

La rifrazione della luce: le lenti e gli strumenti ottici

Una fibra ottica è una specie di filo di vetro in grado di trasmettere impulsi luminosi a grandi distanze dalla sorgente che li ha generati. Grazie alla loro capacità di saper guidare ordinatamente la luce, le fibre ottiche hanno trovato svariate applicazioni nel settore della medicina, dell'astronomia, ma soprattutto delle telecomunicazioni, dove vengono impiegate come canali di comunicazione privilegiati ad alta velocità.

► L'ordine di grandezza

Quante canzoni si riescono a scaricare in un'ora, utilizzando una connessione internet a fibre ottiche?

La risposta a pagina 419

Tabella 14.1 Indice di rifrazione (*) di alcune sostanze comuni

Sostanza	Indice di rifrazione n
Solidi a 20 °C	
Cloruro di sodio	1,544
Diamante	2,419
Ghiaccio (a 0 °C)	1,309
Quarzo cristallino	1,544
Quarzo fuso	1,458
Vetro (ottico)	1,523
Liquidi a 20 °C	
Acqua	1,333
Alcol etilico	1,362
Benzene	1,501
Bisolfuro di carbonio	1,632
Tetracloruro di carbonio	1,461
Gas a 0 °C, 1 atm	
Aria	1,000 293
Biossido di carbonio	1,000 45
Idrogeno (H ₂)	1,000 271
Ossigeno (O ₂)	1,000 139

(*) Misurati con una luce di lunghezza d'onda nel vuoto pari a 589 nm.

14.1 L'indice di rifrazione

La luce si propaga nel vuoto alla velocità $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s. La luce si propaga anche in altri mezzi, come l'aria, l'acqua e il vetro. Tuttavia gli atomi della materia in parte la assorbono, in parte la riemettono e in parte la diffondono. Perciò la velocità della luce in un mezzo diverso dal vuoto è minore di c e il suo valore dipende dalla natura del materiale.

DEFINIZIONE DELL'INDICE DI RIFRAZIONE

L'indice di rifrazione n di un materiale è il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto c e la velocità della luce v nel materiale:

$$n = \frac{\text{velocità della luce nel vuoto}}{\text{velocità della luce nel materiale}} = \frac{c}{v} \quad (14.1)$$

La tabella 14.1 riporta gli indici di rifrazione di alcune sostanze comuni. I valori di n sono maggiori di 1 perché la velocità della luce nel vuoto è maggiore di quella in qualunque altro materiale. Per esempio, l'indice di rifrazione del diamante è $n = 2,419$, perciò la velocità della luce nel diamante è:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,419} = 1,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

L'indice di rifrazione dell'aria è così vicino a 1 che per la maggior parte degli scopi pratici si può porre $n_{\text{aria}} = 1$.

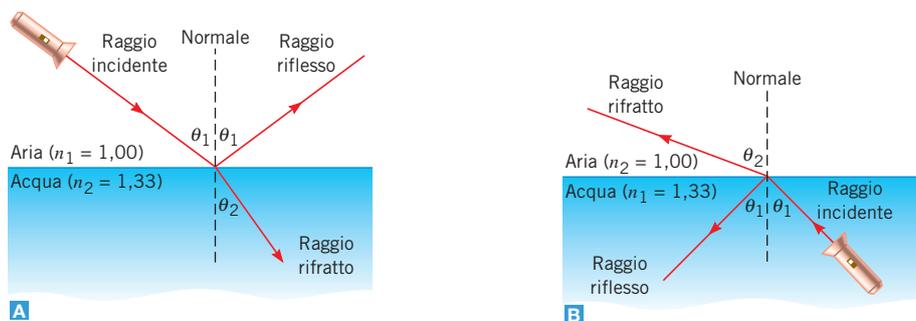
14.2 La legge della rifrazione

Legge di Snell

Quando la luce colpisce la superficie di separazione tra due materiali trasparenti, in genere si divide in due parti, come mostra la figura 14.1A: una parte viene riflessa con un angolo di riflessione uguale all'angolo di incidenza e una parte continua a propagarsi oltre la superficie di separazione. Se il raggio incidente non è perpendicolare alla superficie di separazione, il raggio che penetra nel secondo materiale ha una direzione diversa da quella del raggio incidente.

Figura 14.1

A. Quando un raggio di luce passa dall'aria all'acqua, una parte della luce viene riflessa dalla superficie di separazione tra l'aria e l'acqua e una parte penetra nell'acqua ma viene rifratta, cioè deviata dalla sua direzione originale. Il raggio rifratto si avvicina alla normale ($\theta_2 < \theta_1$). **B.** Quando la luce passa dall'acqua all'aria, il raggio rifratto si allontana dalla normale ($\theta_2 > \theta_1$).



Il raggio che penetra nel secondo materiale è chiamato **raggio rifratto** e mostra uno dei seguenti comportamenti:

- quando la luce passa da un mezzo con indice di rifrazione minore (l'aria) a uno con indice di rifrazione maggiore (l'acqua), il raggio rifratto si avvicina alla normale (figura 14.1A);
- quando la luce passa da un mezzo con indice di rifrazione maggiore (l'acqua) a uno con indice di rifrazione minore (l'aria), il raggio rifratto si allontana dalla normale (figura 14.1B).

Sia il raggio incidente sia il raggio rifratto si comportano come previsto dal principio di reversibilità dei cammini ottici. Ciascuna delle situazioni illustrate può esse-

re ottenuta dall'altra invertendo la direzione dei raggi. L'unica differenza è dovuta al raggio riflesso, che una volta si propaga in aria e l'altra in acqua.

In entrambe le situazioni l'angolo di incidenza, l'angolo di riflessione e l'angolo di rifrazione sono misurati rispetto alla normale alla superficie di separazione nel punto di incidenza. Osserviamo che nella parte **A** della figura l'indice di rifrazione dell'aria è indicato con n_1 , mentre nella parte **B** è indicato con n_2 : il motivo di questa differenza è che *indichiamo con il pedice 1 tutte le variabili associate al raggio incidente (o al raggio riflesso) e con il pedice 2 tutte le variabili associate al raggio rifratto*.

L'angolo di rifrazione θ_2 dipende dall'angolo di incidenza θ_1 e dagli indici di rifrazione n_1 e n_2 dei due mezzi. La relazione tra queste grandezze è chiamata **legge della rifrazione di Snell**, dal nome del matematico olandese Willebrord Snell (1591-1626) che la scoprì sperimentalmente.

■ LEGGE DELLA RIFRAZIONE DI SNELL

Quando la luce passa da un mezzo con indice di rifrazione n_1 a un mezzo con indice di rifrazione n_2 , il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione dei due mezzi nel punto di incidenza giacciono tutti nello stesso piano e l'angolo di rifrazione θ_2 è legato all'angolo di incidenza θ_1 dalla relazione:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (14.2)$$

ESEMPIO 1 ■ Legge della rifrazione

Determinazione dell'angolo di rifrazione

Un raggio incide sulla superficie di separazione tra aria e acqua con un angolo di incidenza di 46° . L'indice di rifrazione dell'acqua è 1,33. Determina l'angolo di rifrazione quando il raggio passa:

- ▶ dall'aria all'acqua.
- ▶ dall'acqua all'aria.

Ragionamento

Applichiamo la legge di Snell a entrambe le situazioni, ricordando che nella prima il raggio incidente proviene dall'aria, mentre nella seconda proviene dall'acqua. Teniamo conto di questa differenza indicando con il pedice 1 le variabili associate al raggio incidente e con il pedice 2 le variabili associate al raggio rifratto.

Soluzione

- ▶ Il raggio incidente proviene dall'aria, perciò $\theta_1 = 46^\circ$ e $n_1 = 1,00$. Il raggio rifratto è nell'acqua, perciò $n_2 = 1,33$. Per trovare l'angolo di rifrazione θ_2 possiamo usare la legge della rifrazione:

$$\begin{aligned} \sin \theta_2 &= \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} = \frac{(1,00)(\sin 46^\circ)}{1,33} = 0,54 \\ \theta_2 &= \sin^{-1}(0,54) = \boxed{33^\circ} \end{aligned}$$

Poiché θ_2 è minore di θ_1 , il raggio rifratto *si avvicina* alla normale, come mostra la figura 14.1A.

- ▶ Quando il raggio incidente proviene dall'acqua otteniamo:

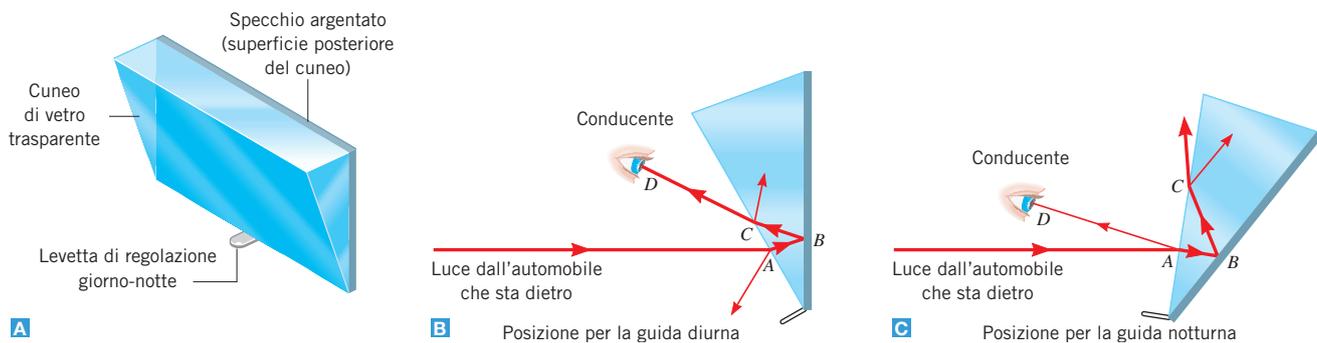
$$\begin{aligned} \sin \theta_2 &= \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} = \frac{(1,33)(\sin 46^\circ)}{1,00} = 0,96 \\ \theta_2 &= \sin^{-1}(0,96) = \boxed{74^\circ} \end{aligned}$$

Poiché θ_2 è maggiore di θ_1 , il raggio rifratto *si allontana* dalla normale, come mostra la figura 14.1B.

Problem solving

Osservazione sugli angoli di incidenza e di rifrazione

L'angolo di incidenza θ_1 e l'angolo di rifrazione θ_2 che compaiono nella legge di Snell sono gli angoli che i raggi formano con la normale alla superficie di separazione nel punto di incidenza e non quelli che i raggi formano con la superficie di separazione.


Figura 14.2

Uno specchietto retrovisore interno di un'automobile dotato di levetta per regolarne la posizione, in modo da adattarlo alla guida diurna e a quella notturna.

Fisica quotidiana


Effetto antiabbagliante negli specchietti retrovisori

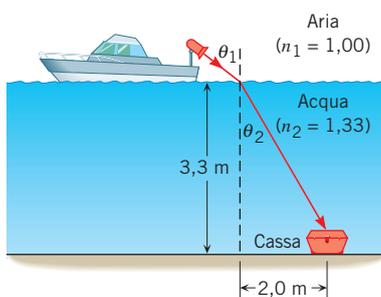
Quando un raggio di luce incide sulla superficie di separazione tra due mezzi, si formano sempre un raggio riflesso e un raggio rifratto. Questo fatto è utilizzato, per esempio, negli specchietti retrovisori delle automobili (figura 14.2A), composti da un cuneo di vetro la cui superficie posteriore è argentata e con un forte potere riflettente.

La parte B della figura mostra lo specchietto regolato per la guida di giorno. La luce proveniente dall'automobile che sta dietro arriva agli occhi del conducente lungo il cammino ABCD. Nei punti A e C si formano raggi riflessi che non giungono all'occhio del conducente. I raggi riflessi sono rappresentati con tratti molto sottili per indicare che in essi è contenuta solo una piccola percentuale (circa il 10%) della luce incidente. Quindi la maggior parte della luce è riflessa in B e giunge all'occhio del conducente, che vede un'immagine molto nitida dell'automobile che sta dietro.

Durante la guida notturna, azionando una levetta si fa ruotare lo specchietto nella posizione indicata nella parte C della figura. L'unica luce che il conducente vede è il debole raggio riflesso dalla superficie anteriore dello specchietto che segue il cammino AD, con una notevole riduzione dell'abbagliamento.

■ Profondità apparente

Una conseguenza interessante della rifrazione è il fatto che un oggetto sott'acqua sembra più vicino alla superficie di quanto è realmente.


Figura 14.3

Il fascio di luce emesso dalla torcia viene rifratto quando penetra nell'acqua.

Problem solving
Convenzione sull'annotazione degli indici di rifrazione

Ricorda che gli indici di rifrazione sono indicati con n_1 per il mezzo in cui viaggia la luce incidente e con n_2 per il mezzo in cui viaggia la luce rifratta.

ESEMPIO 2 ■ Legge della rifrazione
Trovare una cassa affondata

Il faro di una barca è utilizzato per illuminare di notte una cassa affondata (figura 14.3).

► Con quale angolo di incidenza θ_1 deve essere orientato il faro per illuminare la cassa?

Ragionamento e soluzione

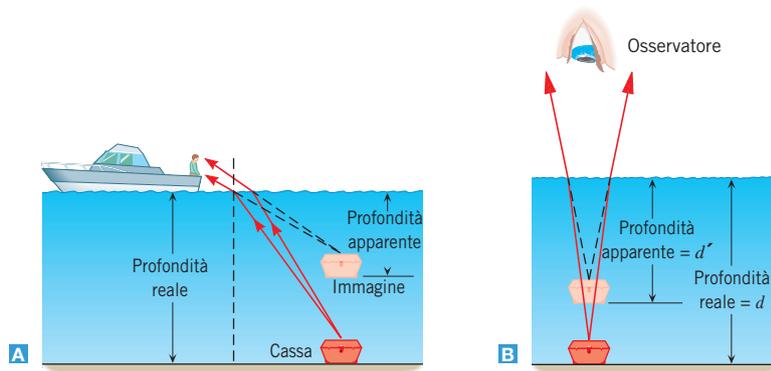
Anzitutto calcoliamo l'angolo di rifrazione θ_2 :

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{2,0 \text{ m}}{3,3 \text{ m}} \quad \text{per cui: } \theta_2 = 31^\circ$$

Gli indici di rifrazione sono $n_1 = 1,00$ per l'aria e $n_2 = 1,33$ per l'acqua; dalla legge della rifrazione si ottiene:

$$\operatorname{sen} \theta_1 = \frac{n_2 \operatorname{sen} \theta_2}{n_1} = \frac{(1,33)(\operatorname{sen} 31^\circ)}{1,00} = 0,69$$

$$\theta_1 = \operatorname{sen}^{-1}(0,69) = \boxed{44^\circ}$$


Figura 14.4

- A.** Poiché i raggi di luce provenienti dalla cassa si allontanano dalla normale quando entrano nell'aria e vengono rifratti, la profondità apparente dell'immagine è minore della profondità reale.
- B.** L'osservatore nell'aria vede la cassa da un punto posto sulla verticale che passa per la cassa.

La figura 14.4A mostra i cammini dei raggi luminosi emessi dalla cassa e osservati dalla barca. Prolungando dentro l'acqua i raggi che viaggiano nell'aria (osserva le rette tratteggiate), si vede che essi si intersecano in un punto che è l'immagine virtuale della cassa vista dall'osservatore e che questa immagine si trova a una *profondità apparente* minore della profondità reale. L'immagine è virtuale perché i raggi luminosi non passano realmente per essa.

Per la situazione rappresentata nella figura 14.4A è difficile determinare la profondità apparente. Nella parte B della figura è rappresentata una situazione molto più semplice, in cui l'osservatore è sulla verticale che passa per la cassa. In questo caso la profondità apparente d' è legata alla profondità reale d dalla relazione:

Profondità apparente, osservatore sulla verticale sopra l'oggetto

$$d' = d \frac{n_2}{n_1} \quad (14.3)$$

In questo risultato, n_1 è l'indice di rifrazione del mezzo in cui viaggiano i raggi incidenti (cioè il mezzo in cui si trova l'oggetto che emette la luce) e n_2 è l'indice di rifrazione del mezzo in cui viaggiano i raggi rifratti (cioè il mezzo in cui si trova l'osservatore).

