi che colpiscono la lente vicino all'asse principale. I raggi parassiali hanno la caratteristica di avere piccoli angoli d'incidenza e far lavorare la lente in una zona dove β è piccolo. Se dunque ci limitiamo a considerare il caso di lenti sottili e dei soli raggi parassiali, troviamo che quando un raggio incide su una lente a una distanza d dal suo centro viene deviato di un angolo δ proporzionale proprio alla distanza d (vedi Figura 21.42).

Le lenti possono essere suddivise in due categorie: **lenti divergenti** e **lenti convergenti** (vedi Figura 21.40). Una lente divergente devia i raggi di luce allontanandoli dall'asse principale, mentre una lente convergente devia i raggi di luce verso l'asse principale (Figura 21.43a). Se i raggi incidenti su una lente convergente sono molto divergenti, non è detto che la lente sia in grado di farli convergere, potrebbe solamente farli divergere un po' di meno (Figura 21.43b). Le lenti possono avere molte forme possibili (Figura 21.44) e le due superfici potrebbero anche avere differenti raggi di curvatura. Si noti che le lenti convergenti sono più spesse al centro, mentre quelle divergenti sono più sottili; in questa affermazione abbiamo dato per sottinteso che l'indice di rifrazione del materiale delle lenti sia maggiore di quello del mezzo esterno.



Figura 21.43 (a) Quando raggi divergenti colpiscono una lente convergente, la lente li devia verso l'interno. (b) Se i raggi divergono troppo rapidamente, la lente potrebbe non essere in grado di farli convergere. In questo caso i raggi, dopo la lente, saranno solo meno divergenti.

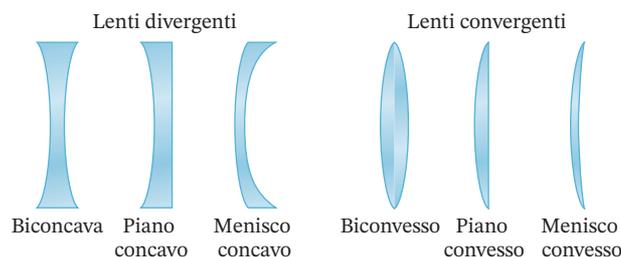
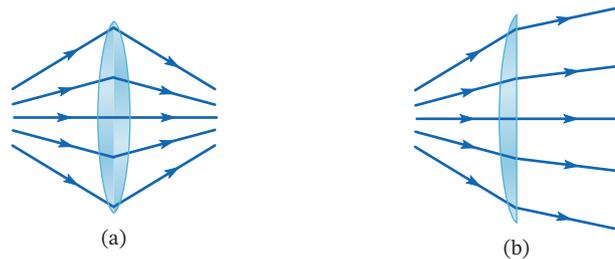


Figura 21.44 Alcune forme di lenti divergenti e convergenti.

Punti focali e raggi principali

Tutte le lenti hanno due punti focali e la distanza tra ciascuno di essi e il centro ottico della lente è chiamata **lunghezza focale**. La lunghezza focale di una lente a superfici sferiche dipende da quattro parametri: i due raggi di curvatura delle due superfici e i due indici di rifrazione, quello del materiale della lente e quello del mezzo in cui essa si trova (non necessariamente la lente è immersa in aria). Se un fascio di raggi paralleli all'asse principale colpisce la lente divergente, i raggi vengono rifratti dalla lente in direzioni tali da sembrare che provengano tutti dal **punto focale principale** posizionato *prima* della lente (vedi Figura 21.40a). Se invece la lente è convergente, allora i raggi, dopo la rifrazione, passano tutti dal punto focale principale posizionato *dopo* la lente (vedi Figura 21.40b).

Per individuare l'immagine formata da una lente sottile sono sufficienti due raggi ma, come per gli specchi, utilizzare anche un terzo raggio è un utile controllo. I raggi che si utilizzano, quelli più facili da disegnare sono chiamati **raggi principali** (Tabella 21.3). Il terzo raggio principale passa per il **punto focale secondario**, che è dalla parte opposta del punto focale principale. Nella Figura 21.45 viene illustrato come disegnare i raggi principali.

Mettilti alla prova 21.9

L'immagine formata da una lente convergente è sempre reale, sempre virtuale o secondo il caso può essere reale o virtuale? Prova a spiegare (come aiuto, fai riferimento alla Figura 21.43).

Tabella 21.3 Raggi principali e punti focali principali per le lenti sottili

	Lente convergente	Lente divergente
Raggio 1. Un raggio incidente parallelo all'asse principale	Passa attraverso il punto focale principale	Sembra provenire dal punto focale principale
Raggio 2. Un raggio incidente che passa attraverso il centro ottico	Passa senza essere deviato attraverso la lente	Passa senza essere deviato attraverso la lente
Raggio 3. Un raggio che esce parallelo all'asse principale	Sembra provenire dal punto focale secondario	Sembra essere diretto nel punto focale secondario
Localizzazione del punto focale principale	Dopo la lente	Prima della lente

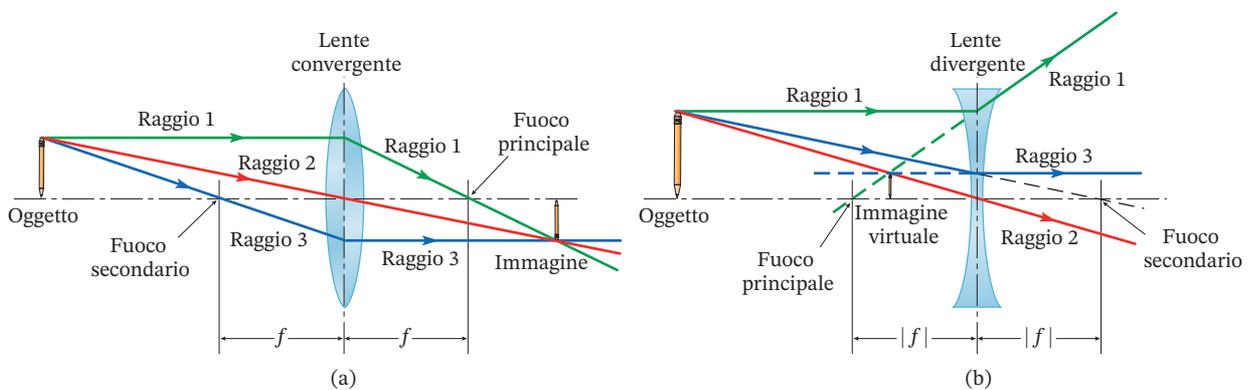


Figura 21.45 (a) Utilizzo dei tre raggi principali per l'individuazione dell'immagine *reale* di un oggetto attraverso una lente convergente. (b) Utilizzo dei tre raggi principali per l'individuazione dell'immagine *virtuale* di un oggetto attraverso una lente divergente.

Esempio 21.8

Orientazione delle immagini virtuali

Una lente forma un'immagine di un oggetto posizionato prima della lente stessa. Usando un diagramma dei raggi, dimostra che, se l'immagine è virtuale, allora potrebbe anche essere non invertita, indipendentemente dal fatto che la lente sia convergente o divergente.

Impostazione I raggi principali sono generalmente quelli più facili da disegnare. I raggi principali 1 e 3 si comportano diversamente per le lenti convergenti e per quelle divergenti. Il raggio 2, che passa per il centro delle lenti senza subire deviazione, si comporta allo stesso modo per entrambi i tipi di lenti.

Soluzione e discussione La Figura 21.46 mostra un oggetto a monte della lente (che potrebbe essere convergente o divergente). Il raggio principale 2, che parte dall'estremità superiore dell'oggetto, passa per il centro della lente e prosegue nella stessa direzione. Se proiettiamo all'indietro il raggio rifratto possiamo disegnare alcune possibili posizioni dell'immagine – con solo un raggio non possiamo conoscere l'effettiva posizione dell'immagine. Sappiamo che l'immagine virtuale non si trova dalla parte della lente da cui escono i raggi, ma piuttosto dalla parte dove si incontrano *le loro prolungamenti all'indietro*. In altre parole, la posizione di un'immagine virtuale sta sempre prima della lente (dallo stesso lato di provenienza dei

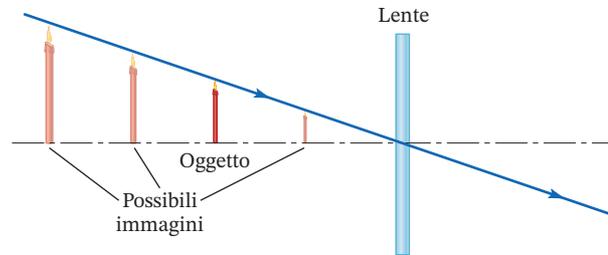


Figura 21.46

Il raggio principale che attraversa il centro della lente senza essere deviato mostra che le immagini virtuali di oggetti reali non sono capovolte.

raggi). L'immagine sta dunque dalla stessa parte dell'oggetto. Dalla Figura 21.46 vediamo che, come per gli specchi, l'immagine virtuale è diritta (non è capovolta).