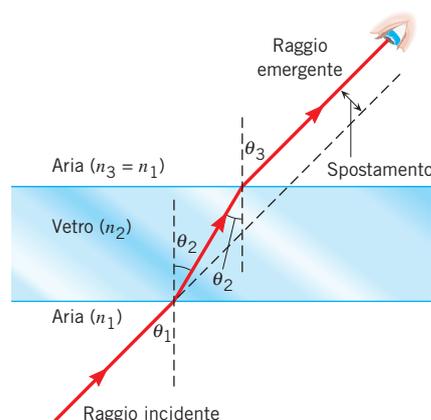
■ Raggio di luce che attraversa una lastra di materiale trasparente

Il vetro di una finestra è un esempio di una lastra di materiale trasparente a facce piane e parallele. Come mostra la figura 14.5, quando un raggio di luce attraversa il vetro, il raggio emergente è parallelo a quello incidente, ma spostato lateralmente rispetto a esso. Questo risultato può essere verificato applicando a ciascuna delle due superfici di separazione la legge della rifrazione, da cui si ottiene:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3$$

Poiché l'aria circonda il vetro, si ha $n_1 = n_3$ e quindi $\sin \theta_1 = \sin \theta_3$. Perciò $\theta_1 = \theta_3$, e quindi il raggio incidente e il raggio emergente sono paralleli.

Il raggio emergente risulta però spostato lateralmente rispetto a quello incidente. Lo spostamento dipende dall'angolo di incidenza, dallo spessore della lastra e dall'indice di rifrazione del materiale di cui è fatta la lastra. In particolare, quando lo spessore della lastra è piccolo, lo spostamento è trascurabile e la direzione del raggio incidente praticamente coincide con quella del raggio emergente.


Figura 14.5

Quando un raggio incidente attraversa una lastra di vetro a facce piane e parallele circondata dall'aria, il raggio emergente è parallelo al raggio incidente ($\theta_1 = \theta_3$), ma è spostato lateralmente rispetto a esso.

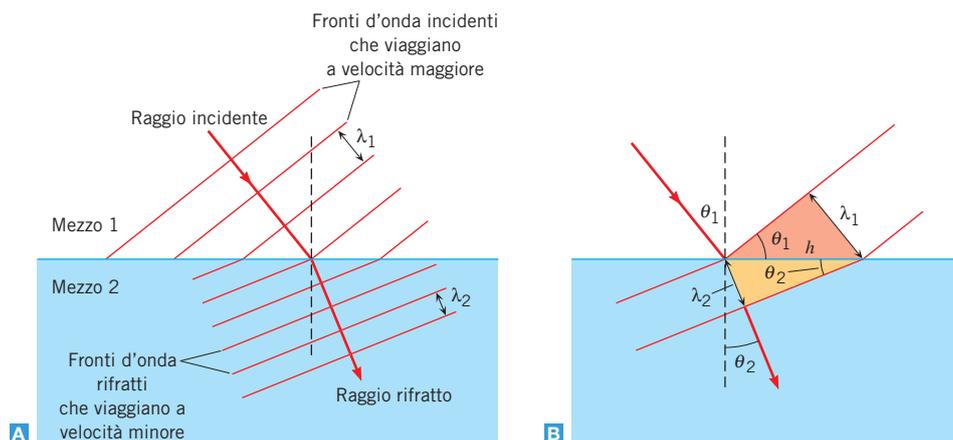
■ Dimostrazione della legge di Snell

Per dimostrare la legge di Snell, possiamo considerare quello che succede ai fronti d'onda quando la luce passa da un mezzo a un altro. La figura 14.6A mostra un raggio che passa dal mezzo 1 al mezzo 2 in cui la velocità della luce è minore: poiché $v_1 > v_2$, risulta $n_1 < n_2$. Nella figura sono rappresentati i fronti d'onda piani perpendicolari al raggio incidente e al raggio rifratto. Poiché la parte di ciascun fronte d'onda della luce incidente che penetra nel mezzo 2 rallenta, le superfici dei fronti d'onda nel mezzo 2 risultano ruotate in senso orario rispetto a quelle nel mezzo 1. Di conseguenza, come mostra la figura, il raggio incidente risulta deviato verso la normale.

Figura 14.6

A. I fronti d'onda vengono rifratti quando la luce passa dal mezzo 1 al mezzo 2.

B. Vista ingrandita del fronte d'onda incidente e del fronte d'onda rifratto alla superficie di separazione dei due mezzi.



L'onda incidente e l'onda rifratta hanno la stessa frequenza. Possiamo renderci conto di questa proprietà in termini intuitivi osservando che ogni particella del mezzo 2 posta sulla superficie di separazione è fatta oscillare dall'onda proveniente dal mezzo 1. Essa dunque oscilla con la frequenza della luce incidente ma genera a sua volta onde nel mezzo 2, che hanno quindi la stessa frequenza di quelle del mezzo 1.

Scegliamo la distanza tra due fronti d'onda successivi uguale alla lunghezza d'onda λ (figura 14.6A). Le frequenze sono uguali nei due mezzi ma le velocità di propagazione sono diverse; quindi le lunghezze d'onda sono diverse:

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{f} \quad \text{e} \quad \lambda_2 = \frac{v_2}{f}$$

Se v_1 è maggiore di v_2 , allora λ_1 è maggiore di λ_2 e quindi i fronti d'onda nel mezzo 1 sono più distanti tra loro.

La figura 14.6B mostra una visione ingrandita dei fronti d'onda incidenti e rifratti alla superficie di separazione. Gli angoli indicati con θ_1 e θ_2 nei triangoli rettangoli colorati della figura sono rispettivamente l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione. Inoltre i due triangoli hanno in comune l'ipotenusa h . Perciò si ha:

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda_1}{h} = \frac{v_1/f}{h} = \frac{v_1}{hf} \quad \text{e} \quad \text{sen } \theta_2 = \frac{\lambda_2}{h} = \frac{v_2/f}{h} = \frac{v_2}{hf}$$

Combinando queste due equazioni in un'equazione unica ed eliminando il fattore comune hf , si ottiene:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{v_2}$$

Moltiplicando entrambi i membri dell'equazione per la velocità della luce nel vuoto c e ricordando che il rapporto c/v è l'indice di rifrazione n , si ottiene l'espressione della legge di Snell:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2.$$

14.3 La riflessione totale

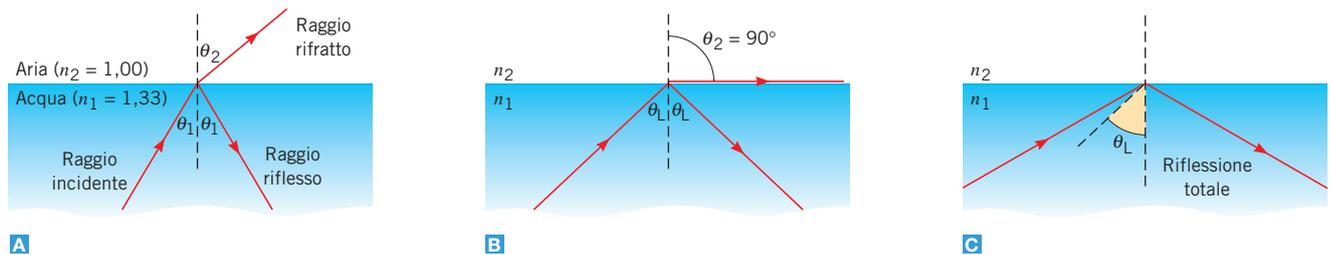
Quando la luce passa da un mezzo con indice di rifrazione maggiore a un mezzo con indice di rifrazione minore (per esempio dall'acqua all'aria), il raggio rifratto si *allontana* dalla normale, come mostra la figura 14.7A. Quando aumenta l'angolo di incidenza, aumenta anche l'angolo di rifrazione. Quando l'angolo di incidenza raggiunge un certo valore, chiamato **angolo limite** θ_L , l'angolo di rifrazione è di 90° . In questo caso il raggio rifratto è radente alla superficie di separazione, come mostra la parte B della figura. Quando l'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite, il raggio rifratto manca: tutta la luce incidente viene riflessa all'interno del mezzo da cui proveniva (figura 14.7C). Questo fenomeno è chiamato **riflessione totale**.

Per ottenere il valore dell'angolo limite imponiamo che l'angolo di rifrazione sia $\theta_2 = 90^\circ$; dalla legge della rifrazione $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin 90^\circ$ otteniamo $n_1 \sin \theta_1 = n_2$, quindi l'**angolo limite** θ_L è tale che è:

$$\sin \theta_L = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1) \quad (14.4)$$

Per esempio, l'angolo limite per la luce che si propaga dall'acqua ($n_1 = 1,33$) verso l'aria ($n_2 = 1,00$) è:

$$\theta_L = \sin^{-1} \left(\frac{1,00}{1,33} \right) = 48,8^\circ$$



FILM

La riflessione totale
Fibre ottiche

ESEMPIO 3 ■ Riflessione totale

Luce attraverso un diamante

Un raggio di luce attraversa un diamante ($n_1 = 2,42$) e colpisce la superficie di separazione tra l'aria e il diamante con un angolo di incidenza di 28° .

- Si ha riflessione totale?
- Che cosa avviene se il diamante è immerso in acqua ($n_2 = 1,33$)?

Ragionamento e soluzione

- Dall'equazione (14.4) si ricava che l'angolo limite oltre il quale avviene la riflessione totale alla superficie di separazione tra il diamante e l'aria è:

$$\theta_L = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1,00}{2,42} \right) = 24,4^\circ$$

Poiché l'angolo di incidenza di 28° è maggiore dell'angolo limite, manca il raggio rifratto e il raggio di luce viene riflesso all'interno del diamante.

- Quando il diamante è immerso nell'acqua l'angolo limite è:

$$\theta_L = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1,33}{2,42} \right) = 33,3^\circ$$

Poiché l'angolo di incidenza di 28° è minore dell'angolo limite, alla superficie di separazione tra il diamante e l'acqua il raggio di luce incidente viene rifratto nell'acqua.

Figura 14.7

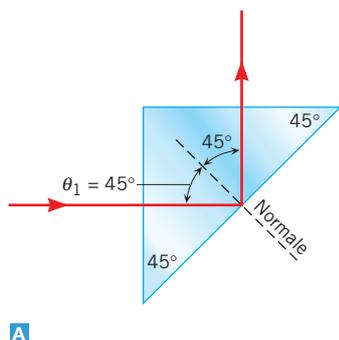
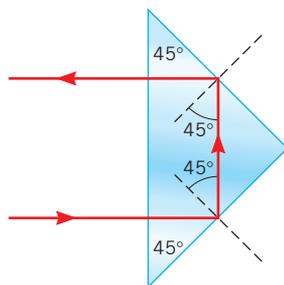
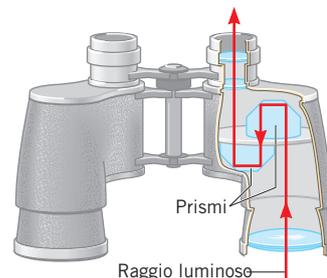
- A. Quando la luce passa da un mezzo con indice di rifrazione maggiore (per esempio l'acqua) a un mezzo con indice di rifrazione minore (per esempio l'aria), il raggio rifratto si allontana dalla normale.
B. Quando l'angolo di incidenza è uguale all'angolo limite θ_L , l'angolo di rifrazione è di 90° .
C. Quando θ_1 è maggiore di θ_L , il raggio rifratto manca e si verifica la riflessione totale.

Fisica quotidiana

Perché i brillanti scintillano



I brillanti, gemme che si ottengono sfaccettando i diamanti grezzi, sono famosi per lo scintillio che producono quando sono colpiti dalla luce. Per ottenere questo effetto le facce del brillante sono tagliate ad angoli tali che la quasi totalità dei raggi di luce all'interno subiscono riflessione totale sul fondo del brillante e riemergono dalle facce superiori.


A

B

C
Figura 14.8

La riflessione totale alla superficie di separazione vetro-aria può essere usata per far deviare un raggio di luce di 90° (**A**) o 180° (**B**).

C. Applicazione della doppia riflessione totale nei prismi di un binocolo.

Molti strumenti ottici – come i binocoli, i periscopi e i telescopi – impiegano prismi di vetro che provocano la riflessione totale per far ruotare di 90° o di 180° un fascio di luce. La figura 14.8A mostra un raggio di luce che entra in un prisma di vetro ($n_1 = 1,5$) con una sezione trasversale che ha la forma di un triangolo retto isoscelele (cioè con angoli di 45° , 45° e 90°) e che va a colpire l'ipotenusa di questo triangolo con un angolo di incidenza $\theta_1 = 45^\circ$. L'angolo limite per una superficie di separazione vetro-aria è:

$$\theta_L = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1,0}{1,5} \right) = 42^\circ$$

Poiché l'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite, la luce incidente sull'ipotenusa viene totalmente riflessa all'interno del prisma e il raggio emergente dal prisma mostrato in figura è diretto verticalmente verso l'alto, cioè è ruotato di 90° rispetto al raggio entrato nel prisma.

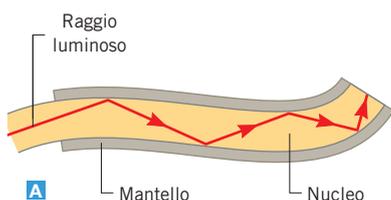
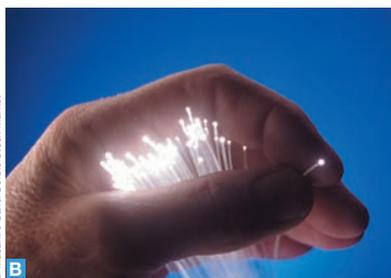
La parte **B** della figura mostra come lo stesso prisma possa far ruotare il raggio di 180° quando si ha una doppia riflessione totale. I prismi possono anche essere usati in coppia per provocare uno spostamento laterale dei raggi di luce senza cambiarne la direzione originale. La figura 14.8C mostra un'applicazione di questo tipo nel doppio prisma di un binocolo.

Un'importante applicazione della riflessione totale si trova nelle fibre ottiche, dove fili di vetro o di plastica sottili come capelli, chiamati appunto **fibre ottiche**, «guidano» la luce da un posto a un altro. La figura 14.9A mostra che una fibra ottica è formata da un *nucleo* cilindrico interno, attraverso il quale viaggia la luce, e da una parete esterna concentrica al nucleo, chiamata *mantello*. Il nucleo è fatto di vetro o di plastica trasparente con un indice di rifrazione relativamente grande. Anche il mantello è fatto di vetro, ma di un tipo che ha un indice di rifrazione relativamente piccolo.

La luce entra in un estremo del nucleo, colpisce la superficie di separazione nucleo-mantello con un angolo maggiore dell'angolo limite e perciò viene riflessa totalmente all'interno del nucleo. In questo modo la luce continua a viaggiare all'interno della fibra ottica seguendo un percorso a zig-zag.

In una fibra ottica ben progettata l'assorbimento della luce da parte del nucleo è molto basso e quindi la luce può viaggiare per molti chilometri senza diminuire di intensità in quantità apprezzabili.

Le fibre ottiche (figura 14.9B) sono spesso raggruppate insieme in modo da formare dei cavi. Poiché le fibre sono sottilissime, anche i cavi di fibre ottiche sono molto sottili e flessibili e riescono a passare attraverso luoghi inaccessibili ai cavi metallici, che hanno un diametro molto maggiore. Inoltre la capacità di trasporto di informazioni delle fibre ottiche è migliaia di volte superiore a quella dei cavi elettrici.


A

B
Figura 14.9

A. La luce rimane confinata all'interno di una fibra ottica grazie al fenomeno della riflessione totale.

B. Luce trasportata da varie fibre ottiche.

Fisica quotidiana

Le fibre ottiche



14.4 La dispersione della luce

La figura 14.10A mostra il fenomeno della **dispersione** della luce: un fascio di luce bianca incidente su un prisma è scomposto in una serie di raggi di diverso colore che formano lo **spettro della luce**. I colori dello spettro sono nell'ordine: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto.

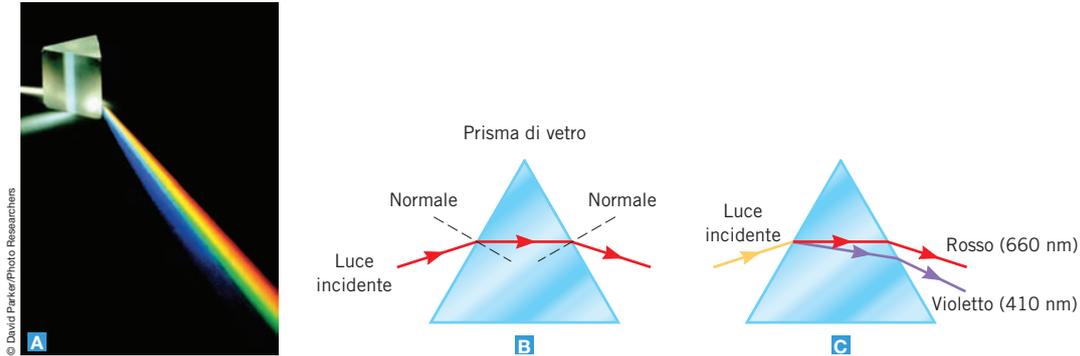


Figura 14.10

A. La luce bianca è dispersa nelle sue componenti colorate quando attraversa un prisma.
B. Quando un raggio di luce attraversa un prisma di vetro a sezione triangolare circondato dall'aria viene rifratto due volte.

C. Due colori diversi subiscono deviazioni diverse quando attraversano il prisma. Per maggiore chiarezza, nel disegno è stato esagerato l'angolo di deviazione.

Per comprendere l'origine di questo fenomeno, scoperto da Newton alla fine del Seicento, consideriamo un raggio di luce di un dato colore, per esempio rosso, che incide sulla faccia di un prisma triangolare di vetro (figura 14.10B). Il raggio rifratto è deviato verso la normale, perché l'indice di rifrazione del vetro è maggiore di quello dell'aria. Quando il raggio di luce esce dalla faccia di destra del prisma, il raggio rifratto si allontana dalla normale, perché l'indice di rifrazione dell'aria è minore di quello del vetro. Perciò l'effetto complessivo del prisma è quello di cambiare la direzione del raggio, facendolo deviare verso il basso sia quando entra nel prisma sia quando ne esce.

Poiché l'indice di rifrazione del vetro dipende dal colore della luce e quindi, come vedremo, dalla lunghezza d'onda della luce (tabella 14.2), i raggi luminosi di colori diversi sono deviati verso il basso con angoli diversi. Quanto maggiore è l'indice di rifrazione per un dato colore, tanto maggiore è l'angolo di deviazione: la parte C della figura mostra i raggi rifratti corrispondenti ai raggi incidenti di colore rosso e violetto, cioè i colori ai due estremi dello spettro della luce visibile.

Tabella 14.2 Indici di rifrazione del vetro Crown per alcuni colori

Colore	Indice di rifrazione n
Rosso	1,520
Arancione	1,522
Giallo	1,523
Verde	1,526
Blu	1,531
Violetto	1,538

■ L'arcobaleno

Un esempio spettacolare di dispersione della luce è costituito dagli arcobaleni, in cui i diversi colori hanno origine dalla rifrazione della luce solare da parte delle gocce d'acqua. In genere, capita di vedere un arcobaleno quando sta finendo un temporale e si guarda verso le ultime gocce di pioggia nell'aria con le spalle al Sole.

Quando la luce proveniente dal Sole entra in una goccia d'acqua di forma sferica, come quella della figura 14.11, i diversi colori della luce vengono deviati di un angolo che dipende dall'indice di rifrazione dell'acqua per la luce di quel colore. Dopo essere stati riflessi dalla superficie posteriore della goccia, i raggi dei diversi colori vengono rifratti di nuovo quando riemergono nell'aria.

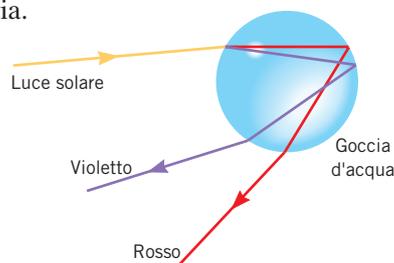


Figura 14.11

Quando la luce solare emerge da una goccia d'acqua viene dispersa nei colori che la compongono, di cui solo due sono rappresentati nella figura.

 **Fisica quotidiana**
L'arcobaleno

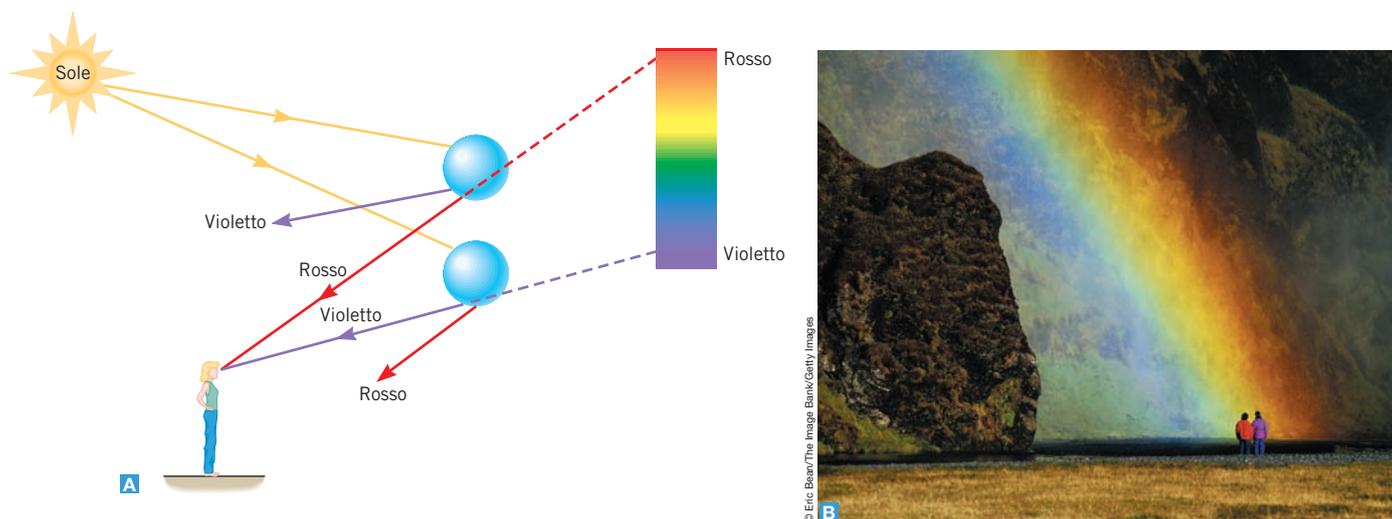


Figura 14.12

- A. I colori dell'arcobaleno hanno origine da gocce d'acqua poste ad altezze diverse.
- B. L'arcobaleno ai piedi di una cascata.

Anche se ciascuna goccia disperde la luce solare in tutti i colori dello spettro della luce visibile, l'osservatore della figura 14.12A vede solo un colore emergere da ciascuna goccia, perché solo uno dei colori viaggia nella direzione giusta per giungere al suo occhio. Tuttavia, in un arcobaleno si vedono tutti i colori dello spettro della luce solare (figura 14.12B), perché ciascun colore proviene da gocce diverse poste ad altezze diverse.

14.5 Le lenti

Le lenti sono impiegate in molti strumenti ottici, come gli occhiali, le macchine fotografiche e i telescopi. Una **lente sferica** è un corpo di materiale trasparente delimitato da due superfici sferiche (figura 14.13). La retta che passa per i centri di curvatura delle due superfici è detta **asse ottico** della lente. Il **centro** della lente è il punto sull'asse ottico che ha la stessa distanza da ciascuna delle superfici. Nel seguito studieremo le proprietà delle **lenti sottili**, cioè di quelle lenti che hanno uno spessore molto più piccolo dei raggi delle superfici sferiche che le delimitano.

Figura 14.13

- A. Lente convessa. B. Lente concava.

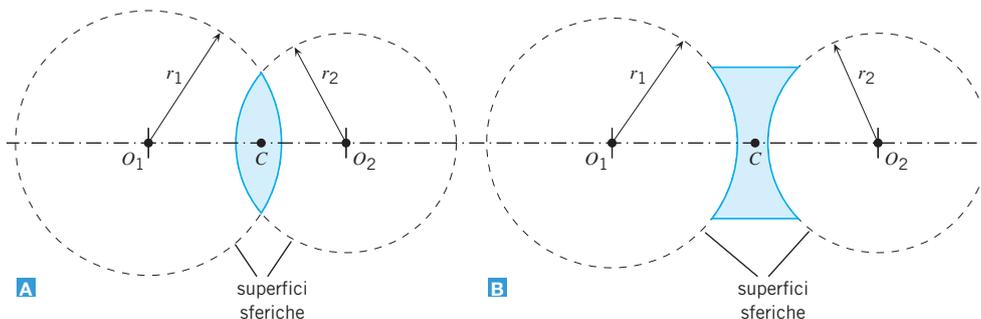
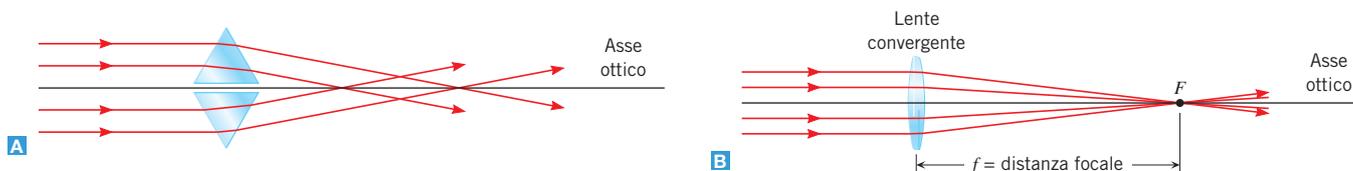


Figura 14.14

- A. I due prismi di vetro disposti come in figura fanno deviare i raggi paralleli all'asse ottico che li attraversano in modo che i raggi emergenti intersechino l'asse in punti diversi.
- B. Quando i raggi parassiali paralleli all'asse ottico attraversano una lente convergente, i raggi che emergono dalla lente convergono verso il fuoco F della lente.

■ Lenti convergenti e lenti divergenti

Prendiamo in esame due tipi di lenti sottili: le lenti convergenti e le lenti divergenti. Una **lente convergente** devia i raggi che incidono su di essa parallelamente all'asse ottico e li fa convergere in un punto sull'asse ottico detto **fuoco F** (figura 14.14B).



Una **lente divergente** devia i raggi che incidono su di essa parallelamente all'asse ottico e li fa divergere come se provenissero da un punto sull'asse ottico, detto **fuoco** F (figura 14.15B).

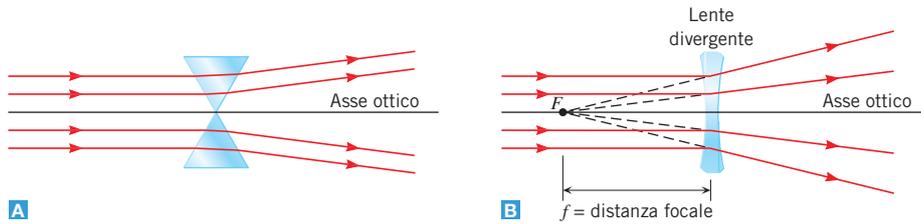


Figura 14.15

A. I due prismi di vetro disposti come in figura fanno deviare i raggi paralleli all'asse ottico che li attraversano in modo che i raggi emergenti siano divergenti.
B. Quando i raggi parassiali paralleli all'asse ottico attraversano una lente divergente, i raggi che emergono dalla lente sono divergenti e sembrano provenire dal fuoco F della lente.

La distanza tra il fuoco e il centro di una lente è chiamata **distanza focale** f della lente.

Come mostra la figura 14.16, le lenti convergenti e divergenti possono avere varie forme. In generale, le lenti convergenti sono più spesse al centro che ai bordi, mentre le lenti divergenti sono più sottili al centro che ai bordi.



Figura 14.16

Le lenti convergenti e quelle divergenti possono avere varie forme.

14.6 Immagini formate da lenti

■ I diagrammi dei raggi

Per determinare la posizione e le dimensioni dell'immagine formata da una lente sottile sono molto utili i diagrammi dei raggi, che abbiamo già visto nel capitolo precedente per le immagini formate dagli specchi. Le lenti sono però diverse dagli specchi, perché i raggi luminosi possono incidere su ciascuna delle due facce della lente. Perciò, quando si tracciano i diagrammi dei raggi, bisogna anzitutto conoscere i fuochi F da entrambe le parti della lente: ognuno dei due fuochi si trova sull'asse ottico a una distanza dalla lente uguale alla distanza focale.

Per tracciare i diagrammi dei raggi sono particolarmente utili tre raggi parassiali che partono dal punto più alto dell'oggetto e che sono indicati con 1, 2 e 3 nelle figure 14.17 e 14.18, in cui l'oggetto è rappresentato da una freccia. Per tracciare i loro cammini usiamo le seguenti convenzioni.

■ DIAGRAMMA DEI RAGGI PER LENTI CONVERGENTI (OGGETTO A SINISTRA DELLALENTE) (figura 14.17)

Raggio 1. Questo raggio incidente è parallelo all'asse ottico. Dopo aver attraversato la lente, il raggio rifratto passa per il fuoco a destra della lente (parte A).

Raggio 2. Questo raggio incidente passa per il fuoco a sinistra della lente e viene rifratto in direzione parallela all'asse ottico (parte B).

Raggio 3. Questo raggio incidente è diretto verso il centro della lente sottile e la attraversa senza essere praticamente deviato (parte C).

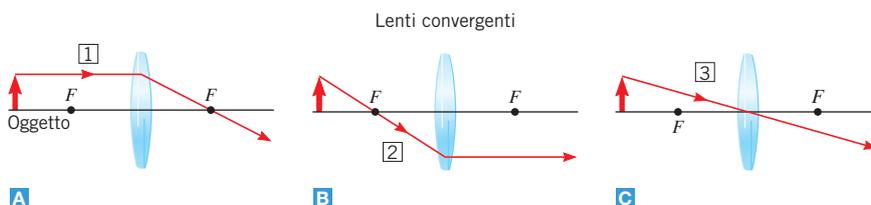


Figura 14.17

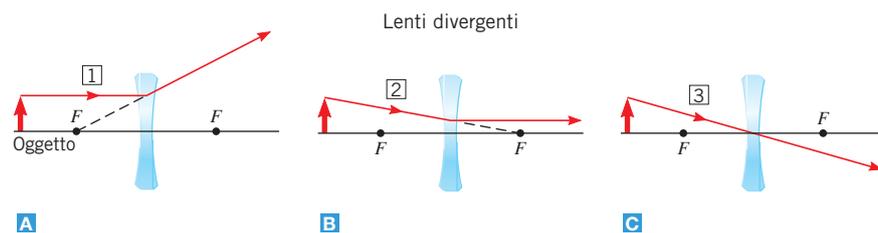
I raggi rappresentati in figura sono utili per determinare il tipo di immagine formata da una lente convergente.

■ DIAGRAMMA DEI RAGGI PER LENTI DIVERGENTI (OGGETTO A SINISTRA DELLALENTE) (figura 14.18)

Raggio 1. Questo raggio incidente è parallelo all'asse ottico. Dopo aver attraversato la lente il raggio rifratto *sembra* provenire dal fuoco a sinistra della lente. Il raggio tratteggiato nella parte **A** rappresenta il cammino apparente del raggio che esce dalla lente.

Raggio 2. Questo raggio incidente è diretto verso il fuoco a destra della lente ed è rifratto parallelamente all'asse ottico. Il raggio tratteggiato nella parte **B** rappresenta il cammino che il raggio percorrerebbe se non ci fosse la lente.

Raggio 3. Questo raggio incidente è diretto verso il centro della lente sottile e la attraversa senza essere praticamente deviato (parte **C**).