Problema di verifica 21.8 Orientazione delle immagini reali

Una lente convergente forma un'immagine reale di un oggetto posizionato prima della lente. Usando il diagramma dei raggi, dimostrare che l'immagine è rovesciata.

Equazione dell'ingrandimento ed equazione delle lenti sottili

Possiamo ricavare l'equazione delle lenti sottili e l'equazione dell'ingrandimento dalla costruzione geometrica di Figura 21.47. Dai triangoli rettangoli simili EGC e DBC possiamo scrivere:

$$\tan \alpha = \frac{h}{p} = \frac{-h'}{q}$$

Come nel caso degli specchi, h' è una quantità che può essere positiva o negativa: nel caso in esame, poiché l'immagine è invertita, h' è negativa ed è la lunghezza (positiva) del lato BD . L'ingrandimento è dato da:

Equazione dell'ingrandimento

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (21-9)$$

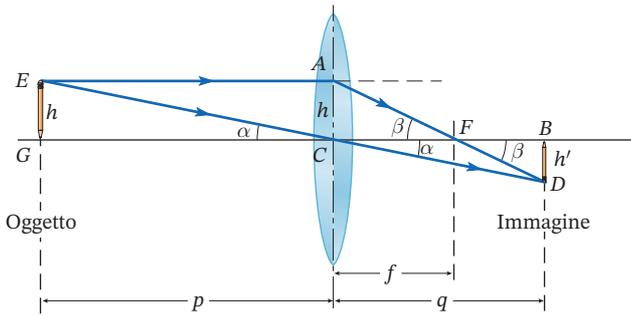


Figura 21.47

Diagramma di due raggi principali utilizzato per ricavare l'equazione delle lenti sottili e l'equazione dell'ingrandimento.

Consideriamo ora altri due triangoli rettangoli simili, ACF e DBF , e vediamo che:

$$\tan\beta = \frac{h}{f} = \frac{-h'}{q-f}$$

ovvero:

$$\frac{q-f}{f} = \frac{-h'}{h} = \frac{q}{p}$$

Dopo aver diviso per q e aver effettuato gli opportuni passaggi, otteniamo l'**equazione delle lenti sottili**.

Equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \tag{21-10}$$

Le equazioni appena ottenute sono identiche a quelle ricavate per gli specchi e possono essere applicate a tutti i casi – per qualsiasi tipo di lente e qualsiasi tipo di immagine – a patto che si assumano le stesse convenzioni per i segni dei parametri q e f (Tabella 21.4).

Tabella 21.4 Convenzione sui segni per specchi e lenti

Quantità	Quando positivo (+)	Quando negativo (–)
Distanza oggetto p	Sempre (per ora)	Mai (per ora)
Distanza immagine q	Immagine reale	Immagine virtuale
Distanza focale f	Lente convergente o specchio	Lente divergente o specchio
Ingrandimento m	Immagine non invertita	Immagine invertita

Esempio 21.9

Zoom di un obiettivo

Una margherita da campo da 1.2 cm di diametro dista 90.0 cm dalla lente di un obiettivo. La lunghezza focale della lente (obiettivo) è di 150 mm. (a) Trova la distanza tra la lente e la pellicola. (b) Quanto vale il diametro dell'immagine della margherita?

Impostazione Il problema può essere risolto usando le equazioni delle lenti e dell'ingrandimento. Per formare un'immagine reale sulla pellicola la lente deve essere *convergente*, quindi $f = 150$ mm. L'immagine si forma sulla pellicola, cosicché la distanza della lente dalla pellicola è q . Dopo aver fornito la soluzione algebrica, eseguiamo la verifica disegnando il diagramma dei raggi.

Dati: $h = 1.2 \text{ cm}$; $p = 90.0 \text{ cm}$; $f = +15 \text{ cm}$

Da trovare: q, h'

Soluzione (a) Poiché p e f sono noti, troviamo q dall'equazione delle lenti sottili:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

e risolvendo per q :

$$q = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p} \right)^{-1}$$

Sostituendo i valori numerici:

$$q = \left(\frac{1}{15.00 \text{ cm}} - \frac{1}{90.0 \text{ cm}} \right)^{-1} = +18.0 \text{ cm}$$

La pellicola si trova a 18.0 cm dalla lente.

(b) Dall'equazione dell'ingrandimento:

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} = -\frac{18.0 \text{ cm}}{90.0 \text{ cm}} = -0.200$$

$$h' = mh = -0.200 \times 1.2 \text{ cm} \\ = -0.24 \text{ cm}$$

L'immagine della margherita ha un diametro di 0.24 cm.

Discussione La Figura 21.48 mostra il diagramma dei tre raggi principali che confermano la soluzione algebrica.

Problema di verifica 21.9 Determinare la lunghezza focale di una lente

Un oggetto alto 3 cm è posizionato a 60.0 cm da una lente. L'immagine virtuale è alta 0.50 cm. Qual è la lunghezza focale della lente? È convergente o divergente?

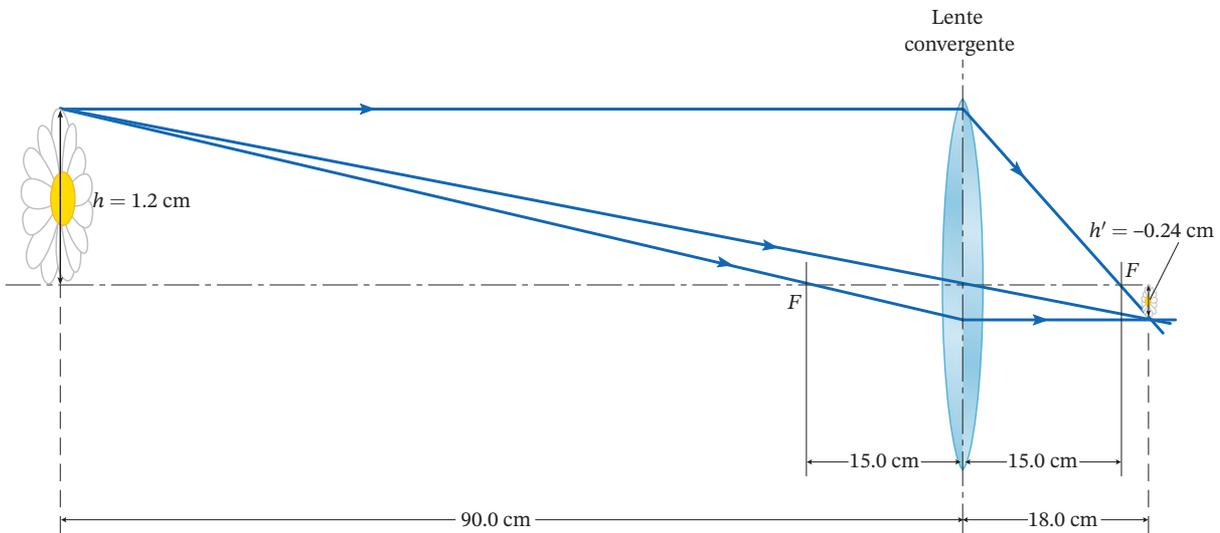


Figura 21.48

Diagramma dei raggi dell'Esempio 21.9.

Oggetti e immagini all'infinito

Se un oggetto si trova a una grande distanza da una lente (al limite all'infinito), allora $p = \infty$ che, inserito nell'equazione, fa sì che $q = f$. I raggi provenienti da un oggetto lontano sono praticamente paralleli e quando colpiscono una lente producono l'immagine sul **piano focale principale** (piano perpendicolare all'asse della lente e passante per il punto focale principale). Allo stesso modo, se un oggetto è posizionato nel piano focale principale di una lente convergente, allora $p = f$ e $q = \infty$. L'immagine si forma all'infinito – ossia, i raggi uscenti dalla lente sono paralleli e quindi producono l'immagine dell'oggetto all'infinito.