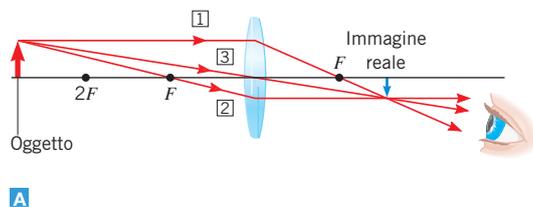
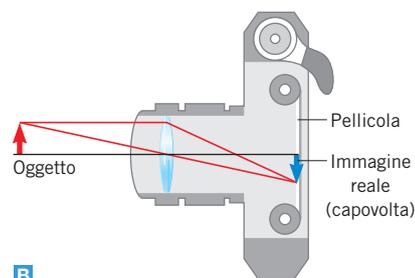

Figura 14.18

I raggi rappresentati in figura sono utili per determinare il tipo di immagine formato da una lente divergente.

Sia nelle lenti convergenti sia in quelle divergenti, il raggio 3 non viene deviato in modo apprezzabile da una lente sottile, in cui le superfici nella zona centrale sono praticamente parallele. Perciò la lente si comporta in entrambi i casi come una lastra piana a facce parallele (figura 14.5). Poiché lo spessore della lente è piccolo, le direzioni del raggio incidente e di quello rifratto sono praticamente coincidenti.

■ Immagini formate da una lente convergente

Nella figura 14.19A l'oggetto si trova a una distanza da una lente convergente maggiore del doppio della distanza focale (cioè più lontana del punto indicato con $2F$). Per trovare l'immagine si possono disegnare due qualunque dei tre raggi 1, 2 e 3 che partono dal punto superiore dell'oggetto. Il punto a destra della lente in cui si intersecano i tre raggi rifratti è l'immagine del punto da cui i raggi provengono. Il diagramma dei raggi mostra che l'immagine dell'oggetto è reale, capovolta e rimpicciolita rispetto all'oggetto. La disposizione illustrata in figura 14.19A è simile a quella impiegata in una macchina fotografica, in cui una superficie sensibile alla luce, posta nella parte posteriore della macchina, raccoglie i raggi provenienti dalla lente (l'obiettivo) e registra l'immagine dell'oggetto (figura 14.19B).


A

B
Figura 14.19

A. Quando l'oggetto si trova a sinistra del punto indicato con $2F$, l'immagine formata dalla lente è reale, capovolta e rimpicciolita.

B. La disposizione degli oggetti e delle lenti indicata nella parte A della figura è simile a quella impiegata nelle macchine fotografiche.

Fisica quotidiana


Una macchina fotografica

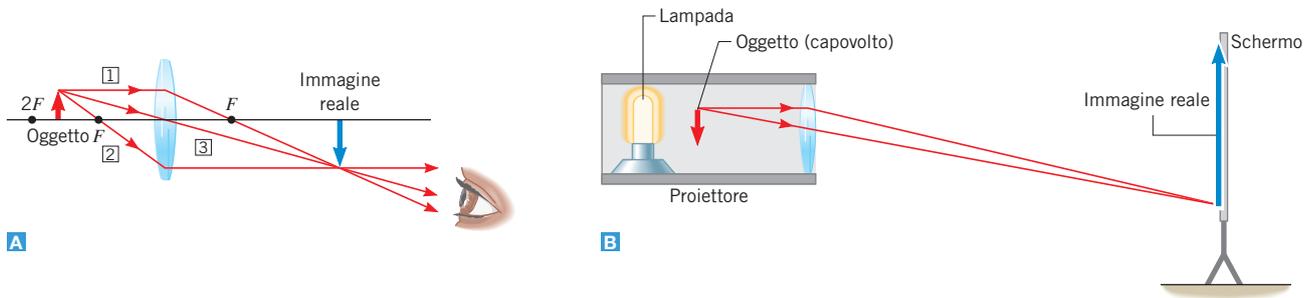


Figura 14.20

A. Quando l'oggetto si trova tra i punti F e $2F$, l'immagine formata dalla lente è reale, capovolta e ingrandita rispetto all'oggetto.

B. La disposizione degli oggetti e delle lenti indicata nella parte **A** della figura è simile a quella impiegata nei proiettori.

Quando l'oggetto si trova tra i punti F e $2F$, come nel caso della figura 14.20A l'immagine è reale e capovolta rispetto all'oggetto, ma risulta più grande dell'oggetto. Questo tipo di disposizione è impiegato nei proiettori di diapositive o di pellicole, in cui l'oggetto è una piccola parte di pellicola e l'immagine ingrandita viene raccolta su uno schermo (figura 14.20B). Naturalmente, per ottenere un'immagine dritta, la pellicola va inserita nel proiettore capovolta.

Quando l'oggetto si trova tra il fuoco e la lente, come nella figura 14.21A, i raggi divergono dopo aver attraversato la lente. A un osservatore che li guarda, questi raggi sembrano provenire da un'immagine posta dietro la lente, cioè a sinistra della lente. Poiché nessuno di questi raggi proviene realmente dall'immagine, l'immagine è virtuale. Inoltre il diagramma dei raggi mostra che l'immagine è dritta e ingrandita. Come si può vedere nella parte B della figura, le lenti di ingrandimento sfruttano questa disposizione.



Fisica quotidiana

Un proiettore per diapositive

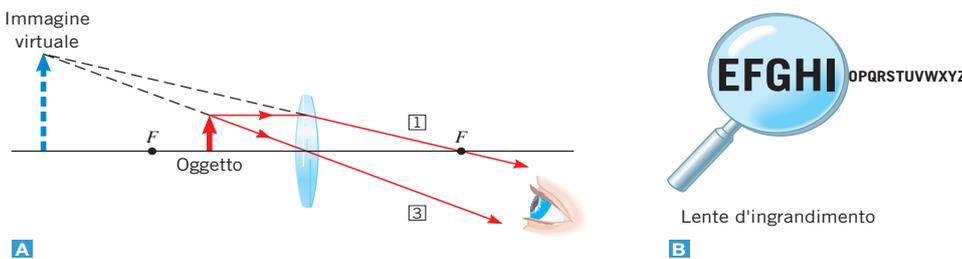


Figura 14.21

A. Quando un oggetto è posto tra il fuoco F di una lente convergente e la lente, si forma un'immagine virtuale, dritta e ingrandita dell'oggetto.

B. Questo tipo di immagine si può vedere quando si guarda attraverso una lente d'ingrandimento.

■ **Immagini formate da una lente divergente**

Dopo aver attraversato una lente divergente, i raggi divergono come mostra la figura 14.22A, e il diagramma dei raggi indica che si forma un'immagine virtuale a sinistra della lente. In effetti, indipendentemente dalla posizione dell'oggetto, una lente divergente forma sempre un'immagine virtuale, dritta e rimpicciolita rispetto all'oggetto.

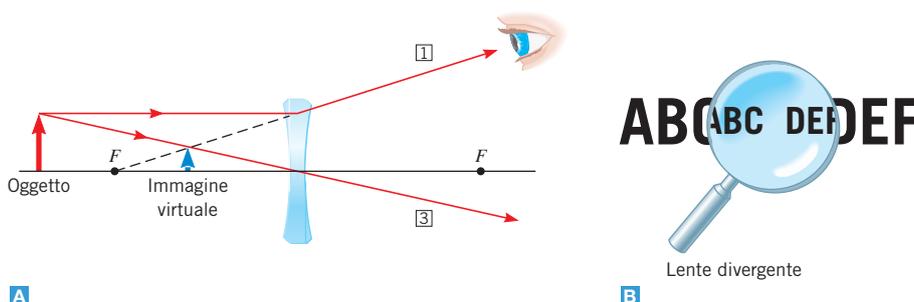


Figura 14.22

A. Una lente divergente forma sempre un'immagine virtuale di un oggetto reale. L'immagine è dritta e rimpicciolita rispetto all'oggetto.

B. Un'immagine vista attraverso una lente divergente.

14.7 L'equazione delle lenti sottili

■ Equazione delle lenti sottili. Ingrandimento lineare

Per determinare con precisione le caratteristiche dell'immagine di un oggetto formata da una lente sottile si possono usare le due seguenti equazioni:

$$\text{Equazione delle lenti sottili} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (14.5)$$

$$\text{Equazione dell'ingrandimento lineare} \quad G = \frac{\text{altezza dell'immagine } h_i}{\text{altezza dell'immagine } h_o} = -\frac{q}{p} \quad (14.6)$$

La figura 14.23 mostra il significato dei simboli che compaiono nelle due equazioni precedenti con riferimento a una lente sottile convergente, ma le equazioni sono valide anche per una lente divergente, purché sottile.

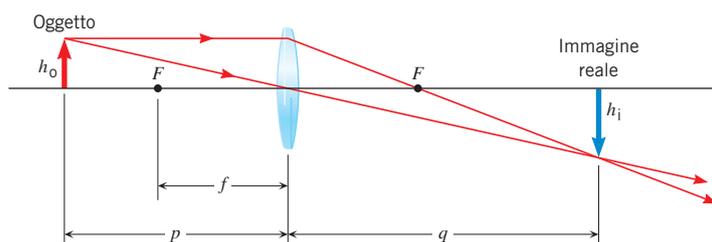


Figura 14.23

La figura mostra la distanza focale f , la distanza dell'oggetto p e la distanza dell'immagine q per una lente convergente. Le altezze dell'oggetto e dell'immagine sono indicate rispettivamente con h_o e h_i .

Per utilizzare correttamente le due equazioni precedenti bisogna ricordare alcune **convenzioni sui segni**, elencate nel caso di raggi che provengono da un oggetto reale a sinistra della lente.

■ RIEPILOGO DELLA CONVENZIONE SUI SEGNI PER LE LENTI SOTTILI

Distanza focale

$f > 0$ per una lente convergente

$f < 0$ per una lente divergente

Distanza dell'oggetto

$p > 0$ se l'oggetto è a sinistra della lente (oggetto reale), come avviene di solito

$p < 0$ se l'oggetto è a destra della lente (oggetto virtuale) (*)

Distanza dell'immagine

$q > 0$ se l'immagine di un oggetto reale è reale e si forma a destra della lente

$q < 0$ se l'immagine di un oggetto reale è virtuale e si forma a sinistra della lente

Ingrandimento lineare

$G > 0$ se l'immagine è diritta rispetto all'oggetto

$G < 0$ se l'immagine è capovolta rispetto all'oggetto

ESEMPIO 4 ■ Equazione delle lenti sottili

L'immagine reale formata dall'obiettivo di una macchina fotografica

Una persona alta 1,70 m è in piedi davanti a una macchina fotografica a una distanza di 2,50 m da essa. La macchina fotografica ha un obiettivo formato da una lente convergente con una distanza focale di 0,0500 m.

(*) Questa situazione può verificarsi quando un sistema ottico contiene più di una lente e l'immagine formata dalla prima lente funziona come oggetto per la seconda. In questo caso l'oggetto della seconda lente può trovarsi alla sua destra e la convenzione dei segni stabilisce che la distanza dell'oggetto sia negativa e che l'oggetto sia considerato un oggetto virtuale.

- Trova la distanza dell'immagine (cioè la distanza tra l'obiettivo e la pellicola) e determina se l'immagine è reale o virtuale.
- Calcola l'ingrandimento e l'altezza dell'immagine sulla pellicola.

Ragionamento

La posizione dell'oggetto è simile a quella della figura 14.19A, in cui la distanza dell'oggetto dalla lente è maggiore del doppio della distanza focale. Perciò ci aspettiamo che l'immagine sia reale, capovolta e rimpicciolita.

Soluzione

- Usando l'equazione delle lenti sottili con $p = 2,50$ m e $f = 0,0500$ m, otteniamo:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{0,0500 \text{ m}} - \frac{1}{2,50 \text{ m}} = 19,6 \text{ m}^{-1} \quad \text{da cui: } \boxed{q = 0,0510 \text{ m}}$$

Poiché il valore di q è positivo, l'immagine che si forma sulla pellicola è reale.

- Dall'equazione dell'ingrandimento troviamo che il valore di G è:

$$G = -\frac{q}{p} = -\frac{0,0510 \text{ m}}{2,50 \text{ m}} = \boxed{-0,0204}$$

L'immagine è più piccola dell'oggetto (perché $G < 1$) ed è capovolta (perché $G < 0$). Poiché l'altezza dell'oggetto è $h_o = 1,70$ m, l'altezza dell'immagine è:

$$h_i = Gh_o = (-0,0204)(1,70 \text{ m}) = \boxed{-0,0347 \text{ m}}$$

Problem solving

Osservazione sull'equazione delle lenti sottili

Dall'equazione delle lenti sottili si ricava che il reciproco della distanza dell'immagine q è $q^{-1} = f^{-1} - p^{-1}$, dove f è la distanza focale e p è la distanza dell'oggetto. Perciò, dopo aver combinato i valori di f^{-1} e p^{-1} , è importante non dimenticare di calcolare il reciproco del risultato trovato per determinare q .

ESEMPIO 5 ■ Equazione delle lenti sottili

L'immagine virtuale formata da una lente divergente

Un oggetto è posto a una distanza di 7,10 cm a sinistra di una lente divergente che ha una distanza focale $f = -5,08$ cm.

- Trova la distanza dell'immagine e dimostra che l'immagine è virtuale.
- Calcola l'ingrandimento.

Ragionamento

La situazione è simile a quella della figura 14.22A. Il diagramma dei raggi mostra che l'immagine è virtuale, diritta e rimpicciolita rispetto all'oggetto.

Soluzione

- Per trovare la distanza dell'immagine possiamo usare l'equazione delle lenti sottili:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{-5,08 \text{ m}} - \frac{1}{7,10 \text{ m}} = -0,338 \text{ cm}^{-1} \quad \text{da cui: } \boxed{q = -2,96 \text{ m}}$$

Il valore negativo di q indica che l'immagine è virtuale e si forma a sinistra della lente.

- Poiché q e p sono note, dall'equazione dell'ingrandimento si ottiene:

$$G = -\frac{q}{p} = -\frac{-2,96 \text{ m}}{7,10 \text{ m}} = \boxed{0,417}$$

L'immagine è diritta (perché $G > 0$) e rimpicciolita rispetto all'oggetto (perché $G < 1$).

■ Dimostrazione delle equazioni delle lenti sottili e dell'ingrandimento lineare

Consideriamo i raggi 1 e 3 della figura 14.24A. Il raggio 1 è rappresentato separatamente nella parte B della figura, in cui l'angolo θ è uguale nei due triangoli rettangoli colorati. Perciò anche $\text{tg } \theta$ è uguale nei due triangoli:

$$\text{tg } \theta = \frac{h_o}{f} = \frac{-h_i}{q - f}$$

Il segno meno del numeratore della frazione $-h_i/(q - f)$ è stato inserito per il seguente motivo: nella figura 14.24B l'angolo θ è considerato positivo e, poiché l'immagine è capovolta, l'altezza dell'immagine h_i è negativa. Inserendo il segno meno il valore di $-h_i/(q - f)$, e quindi anche quello di $\text{tg } \theta$, è un numero positivo.

Il raggio 3 è rappresentato separatamente nella parte C della figura, in cui sono uguali gli angoli θ' dei triangoli rettangoli colorati. Perciò si ha:

$$\text{tg } \theta' = \frac{h_o}{p} = \frac{-h_i}{q}$$

Il segno meno del numeratore della frazione $-h_i/q$ è stato inserito, come nel caso precedente, per assicurare che $\text{tg } \theta'$ sia un numero positivo.

Dalle due equazioni precedenti si ottiene rispettivamente:

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{q - f}{f} \quad \text{e} \quad \frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p}$$

Uguagliando le due espressioni di h_i/h_o e disponendo opportunamente i termini, si ottiene l'equazione delle lenti sottili:

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

L'equazione dell'ingrandimento si ricava direttamente dall'equazione $h_i/h_o = -q/p$ ricordando che il rapporto h_i/h_o è l'ingrandimento G della lente.