Riepilogo

- Un fronte d'onda è costituito da una serie di punti con uguale fase. Un raggio punta nella direzione di propagazione dell'onda ed è perpendicolare ai fronti d'onda. Il principio di Huygens è una costruzione geometrica utilizzata per analizzare la propagazione di un'onda. Ciascun punto del fronte d'onda è supposto essere una sorgente di onde elementari (secondarie) sferiche. Dopo un certo intervallo di tempo, una nuova superficie tangente a queste onde è il nuovo fronte d'onda.
- L'ottica geometrica si occupa della propagazione della luce quando gli effetti dell'interferenza e la diffrazione sono trascurabili. Lo strumento principale utilizzato in ottica geometrica è il diagramma dei raggi. Nell'interfaccia tra due mezzi la luce può essere riflessa o trasmessa. Le leggi della riflessione e della rifrazione danno le direzioni dei raggi trasmessi e riflessi. Nelle leggi della riflessione e della rifrazione si usano gli angoli che i raggi formano con la normale all'interfaccia.
- Leggi della riflessione:
 1. L'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di riflessione.
 2. Il raggio riflesso giace sullo stesso piano di quello incidente e della normale alla superficie nel punto d'incidenza.
- Leggi della rifrazione:
 1. $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$ (legge di Snell).
 2. Il raggio incidente, quello trasmesso e la normale alla superficie nel punto d'incidenza giacciono tutti sullo stesso piano – il piano d'incidenza.
 3. Il raggio incidente e quello trasmesso stanno da parti opposte rispetto alla normale.
- Quando un raggio proviene da un mezzo a più alto indice di rifrazione e incide sulla superficie di un mezzo con indice di rifrazione più basso, avviene la riflessione totale (non c'è nessun raggio trasmesso) se l'angolo d'incidenza eccede l'angolo critico:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_t}{n_i} \quad (21-5a)$$

- Quando un raggio incide sull'interfaccia tra due mezzi, il raggio riflesso è totalmente polarizzato nel piano perpendicolare al piano d'incidenza se l'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di Brewster:

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_t}{n_i} \quad (21-6)$$

- Nella formazione di un'immagine ottica c'è una corrispondenza uno a uno tra i punti dell'oggetto e i punti dell'immagine. In un'immagine virtuale sembra che i raggi di luce provengano da un punto dell'immagine, ma non è così. In un'immagine reale i raggi passano per i punti dell'immagine.
- Per trovare la posizione di un'immagine si usa il diagramma dei raggi.
 1. Disegna due (o più) raggi che vanno da un singolo punto dell'oggetto alla lente o allo specchio.
 2. Traccia i raggi, applicando le leggi della riflessione o della rifrazione a seconda dei casi.
 3. Prolunga i raggi all'indietro lungo una retta fino a farli intersecare nel punto dell'immagine.
- I raggi più facili da tracciare, sia per gli specchi sia per le lenti, sono chiamati raggi principali.
- Uno specchio piano forma un'immagine non ingrandita, non invertita e virtuale. L'oggetto e l'immagine stanno entrambi sulla normale che va dall'oggetto alla superficie dello specchio.
- L'ingrandimento m è il rapporto tra la dimensione dell'immagine e la dimensione dell'oggetto; il segno di m è determinato dall'orientazione dell'immagine. Per un'immagine capovolta $m < 0$; per un'immagine dritta (non capovolta) $m > 0$. Sia per le lenti che per gli specchi vale:

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (21-9)$$

- L'equazione delle lenti sottili (e degli specchi) lega la distanza dell'oggetto e dell'immagine alla lunghezza focale:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (21-10)$$

- Le seguenti convenzioni sui segni permettono di applicare le equazioni delle lenti, degli specchi e dell'ingrandimento a ogni tipo di specchio o lente indipendentemente dal tipo d'immagine:

Quantità	Positiva	Negativa
Distanza oggetto, p	Sempre (per ora)	Mai (per ora)
Distanza immagine, q	Immagine reale	Immagine virtuale
Distanza focale, f	Lente o specchio convergenti	Lente o specchio divergenti
Ingrandimento m	Immagine dritta	Immagine capovolta

C Problema o quesito di tipo concettuale e quantitativo

B Applicazione biologica o medica

1. Problemi o quesiti con unità di misura non SI

Livello di difficoltà:

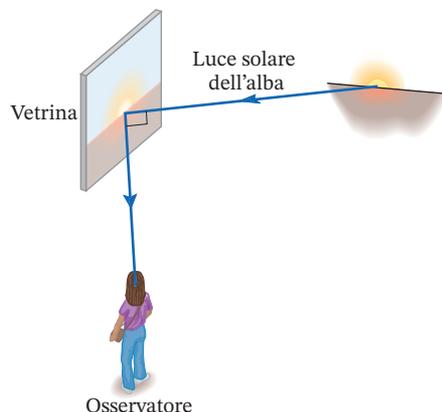
Nessun \blacklozenge semplice

\blacklozenge medio

$\blacklozenge\blacklozenge$ alto

Quesiti

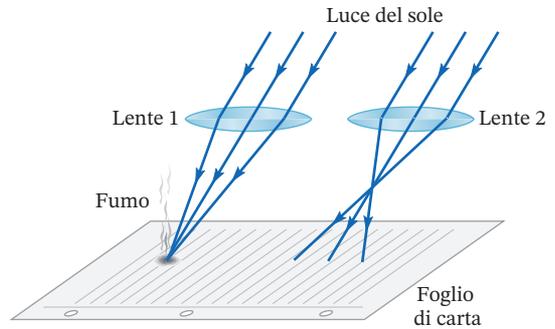
- Descrivi la differenza tra riflessione e diffusione fornendo alcuni esempi.
- Qual è la differenza tra un'immagine reale e una virtuale? Illustra un metodo per dimostrare la presenza di un'immagine reale.
- Le goccioline d'acqua nell'aria formano l'arcobaleno. Descrivi come si origina l'arcobaleno. Per vedere l'arcobaleno devi volgere lo sguardo verso il sole o lontano da esso? Perché l'arcobaleno secondario è più debole di quello primario?
- Perché uno specchio sospeso in verticale sembra scambiare la destra con la sinistra ma non l'alto con il basso? (*Aiuto*: fai riferimento alla Figura 21.27.)
- Un poster incorniciato è coperto con un vetro che ha una superficie più irregolare di un normale vetro. Come fa una superficie ruvida a ridurre i riflessi?
- Spiega in che modo uno specchio piano può essere pensato come un caso particolare di uno specchio sferico. Qual è la lunghezza focale di uno specchio piano? L'equazione di uno specchio sferico funziona con questa lunghezza focale? Cos'è l'ingrandimento trasversale per qualsiasi immagine prodotta da uno specchio piano?
- Un raggio di luce passa dall'aria all'acqua colpendo la superficie dell'acqua con un angolo d'incidenza di 45° . Quale di queste quantità cambia non appena la luce entra nell'acqua: lunghezza d'onda, frequenza, velocità di propagazione, direzione di propagazione?
- Se l'angolo d'incidenza è più grande dell'angolo di rifrazione per un fascio di luce che attraversa l'interfaccia tra due mezzi, che cosa si può dire a proposito dei valori degli indici di rifrazione e della velocità della luce nel primo e nel secondo mezzo?
- Uno specchio concavo ha una lunghezza focale f . (a) Se guardi lo specchio da una distanza minore di f , l'immagine che vedi è capovolta oppure no? (b) Se stai a una distanza maggiore di $2f$, l'immagine è capovolta oppure no? (c) Se stai a una distanza compresa tra f e $2f$, si forma un'immagine ma tu non riesci a vederla. Perché? Fai un diagramma dei raggi e confronta le posizioni dell'oggetto e dell'immagine.
- La lunghezza focale di uno specchio concavo è 4 m e un oggetto è posizionato davanti allo specchio a 3 m di distanza. Descrivi l'immagine dicendo se è reale o virtuale, capovolta oppure no.
- Quando uno specchio forma un'immagine virtuale, essa si trova davanti o dietro allo specchio? E nel caso di un'immagine reale?
- I raggi di luce viaggiano da sinistra a destra verso una lente. Se si forma un'immagine virtuale, su quale lato della lente essa si forma? Su quale lato della lente si formerà un'immagine reale?
- Perché la brillantezza di un diamante artificiale fatto in zirconio cubico ($n = 1.9$) è nettamente inferiore a uno reale ($n = 2.4$) anche se i due sono tagliati esattamente allo stesso modo?
- Un raggio si riflette da uno specchio sferico nel punto P . Spiega perché una linea radiale dal centro di curvatura attraverso il punto P divide sempre l'angolo tra il raggio incidente e il raggio riflesso.
- B** Una lente è posizionata all'estremità di una matassa di fibre ottiche uscenti da un endoscopio. La caratteristica della lente è quella di rendere paralleli i raggi prima che entrino nelle fibre ottiche (in altre parole, portano l'immagine all'infinito). Qual è il vantaggio di usare una lente con lo stesso indice di rifrazione del nucleo delle fibre ottiche?
- Una lente convergente fatta con un vetro flint denso, è posizionata in un contenitore di glicerina trasparente. Descrivi che cosa capita alla lunghezza focale.
- Gli occhiali polaroid sono utili per filtrare i riflessi provenienti dalla riflessione sulle superfici orizzontali. In quale direzione dovrebbe essere orientato l'asse di trasmissione degli occhiali polaroid?
- Supponi che durante il sorgere del sole stai guardando verso nord. Come mostrato nel disegno, la luce del sole viene riflessa dalla vetrina di un negozio. La luce riflessa è parzialmente polarizzata? Se sì, in quale direzione?



Quesiti a risposta multipla

- L'immagine di un oggetto in uno specchio piano:
 - È sempre più piccola dell'oggetto.
 - Ha sempre la stessa altezza dell'oggetto.
 - È sempre più grande dell'oggetto.
 - Può essere più grande, più piccola oppure della stessa dimensione dell'oggetto a seconda della distanza tra oggetto e specchio.
- Quali delle seguenti affermazioni sono vere? I raggi di un'onda piana sono:
 - Paralleli ai fronti d'onda.
 - Perpendicolari ai fronti d'onda.
 - Diretti radialmente con verso uscente da un punto centrale.
 - Paralleli uno all'altro
 - 1, 2, 3, 4
 - 1, 4
 - 2, 3
 - 2, 4.
- Da quale dei termini sotto riportati è descritta l'immagine di una diapositiva formata da un proiettore?
 - Reale, allargata, non capovolta.
 - Reale, capovolta e rimpicciolita.
 - Virtuale, capovolta, allargata.
 - Virtuale, non capovolta, rimpicciolita.
 - Reale, non capovolta, rimpicciolita.
 - Reale, capovolta, allargata.
 - Virtuale, capovolta, rimpicciolita.
- Durante un esperimento con un oggetto posizionato davanti a uno specchio concavo, la distanza dell'immagine q è determinata per diversi valori p di distanza dell'oggetto. Come può essere determinata la lunghezza focale f dello specchio da un grafico dei dati?
 - q in funzione di p ; pendenza = f .
 - q in funzione di p ; pendenza = $1/f$.
 - $1/p$ in funzione di $1/q$; intercetta $y = f$.
 - q in funzione di p ; intercetta $y = f$.
 - q in funzione di p ; intercetta $y = f$.
 - $1/p$ in funzione di $1/q$; pendenza = $1/f$.
- Un uomo corre verso uno specchio piano a una velocità di 5 m/s mentre lo specchio simultaneamente si avvicina all'uomo con una velocità di 2 m/s. La velocità con cui si muove la sua immagine (rispetto al suolo) è:
 - 14 m/s
 - 7 m/s
 - 3 m/s
 - 9 m/s
 - 12 m/s
- Due lenti convergenti, che hanno esattamente la stessa grandezza e la stessa forma, sono tenute sotto ai raggi solari alla stessa distanza da un foglio di carta. La figura mostra i percorsi di alcuni raggi che attraversano le due lenti. Quale lente è

fatta con un materiale a più alto indice di rifrazione? Come facciamo a saperlo?



- La lente 1, perché la sua lunghezza focale è più piccola.
 - La lente 1, perché la sua lunghezza focale è più grande.
 - La lente 2, perché la sua lunghezza focale è più piccola.
 - La lente 2, perché la sua lunghezza focale è più grande.
 - Le informazioni fornite non permettono di rispondere.
- Quale delle seguenti affermazioni descrive correttamente le immagini formate da un oggetto posizionato prima di una singola lente sottile?
 - Le immagini reali sono sempre ingrandite.
 - Le immagini reali sono sempre capovolte.
 - Le immagini virtuali non sono mai capovolte.
 - Le lenti convesse non producono mai immagini virtuali.
 - 1 e 3
 - 2 e 3
 - 2 e 4
 - 2, 3 e 4
 - 1, 2 e 3
 - solo 4
 - La luce riflessa dalla superficie dei laghi, dalle strade e dai cofani delle automobili è:
 - Parzialmente polarizzata nella direzione orizzontale.
 - Parzialmente polarizzata nella direzione verticale.
 - Polarizzata solo se il sole sta sopra alla testa.
 - Polarizzata solo se il cielo è limpido.
 - Non polarizzata.
 - Una sorgente puntiforme di luce è posizionata nel punto focale di una lente convergente; i raggi di luce uscenti dalla lente sono paralleli all'asse principale. Ora, supponiamo che la sorgente si sia avvicinata alla lente, ma che rimanga ancora sull'asse. Riguardo ai raggi di luce che

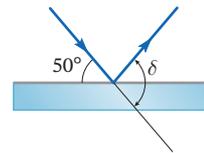
escono dalla lente, quale delle seguenti affermazione è vera?

- Sono divergenti.
 - Sono convergenti.
 - Rimangono ancora paralleli all'asse principale.
 - Escono paralleli uno all'altro ma non sono più paralleli all'asse.
 - Non esce nessun raggio perché si forma un'immagine virtuale.
10. Un raggio di luce dentro a un prisma di vetro incide con un angolo di Brewster su una superficie di un prisma immerso in aria. Quale delle seguenti affermazioni risulta vera?
- Non ci sono raggi trasmessi; il raggio riflesso è polarizzato su un piano.
 - Il raggio trasmesso è polarizzato su un piano; il raggio riflesso è parzialmente polarizzato.
 - Non c'è raggio trasmesso; il raggio riflesso è parzialmente polarizzato.
 - Il raggio trasmesso è polarizzato parzialmente; il raggio riflesso è polarizzato su un piano.
 - Il raggio trasmesso è polarizzato su un piano; non c'è raggio riflesso.

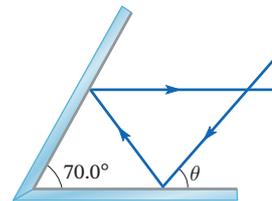
Problemi

- Disegna i fronti d'onda e i raggi per la luce emessa da una sorgente isotropa e puntiforme (isotropa = stessa intensità in tutte le direzioni). Usa il principio di Huygens per illustrare la propagazione di uno dei fronti d'onda.
- ♦  Applica il principio di Huygens a un fronte d'onda piano che si avvicina in direzione normale a una parete riflettente. La lunghezza d'onda è 1 cm e la parete ha un'apertura con una larghezza di 4 cm. Il centro del fronte d'onda incidente si avvicina al centro dell'apertura. Ripeti la procedura finché hai i fronti d'onda da entrambi i lati della parete. Senza preoccuparti degli effetti di bordo, quali sono in generale le forme dei fronti d'onda su ciascun lato della parete riflettente?
- ♦  Ripeti il problema 2 con un'apertura di 0.5 cm.
- Un'onda piana si riflette da una superficie di una sfera. Disegna un diagramma dei raggi e alcuni fronti d'onda per l'onda riflessa.
- Un'onda sferica (originata da una sorgente puntiforme) si riflette su una superficie piana. Disegna un diagramma dei raggi e disegna alcuni fronti d'onda per l'onda riflessa.

- I raggi di luce provenienti dal sole che hanno un'inclinazione di 35° sull'orizzonte ovest colpiscono la superficie immobile di uno stagno. (a) Qual è l'angolo d'incidenza dei raggi del sole sullo stagno? (b) Qual è l'angolo di riflessione dei raggi che lasciano la superficie dello stagno? (c) In quale direzione e con quale angolo, dalla superficie dello stagno, sono riflessi i raggi?
- Un raggio di luce si riflette su uno specchio piano come mostrato in figura. Qual è l'angolo di deviazione δ ?

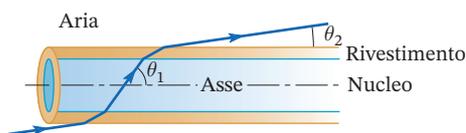


- Due specchi piani formano un angolo di 70° come mostrato in figura. Per quale angolo θ il raggio finale risulta orizzontale?



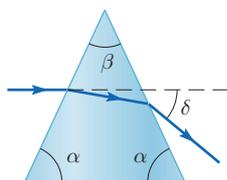
- Scegli due raggi di quelli rappresentati in Figura 21.6 e usali per provare che l'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di riflessione. (*Aiuto*: scegli un fronte d'onda in due diversi momenti: uno prima della riflessione e uno dopo. Il tempo che impiega la luce per andare da un fronte d'onda a quello successivo è lo stesso per i due raggi.)
- La luce del sole colpisce la superficie di un lago con un angolo d'incidenza di 30° . A quale angolo rispetto alla normale un pesce vedrebbe il sole?
- La luce del sole colpisce la superficie di un lago. Un sub vede il sole a un angolo di 42° rispetto alla verticale. Quale angolo fanno i raggi del sole in aria con la verticale?
- Un fascio di luce in aria incide su una pila di quattro piani di materiale trasparente con indici di rifrazione 1.2, 1.4, 1.32 e 1.28. Se l'angolo d'incidenza del fascio sul primo dei quattro materiali è di 60° , quale angolo fa il fascio con la normale quando esce nuovamente in aria dopo aver attraversato l'intera pila?
- Alison si trova in un parco marino e sta guardando attraverso una finestra di vetro un delfino che nuota sott'acqua. Il delfino sta nuotando verso Alison a una velocità di 15 m/s. Quanto veloce sembra muoversi il delfino?