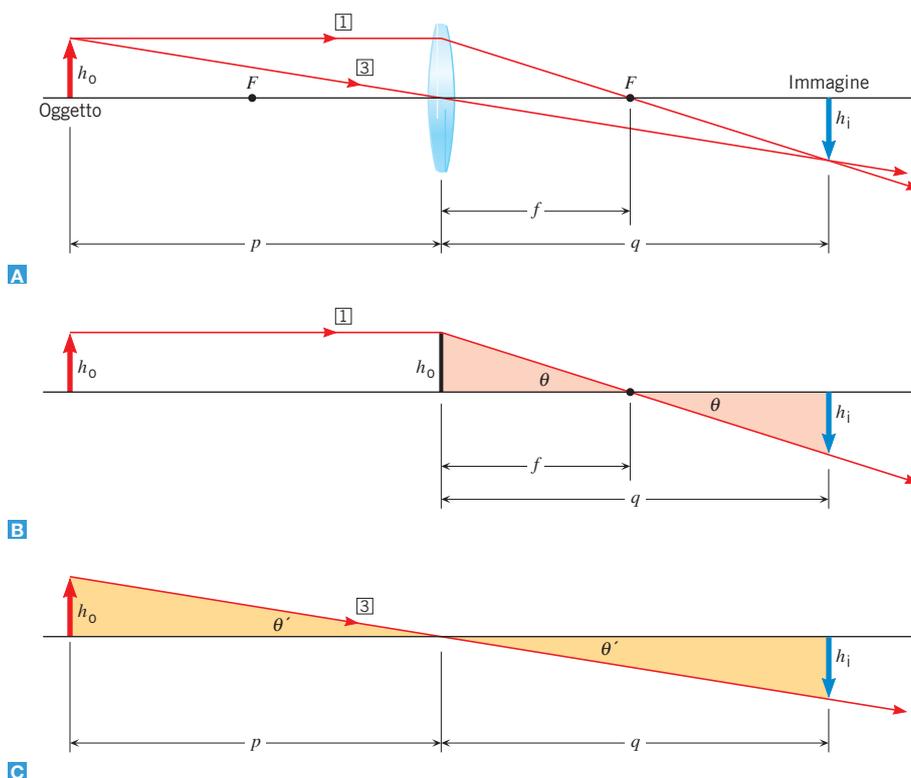


Figura 14.24

Questi diagrammi dei raggi sono utilizzati nel testo per ricavare l'equazione delle lenti sottili e l'equazione dell'ingrandimento.

14.8 Combinazioni di lenti

Gli strumenti ottici, come il microscopio o il telescopio, usano particolari combinazioni di lenti per ottenere immagini degli oggetti con un ingrandimento maggiore di quello fornito da ciascuna singola lente.

Per esempio, la figura 14.25A mostra il sistema a due lenti usato nei microscopi. La lente più vicina all'oggetto è detta **obiettivo**, mentre quella più vicina all'occhio dell'osservatore è detta **oculare**. L'oggetto è posto appena oltre il fuoco F_o dell'obiettivo. L'immagine formata dall'obiettivo, indicata in figura come *prima immagine*, è reale, capovolta e ingrandita rispetto all'oggetto. La prima immagine serve come oggetto per l'oculare. Poiché la prima immagine si forma fra l'oculare e il suo fuoco F_e , l'oculare ne forma un'immagine virtuale e ingrandita che è raccolta dall'occhio dell'osservatore.

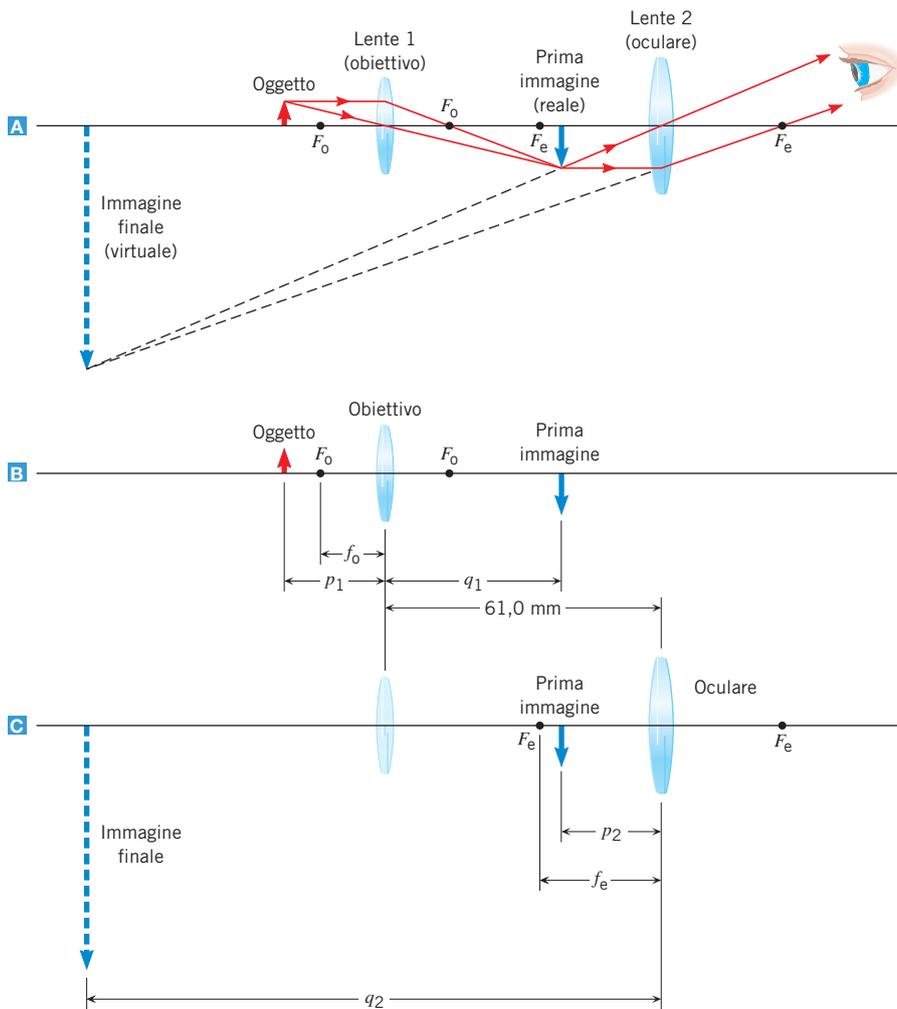


Figura 14.25

- A. La combinazione di due lenti convergenti raffigurata può essere usata come microscopio composto per produrre un'immagine virtuale, ingrandita e capovolta di un oggetto.
 B. L'obiettivo forma la prima immagine.
 C. L'oculare forma l'immagine finale.

La posizione dell'immagine finale formata da una combinazione di lenti può essere determinata applicando l'equazione delle lenti sottili a ciascuna di esse separatamente. L'importante è ricordare che l'immagine prodotta da una lente serve come oggetto per la lente successiva. Inoltre si può dimostrare quanto segue:

■ INGRANDIMENTO LINEARE DELLA COMBINAZIONE DI DUE LENTI

L'ingrandimento lineare G di una combinazione di due lenti è il prodotto degli ingrandimenti G_1 e G_2 di ciascuna di esse:

$$G = G_1 \cdot G_2 \quad (14.7)$$

ESEMPIO 6 ■ Combinazione di lenti
L'unione fa la forza: due lenti diventano un microscopio

L'obiettivo e l'oculare del microscopio composto della figura 14.25 sono lenti convergenti con distanze focali $f_o = 15,0$ mm e $f_e = 25,5$ mm. La distanza fra le due lenti è 61,0 mm. Un oggetto è posto a 24,1 mm dall'oculare.

► Calcola a quale distanza il microscopio forma l'immagine dell'oggetto.

Ragionamento e soluzione

Mediante l'equazione delle lenti sottili, calcoliamo la distanza della prima immagine, quella formata dall'obiettivo (parte B della figura):

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_o} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{15,0 \text{ mm}} - \frac{1}{24,1 \text{ mm}} = 0,0252 \text{ mm}^{-1}$$

e quindi $q_1 = 39,7$ mm. La prima immagine diventa l'oggetto per l'oculare (parte C della figura), da cui dista:

$$p_2 = 61,0 \text{ mm} - 39,7 \text{ mm} = 21,3 \text{ mm}$$

Applicando l'equazione delle lenti sottili all'oculare, otteniamo:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_e} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{25,5 \text{ mm}} - \frac{1}{21,3 \text{ mm}} = -0,0077 \text{ mm}^{-1}$$

e quindi:

$$q_2 = \boxed{-130 \text{ mm}}$$

Il segno meno indica che l'immagine è virtuale e si forma a sinistra dell'oculare.

14.9 L'occhio

■ Anatomia

L'occhio, di cui la figura 14.26 mostra alcune delle componenti anatomiche principali, ha una forma approssimativamente sferica, con un diametro di circa 25 mm.

La luce entra nell'occhio attraverso una membrana trasparente chiamata *cornea*, che delimita una regione piena di un liquido trasparente (l'*umor acqueo*), dietro la quale si trovano un diaframma (l'*iride*), una lente chiamata *cristallino*, una regione riempita con una stanza gelatinosa (l'*umor vitreo*) e infine la *retina*. La retina è la parte dell'occhio sensibile alla luce ed è formata da milioni di cellule chiamate *coni* e *bastoncelli*. Quando sono stimolate dalla luce, queste cellule inviano tramite il *nervo ottico*, impulsi elettrici al cervello, che interpreta l'immagine formata sulla retina.

L'iride è la parte colorata dell'occhio e regola la quantità di luce che raggiunge la retina; si comporta infatti come un diaframma muscolare con un'apertura centrale di dimensioni variabili, chiamata *pupilla*, attraverso cui entra la luce. Il diametro della pupilla può variare circa da 2 a 7 mm, restringendosi quando c'è molta luce e dilatandosi quando c'è poca luce.

Una caratteristica di importanza fondamentale per il funzionamento dell'occhio è che il cristallino è flessibile e la sua forma può essere modificata dai *muscoli ciliari*, che sono collegati a esso attraverso i *legamenti sospensori*. La capacità del cristallino di cambiare forma è alla base della capacità dell'occhio di mettere a fuoco gli oggetti.

■ Ottica

Dal punto di vista ottico, l'occhio umano è simile a una macchina fotografica: entrambi hanno un sistema di lenti e un diaframma con un'apertura di dimensioni variabili al centro. Inoltre la retina dell'occhio e la pellicola della macchina foto-

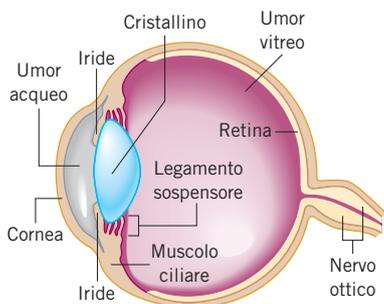


Figura 14.26

Un occhio umano visto in sezione verticale.

Fisica quotidiana

L'occhio umano



grafica svolgono funzioni simili, perché entrambe registrano l'immagine formata dal sistema di lenti. L'immagine che si forma sulla retina è reale, capovolta e più piccola dell'oggetto, e lo stesso avviene per l'immagine che si forma sulla pellicola di una macchina fotografica. Anche se l'immagine che si forma sulla retina è capovolta, il cervello la interpreta come dritta.

Per vedere un oggetto nitidamente, l'occhio deve rifrangere i raggi incidenti che entrano nella pupilla in modo che vadano a formare un'immagine nitida sulla retina. Per raggiungere la retina i raggi luminosi attraversano cinque mezzi diversi, ciascuno con un indice di rifrazione n diverso: l'aria ($n = 1,00$), la cornea ($n = 1,38$), l'umor acqueo ($n = 1,33$), il cristallino ($n = 1,40$ in media) e l'umor vitreo ($n = 1,34$). Ogni volta che la luce passa da un mezzo all'altro, essa viene rifratta. Circa il 70% della deviazione totale avviene nel passaggio tra l'aria e la cornea, perché questi due mezzi hanno indici di rifrazione molto diversi. Il cristallino contribuisce solo a un quarto della rifrazione totale, però la sua funzione è molto importante. Infatti la distanza tra cristallino e retina è fissa: l'unico modo di formare sulla retina immagini di oggetti situati a distanze diverse dall'occhio è quello di variare la distanza focale del cristallino.

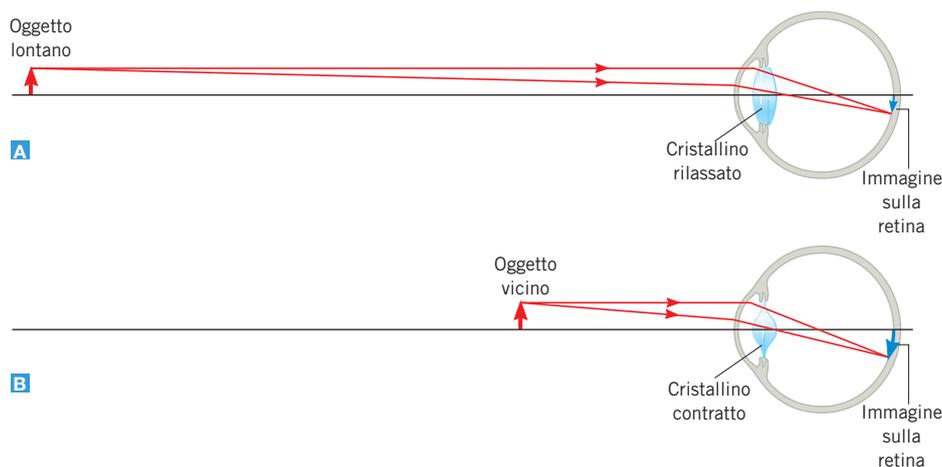


Figura 14.27

- A.** Quando è completamente rilassato, il cristallino ha la distanza focale massima e riesce a formare sulla retina un'immagine nitida di un oggetto lontano.
- B.** Quando il muscolo ciliare è contratto, il cristallino ha la distanza focale minima e riesce a formare sulla retina un'immagine nitida di un oggetto vicino.

Quando l'occhio guarda un oggetto molto lontano, i muscoli ciliari non sono contratti e il cristallino ha la curvatura minima e, di conseguenza, la distanza focale massima. In queste condizioni si dice che l'occhio è «completamente a riposo» (figura 14.27A). Quando l'oggetto è più vicino all'occhio, i muscoli ciliari si contraggono, per aumentare la curvatura del cristallino e quindi diminuire la sua distanza focale (figura 14.27B). Quando sulla retina si forma un'immagine nitida di un oggetto, si dice che l'occhio è «messo a fuoco» sull'oggetto. Il meccanismo con cui il cristallino cambia la sua distanza focale per mettere a fuoco oggetti a distanze diverse è chiamato **accomodamento**.

La distanza minima dall'occhio a cui si può trovare un oggetto che forma un'immagine nitida sulla retina è chiamata **punto prossimo** dell'occhio. Quando un oggetto si trova nel punto prossimo, i muscoli ciliari sono completamente contratti. Per una persona giovane il punto prossimo si trova a circa 25 cm dall'occhio. Questa distanza aumenta notevolmente con il passare degli anni: diventa di circa 50 cm a quarant'anni e di circa 500 cm a sessant'anni.

Il **punto remoto** dell'occhio è la distanza massima a cui può trovarsi un oggetto per essere messo a fuoco da un occhio completamente a riposo. Le persone con una vista normale riescono a vedere oggetti molto lontani, come i pianeti e le stelle, e perciò si dice che il loro punto remoto è all'infinito.