14. Un raggio all'interno di un nucleo cilindrico di una fibra ottica ($n = 1.4$) viaggia con un angolo $\theta_1 = 49^\circ$ rispetto all'asse della fibra. Un raggio è trasmesso nel rivestimento (cladding) ($n = 1.2$) e successivamente in aria. Quale angolo θ_2 fa il raggio con la superficie del rivestimento della fibra ottica?



Problemi 14 e 15

15. Un raggio di luce all'interno di un nucleo cilindrico di una fibra ottica ($n = 1.4$) incide sul cladding. Fai riferimento alla figura. Il raggio uscente fa un angolo di $\theta_2 = 5^\circ$ con la superficie esterna del cladding. Quale angolo θ_1 rispetto all'asse della fibra ottica aveva il raggio nel nucleo?
16. Una lente di vetro ha un rivestimento antigraffio. La velocità della luce nel vetro è di $0.67c$ mentre la velocità della luce nel rivestimento è di $0.80c$. Un raggio di luce nel rivestimento incide l'interfaccia plastica-vetro con un angolo di 12° rispetto alla normale. A quale angolo, rispetto alla normale, il raggio viene trasmesso?
17. Nella Figura 21.11, una moneta sta contro il bordo della tazza più lontano dall'osservatore. Se nella tazza non c'è acqua la moneta non si vede (linea tratteggiata); se la tazza viene riempita d'acqua, e l'osservatore non si è mosso, egli può praticamente vedere tutta la moneta (linea continua). Se la tazza ha un diametro di 6.5 cm ed è alta 8.9 cm, qual è il diametro della moneta?
18. ✦ Un raggio di luce orizzontale incide su un prisma di vetro crown come mostrato in figura, dove l'angolo $\beta = 30^\circ$. Trova l'angolo di deviazione δ del raggio – cioè l'angolo che fa il raggio uscente dal prisma con la direzione del raggio incidente.

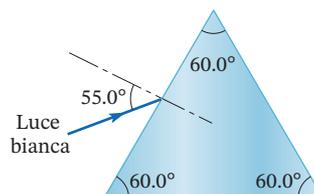


Problemi 18 e 19

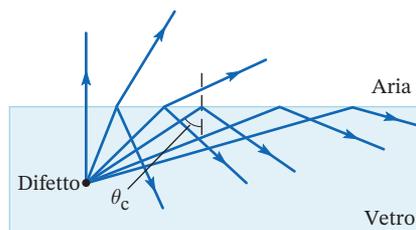
19. ✦ Un raggio di luce orizzontale incide su un prisma come mostrato nella figura del Problema 18, dove però β è un angolo piccolo (nella figura è esagerato). Trova l'angolo di deviazione δ del raggio – cioè l'angolo che fa il raggio uscente dal prisma con la direzione del raggio incidente – in

funzione di β e di n , l'indice di rifrazione del prisma, e dimostra come δ sia proporzionale a β .

20. ⓐ Un diamante (circondato d'aria) viene illuminato con una luce bianca. Su un particolare lato, l'angolo d'incidenza è di 26° . Dentro al diamante la luce rossa ($\lambda = 660$ nm in vuoto) è rifratta a 10.48° rispetto alla normale mentre la luce blu ($\lambda = 470$ nm in vuoto) è rifratta a 10.33° rispetto alla normale. (a) Quali sono gli indici di rifrazione nel diamante per la luce rossa e per quella blu? (b) Qual è, nel diamante, il rapporto della velocità della luce rossa sulla velocità della luce blu? (c) Come dovrebbe essere un diamante per non subire dispersione?
21. ✦ Il prisma rappresentato in figura è fatto con vetro crown. Il suo indice di rifrazione va da 1.517 per la luce visibile con lunghezze d'onda più grandi a 1.538 per quelle più corte. Trova l'intervallo degli angoli di rifrazione per la luce trasmessa in aria dopo aver attraversato un prisma.

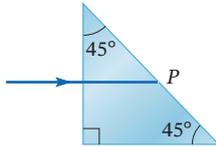


22. Calcola l'angolo critico per uno zaffiro che sta in aria.
23. ⓐ (a) Calcola l'angolo critico per un diamante che sta in aria. (b) Calcola l'angolo critico per un diamante che è immerso in acqua. (c) Spiega perché un diamante brilla di meno quando sta sott'acqua di quando si trova in aria.
24. Esiste un angolo critico per un raggio di luce che arriva da un mezzo con indice di rifrazione 1.2 e incide su un mezzo con indice di rifrazione 1.4 ? Se sì, qual è l'angolo critico che permette la riflessione totale nel primo mezzo?
25. ⓐ La figura mostra alcuni raggi di luce riflessi da un piccolo difetto del vetro verso la superficie del vetro. (a) Se $\theta_c = 40^\circ$, qual è l'indice di rifrazione del vetro? (b) C'è un punto in aria, sopra la superficie del vetro, dove un osservatore non sarebbe in grado di vedere il difetto del vetro? Spiega.



26. ⓐ Un prisma a 45° ha un indice di rifrazione di 1.6 . La luce incide normalmente sul lato sinistro

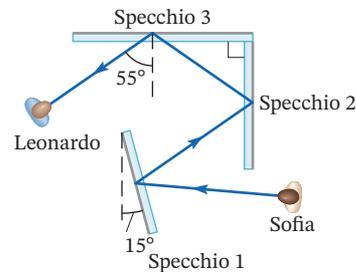
del prisma. La luce esce dall'altra parte del prisma (per es., nel punto P)? Se sì, qual è l'angolo di rifrazione rispetto alla normale nel punto P ? Se no, che cosa accade alla luce?



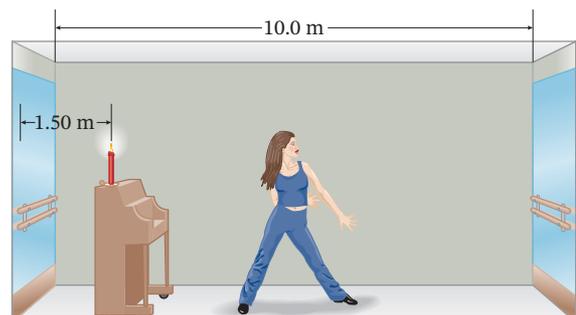
27. La luce incidente in un prisma a 45° (vedi sopra) subisce riflessione totale nel punto P . Che cosa puoi concludere riguardo all'indice di riflessione del prisma? (Determina sia il valore minimo che quello massimo possibile.)
28. Qual è l'indice di rifrazione del nucleo di una fibra ottica se il rivestimento (cladding) ha $n = 1.2$ e l'angolo critico all'interfaccia nucleo-rivestimento è di 45° ?
29. (a) A quale angolo rispetto all'orizzonte la luce solare incidente viene riflessa dalla superficie immobile di un lago e quindi polarizzata totalmente? (b) Qual è la direzione della luce riflessa polarizzata? (c) Qualsiasi luce incidente con questo angolo viene trasmessa nell'acqua? Se sì, con quale angolo la luce trasmessa viaggia sotto all'orizzonte?
30. (a) A quale angolo rispetto all'orizzonte la luce del sole incidente sulla superficie ghiacciata di un lago viene totalmente polarizzata? (b) Qual è la direzione della luce riflessa polarizzata? (c) Qualsiasi luce incidente con questo angolo viene trasmessa nel ghiaccio? Se sì, con quale angolo la luce trasmessa viaggia sotto all'orizzonte?
31. La luce viaggia in un mezzo con indice n_1 verso l'interfaccia con un altro materiale di indice $n_2 < n_1$. (a) È più grande l'angolo critico oppure l'angolo di Brewster? La risposta dipende dai valori di n_2 e n_1 (oltre all'ipotesi $n_2 < n_1$)? (b) Che cosa puoi dire a riguardo dell'angolo critico e dell'angolo di Brewster per luce incidente in altri modi (dal mezzo con indice n_2 verso il mezzo n_1)?
32. Osservando un diamante perpendicolarmente alla superficie superiore, sembra ci sia un difetto a 2 mm sotto la superficie. In realtà quanto dista il difetto dalla superficie?
33. Un insetto è intrappolato in un pezzo di ambra ($n = 1.546$). Guardando l'insetto perpendicolarmente da sopra, sembra stia a 7 mm dalla superficie liscia dell'ambra. In realtà, quanti millimetri dalla superficie dista l'insetto?
34. Giulia vuole comprare uno specchio che le permetta, la mattina, di controllare il suo aspetto

(dalla testa ai piedi) prima di uscire e andare al lavoro. Se Giulia è alta 1.64 m, quanto deve essere alto lo specchio?