■ Miopia

Una persona **miope** riesce a mettere a fuoco gli oggetti vicini ma non a vedere bene gli oggetti lontani, perché il punto remoto del suo occhio non è all'infinito, ma può trovarsi a tre o quattro metri di distanza. La distanza focale di un occhio miope è minore di quella di un occhio normale e quindi i raggi che provengono da un ogget-



Fisica quotidiana

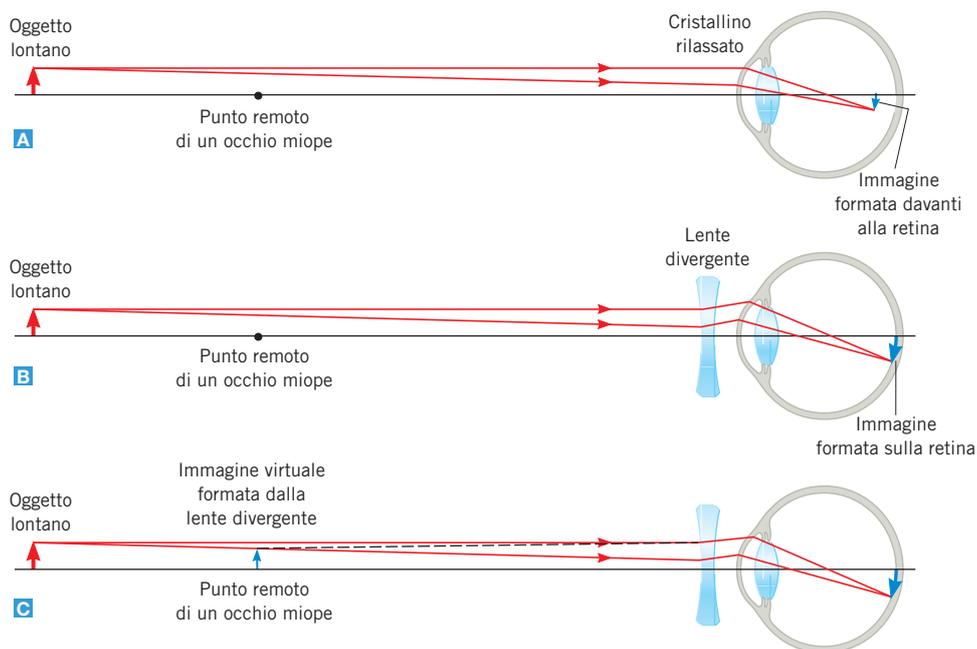
La miopia

to lontano formano un'immagine nitida davanti alla retina, come mostra la figura 14.28A, e di conseguenza l'immagine sulla retina è sfocata.

La miopia può essere corretta con lenti divergenti, come indica la figura 14.28B. I raggi provenienti dall'oggetto divergono dopo aver attraversato la lente; quando vengono rifratti dall'occhio verso l'asse ottico, l'immagine si forma più lontano e cade sulla retina. Poiché un occhio miope, quando è rilassato, riesce a mettere a fuoco un oggetto situato nel suo punto remoto ma non più lontano, le lenti divergenti usate per correggere la miopia sono progettate in modo da formare l'immagine di un oggetto lontano nel punto remoto dell'occhio (figura 14.28C).

Figura 14.28

- A.** Quando una persona miope guarda un oggetto lontano, l'immagine dell'oggetto si forma davanti alla retina e di conseguenza risulta sfocata.
- B.** Mettendo una lente divergente davanti all'occhio, l'immagine si sposta sulla retina e viene vista nitidamente.
- C.** La lente divergente è sagomata in modo da formare un'immagine virtuale di un oggetto lontano nel punto remoto di un occhio miope.



Problem solving

Applicazione dell'equazione delle lenti sottili in presenza di occhiali

La distanza abituale tra gli occhiali e gli occhi è di 2 cm. Se necessario, ricorda di tenere conto di questi 2 cm quando devi determinare la distanza dell'oggetto e quella dell'immagine (p e q) da usare nell'equazione delle lenti sottili.

ESEMPIO 7 ■ Equazione delle lenti sottili

Occhiali per miopi

Il punto remoto di una persona miope si trova a soli 521 cm di distanza dall'occhio. La distanza tra le lenti degli occhiali e l'occhio è di 2 cm.

- Calcola la distanza focale delle lenti divergenti che permettono a questa persona di vedere gli oggetti molto lontani.

Ragionamento e soluzione

Il punto remoto è a $521 \text{ cm} - 2 \text{ cm} = 519 \text{ cm}$ di distanza dalla lente e a sinistra di essa (figura 14.28C). La distanza dell'immagine è perciò $q = -519 \text{ cm}$ (il segno meno indica che l'immagine è virtuale e si forma a sinistra della lente). L'oggetto si trova molto lontano dalla lente, in pratica a distanza infinita: quindi $p = \infty$. La distanza focale f si ricava dall'equazione delle lenti sottili:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-519 \text{ cm}} \quad \text{da cui: } f = \boxed{-519 \text{ cm}}$$

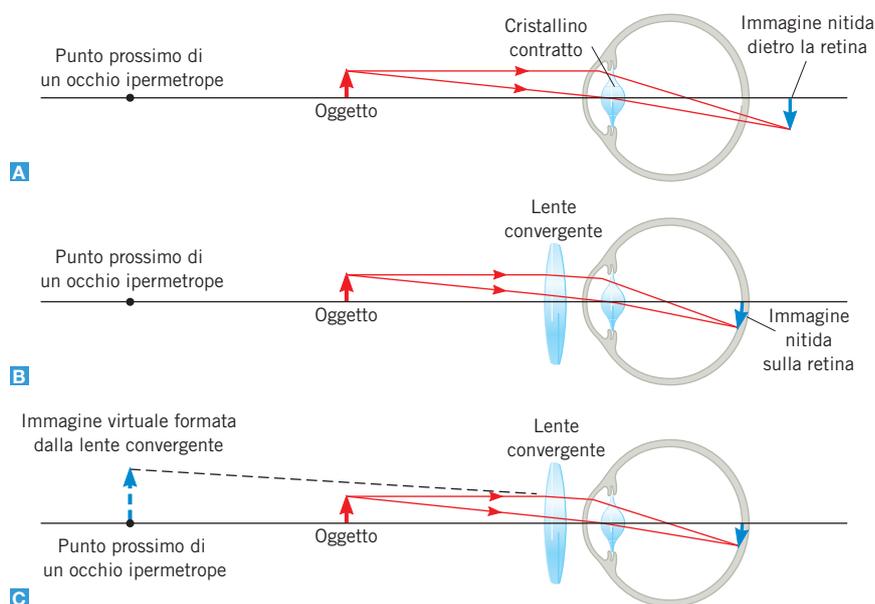
Fisica quotidiana

L'ipermetropia



■ Ipermetropia

Una persona **ipermetrope** vede bene gli oggetti lontani ma non mette a fuoco gli oggetti vicini. Mentre il punto prossimo dell'occhio di una persona giovane e con una vista normale è a circa 25 cm dall'occhio, il punto prossimo di una persona ipermetrope può trovarsi notevolmente più lontano, fino a diverse centinaia di centimetri. La distanza focale minima di un occhio ipermetrope è maggiore di quella di un occhio normale, quindi i raggi provenienti da un oggetto molto vicino formerebbero un'immagine nitida dietro la retina come mostra la figura 14.29A. In realtà la luce non può attraversare la retina, di conseguenza l'immagine che si forma su di essa è sfocata.


Figura 14.29

A. Quando una persona ipermetrope guarda un oggetto posto a una distanza minore di quella del punto prossimo del suo occhio, si formerebbe un'immagine nitida dell'oggetto dietro la retina, se la luce potesse passare al di là della retina. Siccome questo non è possibile, sulla retina si forma un'immagine sfocata dell'oggetto.
B. Mettendo una lente convergente davanti all'occhio, l'immagine si sposta sulla retina e viene vista nitidamente.
C. La lente convergente è sagomata in modo da formare un'immagine virtuale di un oggetto vicino nel punto prossimo di un occhio ipermetrope.

L'ipermetropia può essere corretta mediante lenti convergenti, come indica la figura 14.29B. I raggi provenienti dall'oggetto attraversano la lente e convergono verso l'asse ottico; quando vengono rifratti dall'occhio, convergono ancora di più verso l'asse ottico e l'immagine si forma sulla retina. La figura 14.29C mostra che cosa vede un occhio quando guarda attraverso una lente convergente. La lente è progettata in modo che l'occhio raccolga la luce che proviene da un'immagine virtuale formata dalla lente nel punto prossimo dell'occhio.

ESEMPIO 8 ■ Equazione delle lenti sottili

Lenti a contatto per ipermetropi

Il punto prossimo di una persona ipermetrope si trova a 210 cm dall'occhio.

► Calcola la distanza focale della lente a contatto che questa persona deve usare per leggere un libro posto a 25,0 cm dagli occhi.

Ragionamento e soluzione

Una lente a contatto è a contatto diretto con la superficie dell'occhio. Perciò la distanza dell'oggetto, che è la distanza tra il libro e la lente, è $p = 25,0$ cm. La lente forma un'immagine del libro nel punto prossimo dell'occhio, perciò la distanza dell'immagine è $q = -210$ cm (il segno meno indica che l'immagine è virtuale e si forma a sinistra della lente, come nella figura 14.29C). Per trovare la distanza focale della lente usiamo l'equazione delle lenti sottili:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{25,0 \text{ cm}} + \frac{1}{-210 \text{ cm}} = 0,0352 \text{ cm}^{-1} \quad \text{da cui: } f = \boxed{28,4 \text{ cm}}$$

■ Il potere diottrico di una lente e la diottria

Per indicare il potere di rifrazione di una lente si usa nella pratica una grandezza chiamata **potere diottrico** della lente:

$$\text{potere diottrico di una lente} = \frac{1}{f \text{ (in metri)}} \quad (14.8)$$

Il potere diottrico di una lente si misura in una unità chiamata **diottria**:

$$1 \text{ diottria} = 1 \text{ m}^{-1}$$

Gli occhiali dell'esempio 7 sarebbero descritti nella prescrizione di un oculista nel modo seguente:

$$\text{potere diottrico} = \frac{1}{-5,19 \text{ m}} = -0,193 \text{ diottrie}$$

Le lenti a contatto dell'esempio 8 sarebbero descritte in modo analogo:

$$\text{potere diottrico} = \frac{1}{0,284 \text{ m}} = 3,52 \text{ diottrie}$$

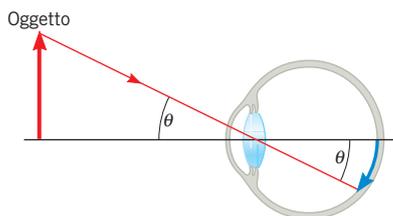


Figura 14.30

L'angolo θ è il diametro angolare sia dell'immagine sia dell'oggetto.

14.10 L'ingrandimento angolare e la lente d'ingrandimento

■ Ingrandimento angolare

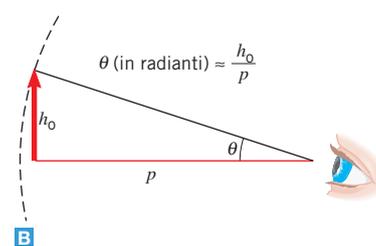
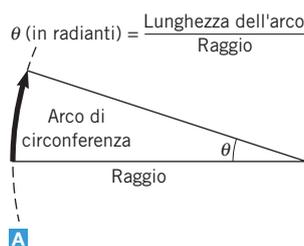
Se si tiene una moneta alla distanza di un braccio, la moneta sembra più grande della Luna perché l'immagine della moneta che si forma sulla retina è più grande di quella formata dalla Luna. La dimensione dell'immagine dipende dall'angolo θ , detto **diametro angolare**, che questa sottende sulla retina: maggiore è l'angolo, maggiore ci appare la dimensione dell'oggetto che stiamo osservando. Come mostra la figura 14.30, l'angolo θ sotteso dall'immagine è uguale all'angolo sotteso dall'oggetto.

Come abbiamo visto nel capitolo 4, la misura in radianti dell'angolo θ è il rapporto tra l'arco di circonferenza sotteso da θ e il raggio della circonferenza (figura 14.31A). La parte B della figura mostra il diametro angolare θ di un oggetto di altezza h_o visto da un osservatore che si trova a una distanza p da esso. Quando θ è piccolo, h_o e p sono approssimativamente uguali all'arco e al raggio della circonferenza, perciò:

$$\theta \text{ (in radianti)} = \text{diametro angolare} \approx \frac{h_o}{p}$$

Figura 14.31

A. La misura in radianti dell'angolo θ è il rapporto tra la lunghezza dell'arco di circonferenza che lo sottende e il raggio della circonferenza.
B. Per angoli piccoli (uguali o minori di 9°) θ è approssimativamente uguale al rapporto h_o/p , dove h_o e p sono l'altezza dell'oggetto e la sua distanza.



Per angoli uguali o minori di 10° , questa approssimazione comporta un errore percentuale minore dell'1%.

Uno strumento ottico, per esempio una lente d'ingrandimento, permette di vedere oggetti piccoli o lontani perché le immagini che forma sulla retina sono più grandi di quelle degli oggetti visti a occhio nudo. Uno strumento ottico, cioè, ingrandisce il diametro angolare di un oggetto. L'**ingrandimento angolare** M di uno strumento ottico è il rapporto tra il diametro angolare θ' dell'immagine prodotta dallo strumento e il diametro angolare θ dell'oggetto visto senza lo strumento:

$$\text{Ingrandimento angolare} \quad M = \frac{\theta'}{\theta} \quad (14.9)$$

■ La lente d'ingrandimento

Una lente convergente è lo strumento ottico più semplice che produce un ingrandimento angolare. Per questo strumento θ è il diametro angolare dell'oggetto posto a una distanza dall'occhio uguale alla distanza del punto prossimo e visto senza la lente. Poiché un oggetto posto a una distanza minore di quella del punto prossimo non produce un'immagine nitida sulla retina, θ è il più grande diametro angolare che si può vedere senza l'aiuto di una lente d'ingrandimento. La figura 14.32A mostra che

Fisica quotidiana

Una lente d'ingrandimento



il diametro angolare dell'oggetto è $\theta \approx h_o/N$, dove N è la distanza del punto prossimo. Per calcolare θ' ricordiamo, dal paragrafo 14.6 e dalla figura 14.21, che una lente d'ingrandimento è di solito formata da una sola lente convergente e che l'oggetto viene messo tra la lente e il fuoco. In questa situazione, la figura 14.32B mostra che la lente forma un'immagine virtuale diritta e ingrandita rispetto all'oggetto.

Quando l'occhio è vicino alla lente d'ingrandimento, il diametro angolare θ' visto dall'occhio è $\theta' \approx h_o/p$, dove p è la distanza dell'oggetto. Perciò:

$$M = \frac{\theta'}{\theta} \approx \frac{h_o/p}{h_o/N} = \frac{N}{p}$$

È noto che p è legata alla distanza dell'immagine q e alla distanza focale f della lente dall'equazione delle lenti sottili:

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

Sostituendo questo valore di $1/p$ nell'espressione precedente di M , si ottiene:

$$\text{Ingrandimento angolare di una lente d'ingrandimento} \quad M = \frac{\theta'}{\theta} \approx \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{q} \right) N \quad (14.10)$$

Esaminiamo due casi particolari.

Nel primo caso l'immagine è situata il più vicino possibile all'occhio, cioè nel punto prossimo: $q = -N$. Il segno meno indica che l'immagine è a sinistra della lente ed è virtuale. In questo caso l'equazione (14.10) diventa:

$$M \approx \frac{N}{f} + 1$$

Nel secondo caso l'immagine è situata il più lontano possibile dall'occhio: $q = -\infty$. Ciò accade quando l'oggetto si trova nel fuoco della lente. Dall'equazione (14.10) si ha:

$$M \approx \frac{N}{f}$$

Quindi l'ingrandimento angolare è maggiore quando l'immagine si forma nel punto prossimo dell'occhio rispetto a quando si forma all'infinito. In entrambi i casi, comunque, l'ingrandimento maggiore si ottiene usando una lente di ingrandimento con la distanza focale più piccola possibile.

ESEMPIO 9 ■ Ingrandimento angolare di una lente

Esaminare un diamante con una lente d'ingrandimento

Un gioielliere che ha il punto prossimo a 40,0 cm dall'occhio e il punto remoto all'infinito esamina un diamante con una lente d'ingrandimento avente distanza focale di 5,00 cm. L'immagine della gemma si forma a una distanza di -185 cm dalla lente.

► Determina l'ingrandimento angolare della lente.

Il gioielliere sposta poi il diamante in modo che la sua immagine si formi nel punto remoto del suo occhio.

► Qual è l'ingrandimento angolare in questo caso?