35. Gli occhi di Daniele stanno a 1.82 m dal pavimento quando indossa le scarpe, mentre l'estremità più alta del suo capo si trova a 1.96 m dal pavimento. Daniele ha uno specchio lungo 0.98 m. A quale altezza Daniele deve appendere lo specchio affinché possa specchiarsi completamente (dalla testa ai piedi)? Calcola l'altezza dalla parte più bassa dello specchio al pavimento. Disegna un diagramma dei raggi per illustrare la tua risposta.
36. Una rosa sta in un vaso posto davanti a uno specchio piano a 0.25 m da esso. Piero guarda lo specchio davanti a lui da una distanza di 2 m. Quanto lontana sta l'immagine della rosa?
37. In un labirinto di specchi di un parco dei divertimenti, Leonardo vede l'immagine riflessa di Sofia da una serie di tre specchi. Se l'angolo riflesso dallo specchio 3 è di 55° come mostrato in figura, qual è l'angolo d'incidenza sullo specchio 1?



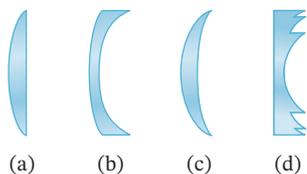
38. Maurizio sta in piedi in mezzo a una stanza rettangolare con il soffitto e due pareti adiacenti ricoperti di specchi piani. Quante immagini di se stesso vede Maurizio?
39. Anna sta in piedi in mezzo a una stanza rettangolare che ha le pareti opposte che distano 10 m e sono ricoperte di specchi piani. Nella stanza c'è una candela che sta a 1.50 m da una delle due pareti ricoperte da specchi. Anna sta guardando la parete opposta e vede molte immagini della candela. Quanto lontane sono le quattro immagini della candela più vicine che lei può vedere?



40. ✦ Una sorgente puntiforme di luce sta davanti a uno specchio piano. (a) Prova che tutti i raggi riflessi, quando vengono proiettati dietro allo specchio, convergono in un singolo punto. (*Aiuto*: osserva la Figura 21.26a e usa i triangoli simili.) (b) Dimostra che l'immagine puntiforme giace su una linea che va dall'oggetto alla perpendicolare allo specchio e che le distanze immagine-specchio e oggetto-specchio sono uguali. (*Aiuto*: usa una qualsiasi coppia di raggi della Figura 21.26a.)
41. Un oggetto alto 2 cm sta a 12 cm davanti a uno specchio convesso che ha raggio di curvatura di 8 cm. Dove si forma l'immagine? Disegna un diagramma dei raggi per illustrare la risposta.
42. Un oggetto alto 1.8 cm sta a 20 cm davanti a uno specchio concavo che ha una lunghezza focale di 5 cm. Qual è la posizione dell'immagine? Disegna un diagramma dei raggi per illustrare la risposta.
43. Il dentista usa uno specchio convesso per osservare i denti dei suoi pazienti. Quando lo specchio si trova a 1.2 cm dal dente, si forma un'immagine diritta e ingrandita 3 volte. Qual è la lunghezza focale e il raggio di curvatura dello specchio?
44. Un oggetto è posizionato davanti a uno specchio concavo che ha un raggio di curvatura di 25 cm. Un'immagine reale viene ingrandita due volte rispetto alle dimensioni dell'oggetto. A quale distanza dallo specchio si trova l'oggetto? Disegna un diagramma dei raggi per illustrare la risposta.
45. Un oggetto è posizionato davanti a uno specchio convesso che ha un raggio di curvatura di 25 cm. Un'immagine virtuale viene rimpicciolita della metà rispetto alle dimensioni dell'oggetto. A quale distanza dallo specchio si trova l'oggetto? Disegna un diagramma dei raggi per illustrare la risposta.
46. ⓐ Uno specchio concavo ha un raggio di curvatura di 5 m. Un oggetto, che inizialmente sta a 2 m dallo specchio, si muove all'indietro fino a 6 m dallo specchio. Descrivi come cambia l'immagine.
47. ✦ Ricava l'equazione d'ingrandimento, $m = h'/h = -q/p$, per uno specchio convesso. Disegna un diagramma dei raggi. (*Aiuto*: disegna un raggio che non sia uno dei tre principali, come è stato fatto quando abbiamo ricavato l'equazione per uno specchio concavo.)
48. ⓐ In una stazione della metropolitana uno specchio convesso permette all'addetto alla sicurezza di vedere ciò che accade. Una donna alta 1.64 m sta in piedi a 4.5 m di distanza dallo specchio. L'immagine della donna che si forma è alta 0.5 m. (a) Qual è il raggio di curvatura dello specchio? (b) Lo specchio ha un diametro di 0.5 m. Se le scarpe della donna appaiono nell'estremità più bassa dello specchio, la sua testa sarà nella parte più alta? In altre parole, l'immagine della donna riempie tutto lo specchio? Spiega.
49. ✦ Dimostra che quando i raggi paralleli all'asse principale si riflettono su uno specchio concavo, i raggi riflessi passano tutti per il punto focale che sta a una distanza $R/2$ dal vertice. Assumi che gli angoli d'incidenza siano piccoli. (*Aiuto*: segui lo stesso ragionamento che nel testo è stato fatto per uno specchio convesso.)
50. (a) Per una lente convergente con lunghezza focale di 3.5 cm, trova la distanza dell'oggetto se l'immagine prodotta è capovolta e si trova a una distanza di 5 cm. Usa un diagramma dei raggi per verificare i tuoi calcoli. (b) L'immagine è reale o virtuale? (c) Qual è il suo ingrandimento?
51. Disegna un diagramma dei raggi per dimostrare che, quando un oggetto è posizionato a una distanza maggiore di due volte la lunghezza focale da una lente convergente, l'immagine che si forma è capovolta, reale e rimpicciolita.
52. Disegna un diagramma dei raggi per dimostrare che, quando un oggetto è posizionato a una distanza pari a due volte la lunghezza focale da una lente convergente, l'immagine che si forma è capovolta, reale e ha le stesse dimensioni dell'oggetto.
53. Disegna un diagramma dei raggi per dimostrare che, quando un oggetto è posizionato a una distanza da una lente convergente compresa tra due volte la lunghezza focale e la lunghezza focale, l'immagine che si forma è capovolta, reale e ingrandita.
54. Disegna un diagramma dei raggi per dimostrare che, quando un oggetto è posizionato a una distanza da una lente convergente pari alla lunghezza focale, i raggi che escono dalla lente sono paralleli uno all'altro e quindi formano un'immagine all'infinito.
55. Quando un oggetto è posizionato a 6 cm da una lente convergente, si forma un'immagine virtuale a 9 cm dalla lente. Qual è la lunghezza focale della lente?
56. Un oggetto alto 3 cm è posizionato a 12 cm da una lente divergente che ha una lunghezza focale di 12 cm. Disegna un diagramma dei raggi per trovare l'altezza e la posizione dell'immagine.
57. Una lente divergente ha una lunghezza focale di 8 cm. (a) Quali sono le distanze delle immagini per oggetti posizionati alle seguenti distanze: 5 cm, 8 cm, 14 cm, 16 cm, 20 cm? Per ciascun caso descrivi com'è l'immagine: se è capovolta oppure no, se è reale o virtuale e se le sue dimensioni so-

no rimpicciolite o ingrandite rispetto alle dimensioni dell'oggetto. (b) Se l'oggetto fosse alto 4 cm, quali sarebbero le altezze delle immagini dell'oggetto che si trovano a 5 cm e a 20 cm?

58. Una lente convergente ha una lunghezza focale di 8 cm. (a) Quali sono le distanze delle immagini di oggetti posizionati dalla lente sottile alle seguenti distanze: 5 cm, 14 cm, 16 cm, 20 cm? Per ciascun caso descrivi com'è l'immagine: se è capovolta oppure no, se è reale o virtuale e se le sue dimensioni sono rimpicciolite o ingrandite rispetto alle dimensioni dell'oggetto. (b) Se l'oggetto fosse alto 4 cm, quali sarebbero le altezze delle immagini dell'oggetto che si trovano a 5 cm e a 20 cm?
59. Disegna un diagramma dei raggi per dimostrare che, se un oggetto è posizionato a meno di una lunghezza focale da una lente convergente, l'immagine che si forma è diritta e virtuale.
60. Per ciascuna delle lenti in figura, indica se la lente è convergente oppure divergente.