Ragionamento e soluzione

► Con $f = 5,00$ cm, $q = -185$ cm e $N = 40,0$ cm, l'ingrandimento angolare è:

$$M = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{q} \right) N = \left(\frac{1}{5,00 \text{ cm}} - \frac{1}{-185 \text{ cm}} \right) (40,0 \text{ cm}) = \boxed{8,22}$$

► L'immagine si forma nel punto remoto quando $q = -\infty$. In questo caso l'ingrandimento angolare è:

$$M = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{q} \right) N = \left(\frac{1}{5,00 \text{ cm}} - \frac{1}{-\infty} \right) (40,0 \text{ cm}) = \boxed{8,00}$$

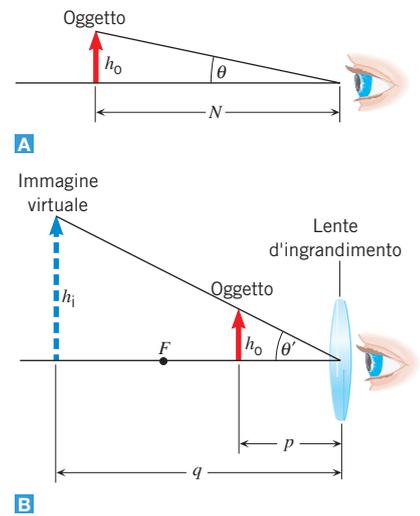


Figura 14.32

A. Senza la lente d'ingrandimento, il diametro angolare θ maggiore si vede quando l'oggetto è posto nel punto prossimo dell'occhio, a una distanza N .
B. Una lente d'ingrandimento produce un'immagine ingrandita e virtuale di un oggetto posto a una distanza dalla lente minore della distanza focale. Il diametro angolare sia dell'immagine sia dell'oggetto è θ' .

Fisica quotidiana



Il microscopio composto

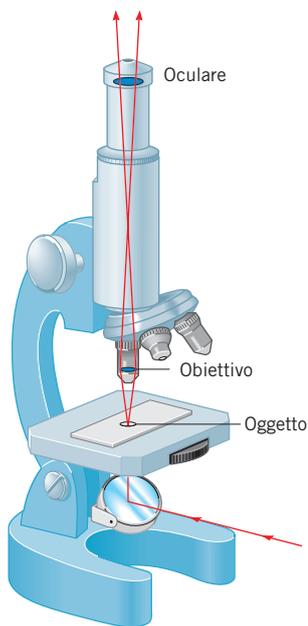


Figura 14.33

Un microscopio composto.

14.11 Il microscopio e il telescopio

■ Il microscopio composto

Per ottenere un ingrandimento angolare maggiore di quello ottenibile con una lente d'ingrandimento, si può aggiungere un'altra lente convergente per formare un'immagine «preingrandita» dell'oggetto, che funziona come oggetto per la lente d'ingrandimento. Lo strumento ottico che usa questa combinazione di lenti è chiamato **microscopio composto** (figura 14.33). Come abbiamo visto nel paragrafo 14.7, la lente d'ingrandimento è detta *oculare* e la lente convergente aggiuntiva *obiettivo*.

L'ingrandimento angolare di un microscopio ottico è $M = \theta'/\theta$, dove θ' e θ sono le dimensioni angolari rispettivamente dell'immagine finale e dell'oggetto posto nel punto prossimo. Quindi $\theta = h_o/N$, dove N è la distanza dall'occhio del punto prossimo e h_o la dimensione dell'oggetto. Quando l'oggetto è posto subito al di là del fuoco F_o dell'obiettivo, come nella figura 14.25A e l'immagine finale è molto lontana dall'oculare (cioè all'infinito, come nella figura 14.25C), si dimostra che:

$$\text{Ingrandimento angolare di un microscopio composto} \quad M \approx - \frac{(L - f_e)N}{f_o f_e} \quad (L > f_o + f_e) \quad (14.11)$$

Nell'equazione (14.11) f_o e f_e sono rispettivamente la distanza focale dell'obiettivo e quella dell'oculare e L è la distanza tra le due lenti. Perché l'equazione (14.11) sia valida, L deve essere maggiore della somma di f_o e f_e . L'ingrandimento angolare è tanto maggiore quanto minori sono f_o e f_e e quanto maggiore è L .

ESEMPIO 10 ■ Ingrandimento angolare di un microscopio composto

Quanto ingrandisce un microscopio composto?

La distanza focale dell'obiettivo di un microscopio composto è $f_o = 0,40$ cm, mentre quella dell'oculare è $f_e = 3,0$ cm. La distanza tra le due lenti è $L = 20,0$ cm. La persona che lo usa ha un punto prossimo distante $N = 25$ cm.

- ▶ Trova l'ingrandimento angolare del microscopio.
- ▶ Confronta la risposta alla domanda precedente con l'ingrandimento angolare massimo che si potrebbe ottenere usando solo l'oculare come lente d'ingrandimento.

Ragionamento e soluzione

- ▶ L'ingrandimento angolare del microscopio composto è:

$$M \approx - \frac{(L - f_e)N}{f_o f_e} = - \frac{(20,0 \text{ cm} - 3,0 \text{ cm})(25 \text{ cm})}{(0,40 \text{ cm})(3,0 \text{ cm})} = \boxed{-350}$$

Il segno meno indica che l'immagine finale è capovolta rispetto all'oggetto.

- ▶ L'ingrandimento angolare massimo ottenibile usando solo l'oculare è:

$$M \approx \frac{N}{f_e} + 1 = \frac{25 \text{ cm}}{3,0 \text{ cm}} + 1 = \boxed{9,3}$$

L'effetto dell'obiettivo è di aumentare l'ingrandimento angolare di un fattore $350/9,3 = 38$ rispetto a quello fornito dal solo oculare.

Fisica quotidiana

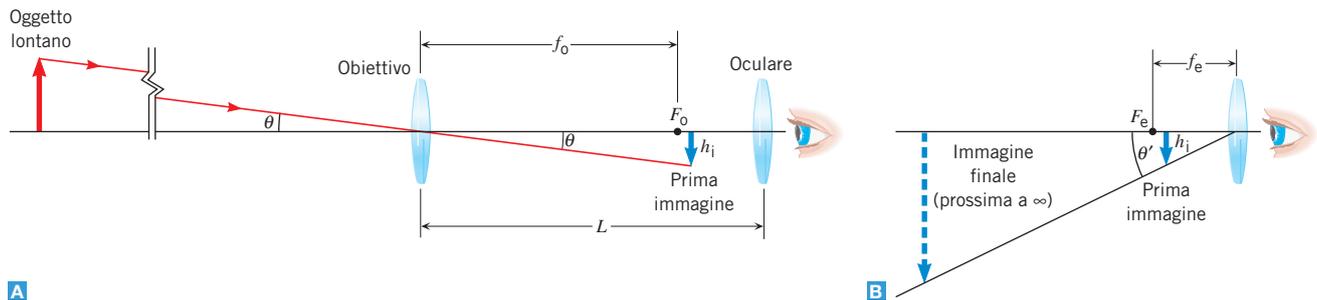


Il telescopio

■ Il telescopio

Il telescopio è uno strumento ottico che fornisce immagini ingrandite di oggetti molto lontani, come i pianeti. Anche il telescopio, come il microscopio, è formato essenzialmente da due lenti, chiamate obiettivo e oculare. Poiché l'oggetto è di solito molto lontano, i raggi che incidono sul telescopio sono praticamente paralleli e la «prima immagine» si forma subito dopo il fuoco F_o dell'obiettivo, come nella figura 14.34A. La prima immagine è reale e capovolta. A differenza della prima immagine del microscopio composto, in questo caso l'immagine è *rimpicciolita* rispetto

all'oggetto. Se, come nella parte **B** della figura, il telescopio è costruito in modo che la prima immagine si formi subito dopo il fuoco F_e dell'oculare, l'oculare funziona come una lente d'ingrandimento e forma un'immagine dell'oggetto che è molto ingrandita, virtuale e a distanza praticamente infinita, così che può essere vista con l'occhio completamente a riposo.



L'ingrandimento angolare M di un telescopio è il rapporto tra il diametro angolare θ' dell'immagine finale e il diametro angolare θ dell'oggetto. Per un oggetto che si trova a distanza astronomica, come un pianeta, il diametro angolare è praticamente uguale all'angolo θ sotteso dall'oggetto quando è visto dall'obiettivo del telescopio (figura 14.34A). Inoltre θ è anche uguale al diametro angolare della prima immagine, che si forma a una distanza dalla lente quasi uguale alla distanza focale f_o . Quindi $\theta \approx -h_i/f_o$, dove h_i è l'altezza della prima immagine e f_o è la distanza focale dell'obiettivo. Il segno meno inserito in questa espressione di θ assicura che il rapporto $-h_i/f_o$, e quindi θ , sia positivo.

Per ottenere un'espressione di θ' consideriamo la figura 14.34B e osserviamo che la prima immagine si forma molto vicino al fuoco F_e dell'oculare, che ha una distanza focale f_e . Perciò $\theta' \approx h_i/f_e$. L'ingrandimento angolare di un telescopio è dato approssimativamente da:

$$\text{Ingrandimento angolare di un telescopio} \quad M = \frac{\theta'}{\theta} \approx \frac{h_i/f_e}{-h_i/f_o} \approx -\frac{f_o}{f_e} \quad (14.12)$$

L'ingrandimento angolare è determinato dal rapporto tra la distanza focale dell'obiettivo e quella dell'oculare. Per ottenere un ingrandimento molto forte, l'obiettivo deve avere una distanza focale molto grande e l'oculare una distanza focale molto piccola.

ESEMPIO 11 ■ Ingrandimento angolare di un telescopio

Quanto ingrandisce un telescopio astronomico?

Il telescopio in figura 14.35 ha le seguenti caratteristiche: $f_o = 985$ mm e $f_e = 5,00$ mm. Da questi dati ricava:

- ▶ l'ingrandimento angolare del telescopio.
- ▶ la lunghezza approssimativa del telescopio.

Ragionamento e soluzione

- ▶ L'ingrandimento angolare è approssimativamente:

$$M \approx -\frac{f_o}{f_e} = -\frac{985 \text{ mm}}{5,00 \text{ mm}} = \boxed{-197}$$

- ▶ La figura 14.34 mostra che la prima immagine si trova subito dopo il fuoco F_o dell'obiettivo e subito prima del fuoco F_e dell'oculare. I due fuochi sono perciò molto vicini tra loro e la distanza L è circa uguale alla somma delle distanze focali dell'obiettivo e dell'oculare:

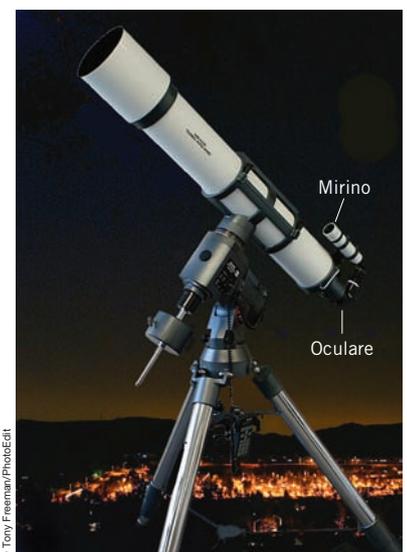
$$L \approx f_o + f_e = 985 \text{ mm} + 5,00 \text{ mm} = \boxed{990 \text{ mm}}$$

Figura 14.34

A. Il telescopio astronomico è impiegato per vedere oggetti molto lontani (nota «l'interruzione» dell'asse ottico tra l'oggetto e l'obiettivo). L'obiettivo forma una prima immagine reale e capovolta.
B. L'oculare ingrandisce la prima immagine e produce un'immagine finale praticamente all'infinito.

Figura 14.35

Un telescopio astronomico. Il mirino è un piccolo telescopio separato con un basso potere d'ingrandimento e serve come aiuto per trovare la posizione dell'oggetto. Una volta che l'oggetto è stato individuato, la persona che usa il telescopio guarda attraverso l'oculare per vedere l'oggetto con l'ingrandimento totale fornito dal telescopio.



© Tony Freeman/PhotoEast

14.12 Aberrazioni delle lenti

Osservando con attenzione l'immagine formata da una lente, si nota che non è perfettamente nitida ma appare sfocata. Questo difetto deriva dal fatto che i raggi provenienti da un singolo punto dell'oggetto non vengono focalizzati in un singolo punto nell'immagine. Come risultato, ogni punto dell'immagine diventa una piccola macchia. Il difetto nella corrispondenza fra i punti dell'oggetto e quelli dell'immagine viene definito **aberrazione**.

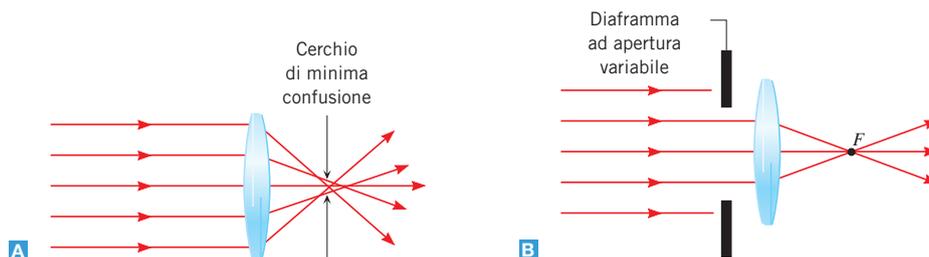
Le lenti sferiche presentano un difetto noto come **aberrazione sferica**. La figura 14.36A mostra l'origine dell'aberrazione sferica di una lente convergente. In una lente ideale, tutti i raggi paralleli all'asse ottico sono rifratti e attraversano l'asse ottico nello stesso punto. Tuttavia i raggi lontani dall'asse ottico vengono rifratti maggiormente dalla lente e attraversano l'asse in un punto diverso da quello attraversato dai raggi più vicini: a causa di ciò la lente non presenta un unico fuoco. Come suggerisce la figura, c'è una zona attorno all'asse ottico dove la luce converge con maggior intensità. Questa area circolare è detta **cerchio di minima confusione** ed è la zona in cui si ha l'immagine migliore formata dalla lente.

L'aberrazione sferica può essere notevolmente diminuita con l'impiego di un diaframma ad apertura variabile, che permette il passaggio attraverso la lente dei soli raggi più vicini all'asse ottico (figura 14.36B).

Figura 14.36

A. In una lente convergente, a causa dell'aberrazione sferica, i raggi paralleli all'asse ottico sono rifratti in punti diversi dell'asse.

B. L'aberrazione sferica può essere ridotta permettendo solo ai raggi vicini all'asse ottico di raggiungere la lente. I raggi rifratti ora convergono all'incirca in uno stesso fuoco F .



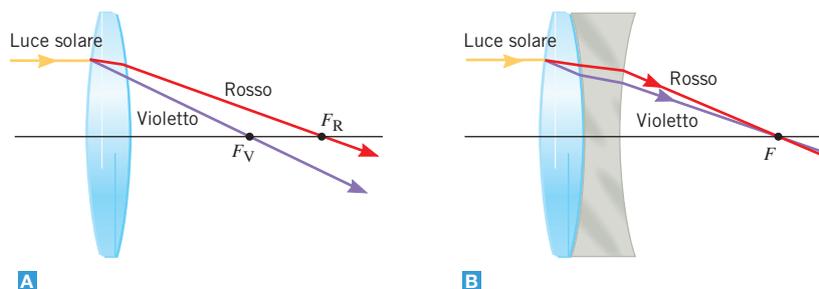
Un altro genere di aberrazione, l'**aberrazione cromatica**, è dovuto al fatto che l'indice di rifrazione dei materiali dipende dal colore della luce che li attraversa, come abbiamo visto nel paragrafo 14.4. La figura 14.37A mostra come un raggio solare, incidente su una lente convergente, venga scomposto nei colori del suo spettro a causa della dispersione. Per semplicità, la figura mostra solamente i colori alle estremità dello spettro visibile, il rosso e il violetto. Il violetto è maggiormente rifratto rispetto al rosso, quindi il raggio violetto attraversa l'asse ottico in un punto che è più vicino alla lente rispetto a quello del raggio rosso. In questo modo, la distanza focale della lente è minore per il violetto che per il rosso e i valori intermedi fra le due distanze focali corrispondono a quelle degli altri colori. L'effetto ottico dell'aberrazione cromatica è dunque una sgradevole frangia colorata intorno all'immagine.