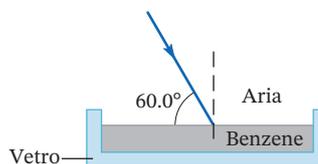


61. ✦ Una diapositiva standard (35 mm) misura 24 mm per 36 mm. Supponi che un proiettore produca su uno schermo un'immagine della diapositiva di dimensioni 60 cm per 90 cm. La lunghezza focale della lente è di 12 cm. (a) Qual è la distanza tra la diapositiva e lo schermo? (b) Se lo schermo viene allontanato dal proiettore, la lente dovrebbe essere avvicinata o allontanata dalla diapositiva?
62. Un oggetto alto 6 cm è posizionato a 40 cm da una lente divergente. Il modulo della lunghezza focale della lente è 20 cm. Trova la posizione e l'altezza dell'immagine. È un'immagine reale o virtuale? Diritta o capovolta?

Problemi di riepilogo

63. Samanta si sta truccando e sta a 32 cm dallo specchio; lei nota che la sua immagine viene ingrandita di 1.8 volte. (a) Che tipo di specchio sta usando? (b) Dove si trova il suo viso relativamente al raggio di curvatura o alla lunghezza focale? (c) Qual è il raggio di curvatura dello specchio?
64. Una lente convergente fatta di vetro ($n = 1.5$) è posizionata sott'acqua ($n = 1.33$). Descrivi come varia la lunghezza focale della lente sott'acqua rispetto alla lunghezza focale in aria. Disegna un diagramma per illustrare la tua risposta.

65. Un oggetto alto 8 cm forma un'immagine virtuale alta 3.5 cm e posizionata a 4 cm dietro allo specchio. (a) Trova la distanza dell'oggetto. (b) Descrivi lo specchio: è piano, convesso o concavo? (c) Quanto vale la sua lunghezza focale e quanto il raggio di curvatura?
66. Una sorgente puntiforme di luce è posizionata a 10 cm da uno specchio concavo; i raggi riflessi sono paralleli. Qual è il raggio di curvatura dello specchio?
67. ✦ Una stazione radar è localizzata a 24 m sopra il livello del mare. Quando il radar è puntato su un punto che si trova in mare a 150 m di distanza, rileva una balena sul fondo dell'oceano. Se ci vogliono $2.10 \mu\text{s}$ perché il segnale radar emesso venga nuovamente ricevuto, a che profondità sta nuotando la balena?
68. ✦ Un raggio di luce in aria è incidente con un angolo di 60° su una superficie di benzene contenuto in una scatola di vetro crown. Qual è l'angolo di rifrazione del raggio di luce quando entra nel vetro del fondo del contenitore?



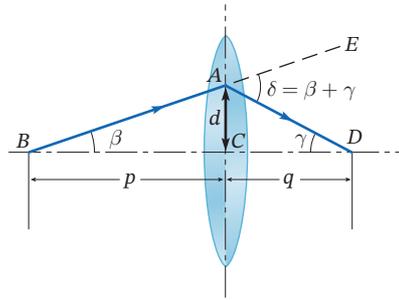
69. ✦ Un raggio di luce passa dall'aria a un vetro flint e poi ritorna in aria. L'angolo d'incidenza sulla prima interfaccia aria-vetro è di 60° . Lo spessore del vetro è 5 mm; le superfici anteriore e posteriore sono parallele. A causa del passaggio all'interno del vetro, di quanto viene deviato il raggio incidente?
70. Un prisma di vetro devia il raggio di una luce blu di più di un raggio di luce rossa poiché il suo indice di rifrazione è leggermente più alto per il blu che per il rosso. Una lente di vetro divergente ha lo stesso punto focale per la luce blu e per quella rossa? Se la risposta è negativa, per quali colori il punto focale è più vicino alla lente?
71. Un fascio laser sta viaggiando attraverso una sostanza sconosciuta. Quando incontra un'interfaccia con l'aria l'angolo di riflessione è 25° e l'angolo di rifrazione è 37° . (a) Qual è l'indice di rifrazione della sostanza? (b) Qual è la velocità della luce nella sostanza? (c) Qual è il minimo angolo d'incidenza per avere riflessione totale?
72. Un sommozzatore in un lago punta la sua pila contro la superficie. (a) Se il fascio fa un angolo d'incidenza di 75° rispetto alla normale alla superficie dell'acqua, esso viene riflesso, trasmesso o entrambi? Trova gli angoli del fascio riflesso e

di quello trasmesso (se esistono). (b) Ripeti per un angolo d'incidenza di 25° .

73. Laura sta camminando in linea retta verso uno specchio piano con una velocità di 0.8 m/s. A quale velocità si avvicina allo specchio la sua immagine?
74. Gianni si sta addestrandolo per ottenere la patente. Egli nota nello specchietto retrovisore che un albero, che sta esattamente dietro alla sua automobile, si sta avvicinando alla macchina non appena fa retromarcia. Se la macchina va all'indietro a 8 km/h, quanto veloce, *relativamente all'auto*, sembrerà avvicinarsi l'immagine dell'albero?
75. Uno specchio piano riflette un fascio di luce. Dimostra che la rotazione dello specchio di un angolo α provoca la rotazione del fascio di 2α .
76. Un dentista tiene un piccolo specchio a 1.9 cm dalla superficie del dente di un paziente. L'immagine formata è dritta ed è 5 volte più grande dell'oggetto. (a) L'immagine è reale o virtuale? (b) Qual è la lunghezza focale dello specchio? È concavo o convesso? (c) Se lo specchio viene avvicinato al dente l'immagine si allarga o si restringe? (d) Per quale intervallo di distanze dall'oggetto lo specchio produce un'immagine dritta?
77. Un oggetto alto 5 cm è posizionato a 20 cm da una lente convergente di lunghezza focale 15 cm. Disegna un diagramma dei raggi per trovare l'altezza e la posizione dell'immagine.
78. Una lettera su una pagina di un dizionario tascabile è alta 0.6 mm. Una lente d'ingrandimento tenuta a 4.5 cm sopra la pagina forma un'immagine della lettera che è alta 2.4 cm. (a) L'immagine è reale o virtuale? (b) Dove si trova l'immagine? (c) Qual è la lunghezza focale della lente? È convergente o divergente?
79. Un oggetto è posizionato a 10 cm da una lente. Si forma un'immagine dritta e virtuale a una distanza di 30 cm dalla lente. Qual è la lunghezza focale della lente? La lente è convergente o divergente?
80.  Un costruttore sta progettando uno specchietto da barba da tenere vicino alla faccia. Se il costruttore vuole che l'immagine sia dritta e il più possibile grande, quali caratteristiche dovrebbe scegliere? (Tipo dello specchio? Lunghezza focale lunga oppure corta relativamente alla distanza faccia-specchio?)

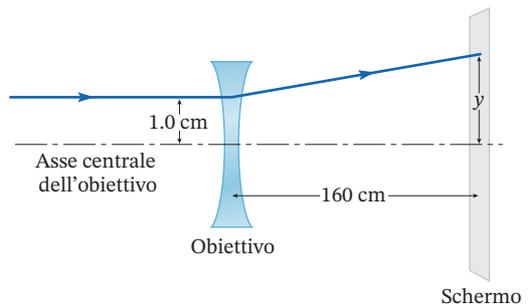
81.  Dimostra che l'angolo di deviazione δ per un raggio che colpisce una lente sottile convergente a una distanza d dall'asse principale è dato da $\delta = d/f$. Dunque, un raggio viene deviato di un angolo δ che è proporzionale a d e che non dipende dall'angolo del raggio incidente (finché è parassiale).

[*Aiuto*: guarda la figura e usa l'approssimazione di piccolo angolo $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ (in radianti)].



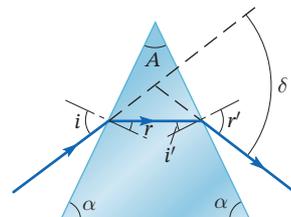
(Gli angoli sono esageratamente ingranditi per facilitare la scrittura.)

82. La lunghezza focale di una lente sottile è -20 cm. Uno schermo è posizionato a 160 cm dalla lente. Quali sono le coordinate y del punto dove il raggio di luce, mostrato in figura, colpisce lo schermo? Il raggio incidente è parallelo all'asse centrale e dista 1 cm da questo asse.



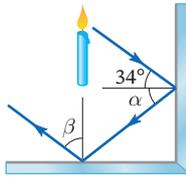
83.  L'angolo di deviazione di un prisma triangolare è definito come l'angolo tra il raggio incidente e il raggio uscente (angolo δ). Si può osservare che quando l'angolo d'incidenza i è uguale all'angolo di rifrazione r' per il raggio uscente, l'angolo di deviazione è al minimo. Dimostra che l'angolo di deviazione minimo ($\delta_{\min} = D$) è legato all'angolo A del prisma e all'indice di rifrazione n dalla relazione:

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(A + D)}{\sin \frac{1}{2}A}$$

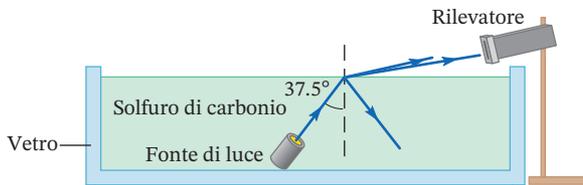


(*Aiuto*: per un prisma triangolare isoscele, l'angolo minimo di deviazione si ha quando il raggio dentro al prisma è parallelo alla base, come mostrato in figura.)

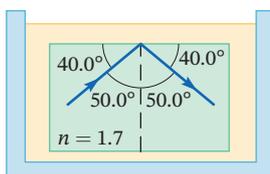
84. Un raggio di luce viene riflesso da due superfici riflettenti come mostrato in figura. Se l'angolo d'incidenza iniziale è 34° , quali sono i valori degli angoli α e β ? (La figura non è in scala.)



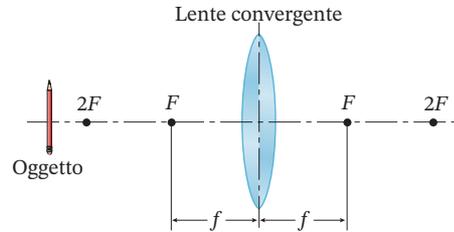
85. Un fascio di luce formato da un misto di luce rossa, blu e gialla esce da una sorgente che si trova immersa in una soluzione di solfuro di carbonio. Il fascio di luce colpisce l'interfaccia tra la soluzione di solfuro di carbonio e l'aria con un angolo di 37.5° come mostrato in figura. Il solfuro di carbonio ha i seguenti indici di rifrazione per le lunghezze d'onda presenti: rosso (656.3 nm) $n = 1.6182$, giallo (589.3 nm) $n = 1.6276$, blu (486.1 nm) $n = 1.6523$. Quali colori sono rilevati da un rivelatore localizzato sopra la superficie della soluzione di solfuro di carbonio?



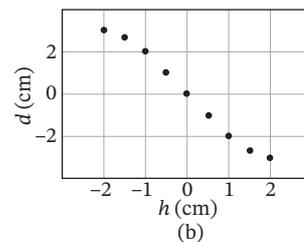
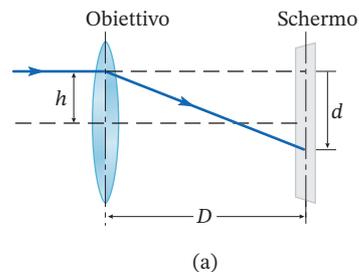
86. Un raggio di luce che viaggia in aria incide normalmente su un prisma di vetro ($n = 1.5$), come illustrato nella figura del Problema 26. (a) Disegna tutti i raggi che escono dal prisma e determina gli angoli per rappresentare le loro direzioni. (b) Ripeti la parte (a) con un prisma immerso in acqua ($n = 1.33$). (c) Ripeti la parte (a) con il prisma immerso in una soluzione zuccherina ($n = 1.5$).
87. Uno specchio concavo ha un raggio di curvatura di 14 cm. Se un oggetto puntiforme è posizionato sull'asse principale a 9 cm di distanza dallo specchio, dove si trova la sua immagine?
88. Un pezzo di vetro ($n = 1.7$) è immerso in un liquido sconosciuto. Un raggio di luce dentro al blocco subisce riflessione totale. Che cosa puoi concludere a proposito dell'indice di rifrazione del liquido?



89. I diagrammi dei raggi spesso mostrano oggetti che, per convenienza, hanno un'estremità che sta sull'asse principale. Disegna un diagramma dei raggi e localizza l'immagine dell'oggetto mostrato nella figura che interseca l'asse principale.

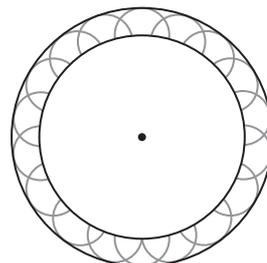


90. Un oggetto alto 5 cm è posizionato a 50 cm da una lente con lunghezza focale -20 cm. (a) Quanto alta è l'immagine? L'immagine è diritta o capovolta?
91. \blacklozenge Lo spostamento verticale d di raggi di luce paralleli all'asse principale è misurato in funzione dello spostamento verticale h del raggio incidente dall'asse principale, come mostrato nella parte (a) della figura. I dati sono riportati nella parte (b) della figura. La distanza D della lente dallo schermo è 1 m. Qual è la lunghezza focale della lente per raggi parassiali?



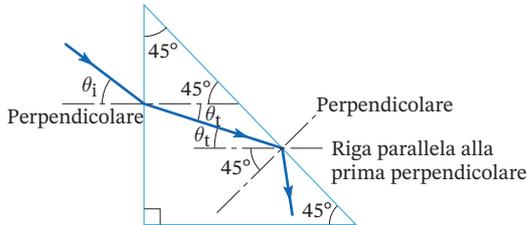
Risposte ai Problemi di verifica

21.1



21.2 51° .

21.3 Se $\theta_i = 0$ allora $\theta_t = 0$ e l'angolo d'incidenza nel dorso del prisma è di 45° , che è maggiore dell'angolo critico (41.8°). Se $\theta_i > 0$, allora $\theta_t > 0$ e l'angolo d'incidenza nel dorso del prisma è maggiore di 45° .



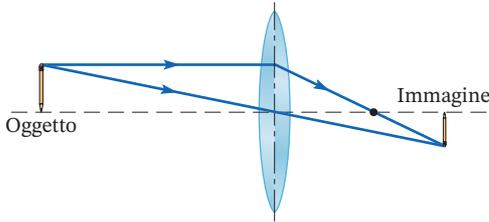
21.4 $\frac{4}{3}h$.

21.5 No, lei non può vedere i suoi piedi; la parte inferiore dello specchio è troppo alta di 10 cm.

21.6 12 cm davanti allo specchio, alta 3 cm e reale.

21.7 $p = 6$ cm, $f = +12$ cm, concavo.

21.8



21.9 -12 cm (divergente).

Risposte ai quesiti Mettiti alla prova

21.3 La legge di Snell indica che il prodotto di $n \sin \theta$ deve essere lo stesso nei due mezzi:

$$n_{\text{vetro}} \sin \theta_{\text{vetro}} = n_{\text{acqua}} \sin \theta_{\text{acqua}}$$

Dunque, $\sin \theta$ deve essere maggiore nel materiale che presenta l'indice di rifrazione minore (l'acqua, in questo caso). Tra 0 e 90° , $\sin \theta$ aumenta quando θ aumenta. Essendo θ proprio l'angolo formato tra il raggio di luce e la normale alla parete di vetro, deve risultare $\theta_{\text{acqua}} > \theta_{\text{vetro}}$. Il raggio di luce, quando passa dal vetro all'acqua, è quindi deviato in modo da allontanarsi maggiormente dalla direzione della normale alla parete.

21.5 La luce riflessa da una superficie orizzontale è parzialmente o totalmente polarizzata nella direzione parallela alla superficie riflettente (e quindi è polarizzata orizzontalmente). Per ridurre i riflessi della luce, l'asse di trasmissione delle lenti polarizzate deve essere orientato verticalmente.

21.6 L'immagine del pesce è virtuale. I raggi di luce visti dal martin pescatore *sembrano* provenire da un punto dove in realtà il pesce non c'è.

21.8 Uno specchio piano forma un'immagine virtuale che ha le stesse dimensioni dell'oggetto (vedi Figura 21.26). L'ingrandimento è $m = +1$.

21.9 L'immagine può essere sia reale sia virtuale. La Figura 21.42a mostra una lente convergente che forma una immagine *reale*, dato che i raggi provenienti da un punto dell'oggetto convergono su un punto dell'immagine. La Figura 21.42b mostra invece una lente convergente che forma una immagine *virtuale*, dato che i raggi provenienti da un punto dell'oggetto non convergono su un punto dell'immagine, ma dopo aver attraversato la lente sono solo meno divergenti.