L'aberrazione cromatica può essere fortemente ridotta con una lente composta, come la combinazione di una lente convergente con una divergente mostrata in figura 14.37B. Ogni lente è realizzata con differenti tipi di vetro. Con questa combinazione di lenti i raggi rosso e violetto convergono praticamente nello stesso fuoco. Una combinazione di lenti impiegata per ridurre l'aberrazione cromatica viene chiamata *lente acromatica* (dal greco *achromatos*, che significa «privo di colore»). Tutte le macchine fotografiche di alta qualità usano lenti acromatiche.

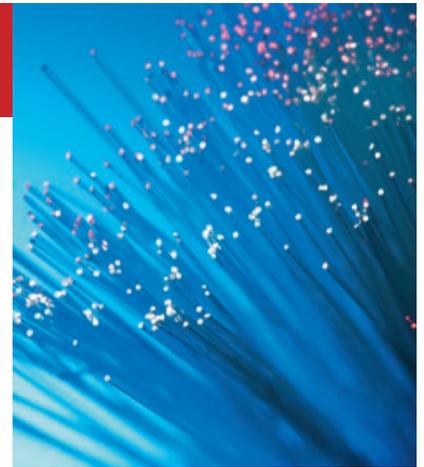
Figura 14.37

A. L'aberrazione cromatica si presenta quando differenti colori vengono focalizzati in differenti punti dell'asse ottico: F_V = fuoco della luce violetta, F_R = fuoco della luce rossa.

B. Il sistema formato da una lente convergente e una divergente può avvicinare i punti focali di colori diversi allo stesso fuoco F .



L'ordine di grandezza



Quante canzoni si riescono a scaricare in un'ora, utilizzando una connessione internet a fibre ottiche?

Per calcolare quante canzoni si riescono a scaricare in un'ora utilizzando una connessione internet a fibre ottiche, bisogna dividere la quantità di byte scaricati in un'ora per la lunghezza di una canzone misurata in byte.

IL MODELLO

(numero di canzoni scaricate) = (quantità di byte scaricati in un'ora con una connessione a fibre ottiche) / (lunghezza di una canzone in formato mp3 misurata in byte)

I NUMERI

■ **Quantità di byte scaricati in un'ora con una connessione a fibre ottiche** =

= (velocità di download con connessione a fibre ottiche) (numero di secondi in 1 ora) =
 = (20 Mbit/s) (3600 s) = $(2 \cdot 10^7 \text{ bit/s}) (3600 \text{ s}) =$
 = $7,2 \cdot 10^{10} \text{ bit} = 7,2 \cdot 10^{10} (1/8 \text{ byte}) =$
 = $9 \cdot 10^9 \text{ byte} = 9 \text{ GB}$

■ **Lunghezza di una canzone (durata 3 min e 30 s) in formato mp3 misurata in byte** =

= (bit rate standard del formato mp3) (durata della canzone in secondi) =
 = (128 Kbit/s) (210 s) = $(1,28 \cdot 10^5 \text{ bit/s}) (210 \text{ s}) =$
 = $2,7 \cdot 10^7 \text{ bit} = 2,7 \cdot 10^7 (1/8 \text{ byte}) =$
 = $3,4 \cdot 10^6 \text{ byte} = 3,4 \text{ MB}$

IL RISULTATO

numero di canzoni scaricate =
 = $(9 \text{ GB}) / (3,4 \text{ MB}) = (9000 \text{ MB}) / (3,4 \text{ MB}) =$
 = $2,6 \cdot 10^3 \text{ canzoni}$

L'ordine di grandezza è: 10^3 canzoni

Utilizzando una connessione internet a fibre ottiche, si riescono a scaricare in un'ora più di 2600 canzoni della durata media di 3 minuti e mezzo.

Un paragone Nel giro di un'ora si riescono ad acquisire 154 ore di musica: se volessimo ascoltarla tutta ininterrottamente cominciando un lunedì mattina, saremmo costretti a stare alzati giorno e notte fino alla domenica sera successiva.

Le fonti

Velocità di download con connessione a fibre ottiche:

Fastweb (www.fastweb.it/offerta/adsl/glossario/)

Bit rate standard del formato mp3: Digitalprosound.com (www.digitalprosound.com/Htm/WebAudio/2000/Oct/MP3bitrates2.htm)

Stima l'ordine di grandezza



Quanti metri di fibra ottica è «lungo» un byte?

IL MODELLO

(metri di fibra ottica che contengono 1 byte durante il download) = (tempo impiegato per scaricare 1 byte) (velocità della luce all'interno della fibra ottica)

I NUMERI

Tempo impiegato per scaricare 1 byte =

= (1 byte) / (velocità di download con connessione a fibre ottiche) =
 = (1 byte) / (20 Mbit/s) = $(8 \text{ bit}) / (2 \cdot 10^7 \text{ bit/s}) = 4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$

Velocità della luce all'interno della fibra ottica =

= (velocità della luce nel vuoto) / (indice di rifrazione della fibra ottica) =
 = $(3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) / (1,47) \approx 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

IL RISULTATO

Metri di fibra ottica che contengono 1 byte = m

Le fonti

Indice di rifrazione della fibra ottica: Fiber-optics.info (www.fiber-optics.info/glossary-s.htm)

I concetti fondamentali

1. L'indice di rifrazione

Indice di rifrazione

- L'indice di rifrazione n di un mezzo è il rapporto tra la velocità della luce c nel vuoto e la velocità della luce v nel mezzo:

$$n = \frac{c}{v} \quad (14.1)$$

I valori di n sono sempre maggiori di 1 perché la velocità della luce in qualunque mezzo materiale è minore di quella nel vuoto.

2. La legge della rifrazione

Legge della rifrazione di Snell

- La rifrazione che avviene alla superficie di separazione tra due mezzi materiali è descritta dalla legge della rifrazione di Snell. Essa afferma che (1) il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione giacciono tutti sullo stesso piano e che (2) l'angolo di rifrazione θ_2 è legato all'angolo di incidenza θ_1 dalla relazione:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (14.2)$$

dove n_1 e n_2 sono rispettivamente l'indice di rifrazione del mezzo in cui viaggia il raggio incidente e l'indice di rifrazione del mezzo in cui viaggia il raggio rifratto. Gli angoli sono quelli che i raggi formano con la normale alla superficie di separazione.

Profondità apparente

- A causa della rifrazione, un oggetto sommerso ha una profondità apparente diversa da quella reale. Per un osservatore che si trova sulla verticale che passa per l'oggetto (sopra o sotto di esso), la profondità (o l'altezza) apparente d' è legata alla profondità (o all'altezza) reale d dalla relazione:

$$d' = d \frac{n_2}{n_1} \quad (14.3)$$

dove n_1 e n_2 sono rispettivamente l'indice di rifrazione del mezzo in cui si trova l'oggetto e l'indice di rifrazione del mezzo in cui si trova l'osservatore.

3. La riflessione totale

Angolo limite

- Quando la luce passa da un mezzo con indice di rifrazione n_1 maggiore a un mezzo con indice di rifrazione n_2 minore, il raggio rifratto si allontana dalla normale. Se l'angolo di incidenza è uguale all'angolo limite θ_L , l'angolo di rifrazione è di 90° . L'ampiezza dell'angolo limite si calcola con la legge della rifrazione ed è data dall'espressione:

$$\sin \theta_L = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1) \quad (14.4)$$

Riflessione totale

- Quando l'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite, il raggio rifratto manca e tutta la luce è riflessa nel mezzo da cui proveniva: questo fenomeno è chiamato riflessione totale.

4. La dispersione della luce

Dispersione

- Un prisma di vetro può disperdere un fascio di luce solare in uno spettro di colori perché l'indice di rifrazione del vetro è diverso per le diverse lunghezze d'onda. Perciò un prisma provoca angoli di deviazione diversi per i raggi dei diversi colori. La separazione della luce nei suoi colori componenti è chiamata dispersione. La dispersione della luce da parte delle gocce d'acqua in sospensione nell'aria porta alla formazione degli arcobaleni.

5. Le lenti ■ 6. Immagini formate da lenti

Fuoco e distanza focale di una lente convergente

- Sia le lenti convergenti sia quelle divergenti formano immagini degli oggetti da cui provengono i raggi di luce che li attraversano a causa del fenomeno della rifrazione. Dopo aver attraversato una lente convergente, i raggi parassiali paralleli all'asse ottico convergono in un punto dell'asse ottico chiamato fuoco della lente. La distanza tra il centro della lente e il fuoco è la distanza focale f della lente.

Fuoco e distanza focale di una lente divergente	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dopo aver attraversato una lente divergente, i raggi parassiali paralleli all'asse ottico sembrano provenire da un punto dell'asse ottico che è il fuoco della lente. La distanza tra il centro della lente e il fuoco è la distanza focale f della lente.
Diagrammi dei raggi	<ul style="list-style-type: none"> ■ Per determinare la posizione dell'immagine formata da una lente convergente o divergente si può usare un metodo grafico chiamato diagramma dei raggi, che è descritto nel paragrafo 14.6.
Immagine formata da una lente convergente	<ul style="list-style-type: none"> ■ Il tipo di immagine formata da una lente convergente dipende dalla posizione dell'oggetto rispetto alla lente. Quando la distanza dell'oggetto dalla lente è maggiore del doppio della distanza focale, l'immagine è reale, capovolta e rimpicciolita rispetto all'oggetto. Quando la distanza dell'oggetto dalla lente è compresa tra la distanza focale e il doppio della distanza focale, l'immagine è reale, capovolta e ingrandita rispetto all'oggetto. Quando la distanza dell'oggetto dalla lente è minore della distanza focale, l'immagine è virtuale, diritta e ingrandita rispetto all'oggetto.
Immagine formata da una lente divergente	<ul style="list-style-type: none"> ■ Indipendentemente dalla posizione dell'oggetto, una lente divergente forma sempre un'immagine virtuale, diritta e rimpicciolita rispetto all'oggetto.

7. L'equazione delle lenti sottili

Equazione delle lenti sottili	<ul style="list-style-type: none"> ■ L'equazione delle lenti sottili vale sia per le lenti convergenti sia per le lenti divergenti ed esprime quantitativamente la relazione tra la distanza p dell'oggetto, la distanza q dell'immagine e la distanza focale f della lente:
-------------------------------	--

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (14.5)$$

Ingrandimento lineare	<ul style="list-style-type: none"> ■ L'ingrandimento G di una lente è il rapporto tra l'altezza h_i dell'immagine e l'altezza h_o dell'oggetto ed è anche legato alla distanza p dell'oggetto e alla distanza q dell'immagine dall'equazione dell'ingrandimento:
-----------------------	--

$$G = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p} \quad (14.6)$$

Convenzioni sui segni	<ul style="list-style-type: none"> ■ Le convenzioni sui segni delle variabili che compaiono nell'equazione delle lenti sottili e nell'equazione dell'ingrandimento sono riepilogate nel paragrafo 14.7.
-----------------------	--

8. Combinazioni di lenti

Ingrandimento lineare della combinazione di due lenti	<ul style="list-style-type: none"> ■ L'ingrandimento lineare G di una combinazione di due lenti è il prodotto degli ingrandimenti di ciascuna di esse:
---	--

$$G = G_1 \cdot G_2 \quad (14.7)$$

9. L'occhio

Formazione dell'immagine e accomodamento	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nell'occhio umano si forma un'immagine reale e capovolta degli oggetti su una superficie sensibile alla luce, chiamata retina. L'accomodamento è il processo per il quale la distanza focale dell'occhio si regola automaticamente in modo che le immagini degli oggetti che si formano sulla retina siano sempre nitide, anche se gli oggetti sono a distanze diverse.
--	---

Punto prossimo e punto remoto	<ul style="list-style-type: none"> ■ Il punto prossimo dell'occhio è il punto più vicino all'occhio in cui può trovarsi un oggetto che forma un'immagine nitida sulla retina. Il punto remoto dell'occhio è il punto più lontano in cui può trovarsi un oggetto per essere messo a fuoco da un occhio completamente a riposo. Per una persona giovane e con una vista normale la distanza del punto prossimo è 25 cm e quella del punto remoto è infinita.
-------------------------------	---

- Miopia e ipermetropia** ■ Un occhio miope riesce a mettere a fuoco gli oggetti vicini, ma non quelli lontani. La miopia può essere corretta con occhiali o lenti a contatto che impiegano lenti divergenti. Un occhio ipermetrope vede distintamente gli oggetti lontani ma non quelli vicini. L'ipermetropia può essere corretta usando lenti convergenti.

- Potere diottrico** ■ Il potere diottrico di una lente si misura in diottrie ed è dato dalla relazione:

$$\text{Potere diottrico (in diottrie)} = \frac{1}{f \text{ (in metri)}} \quad (14.8)$$

dove f è la distanza focale della lente espressa in metri. Il potere diottrico di una lente convergente è positivo, mentre quello di una lente divergente è negativo.

10. L'ingrandimento angolare e la lente d'ingrandimento

- Ingrandimento angolare di uno strumento** ■ L'ingrandimento angolare di uno strumento ottico è il rapporto tra il diametro angolare θ' dell'immagine finale formata dallo strumento e il diametro angolare θ dell'oggetto visto senza lo strumento:

$$M = \frac{\theta'}{\theta} \quad (14.9)$$

- Ingrandimento angolare di una lente d'ingrandimento** ■ Una lente d'ingrandimento è una singola lente convergente che forma un'immagine virtuale, diritta e ingrandita di un oggetto posto a una distanza dalla lente minore della sua distanza focale. Per una lente d'ingrandimento tenuta vicino all'occhio di chi guarda un oggetto attraverso di essa, l'ingrandimento è approssimativamente:

$$M \approx \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{q} \right) N \quad (14.10)$$

dove f è la distanza focale della lente, q è la distanza dell'immagine e N è la distanza dall'occhio del punto prossimo della persona che usa la lente.

11. Il microscopio e il telescopio

- Ingrandimento angolare di un microscopio composto** ■ Un microscopio composto è in genere formato da due lenti, chiamate obiettivo e oculare. L'immagine finale è virtuale, capovolta e ingrandita. L'ingrandimento angolare di un microscopio è approssimativamente dato da:

$$M \approx - \frac{(L - f_e)N}{f_o f_e} \quad (L > f_o + f_e) \quad (14.11)$$

dove f_o e f_e sono rispettivamente la distanza focale dell'obiettivo e dell'oculare, L è la distanza tra l'obiettivo e l'oculare e N è la distanza dall'occhio del punto prossimo della persona che usa il microscopio.

- Ingrandimento angolare di un telescopio astronomico** ■ Un telescopio astronomico forma immagini virtuali ingrandite e capovolte di oggetti molto lontani per mezzo di una combinazione di lenti formata da un obiettivo e un oculare. L'ingrandimento angolare di un telescopio è approssimativamente dato da:

$$M \approx - \frac{f_o}{f_e} \quad (14.12)$$

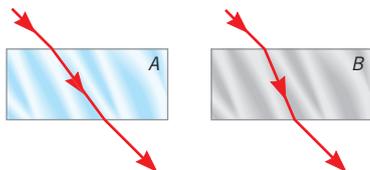
dove f_o e f_e sono rispettivamente le distanze focali dell'obiettivo e dell'oculare.

12. Aberrazioni delle lenti

- Aberrazione sferica e aberrazione cromatica** ■ Le aberrazioni sono difetti che impediscono la formazione di immagini nitide. L'aberrazione sferica è dovuta al fatto che i raggi lontani dall'asse ottico vengono rifratti in punti diversi di esso. L'aberrazione cromatica è dovuta al fatto che raggi di colori diversi hanno fuochi diversi.

Domande

- 1** Le due lastre in figura sono fatte di vetri differenti. Su ciascuna di esse incide un raggio di luce con lo stesso angolo. Quale di esse ha l'indice di rifrazione maggiore?



- 2** Quando fuori è buio e tu sei in una stanza illuminata, puoi vedere la tua immagine riflessa sui vetri di una finestra. Perché non vedi la tua immagine riflessa durante il giorno?
- 3** Vuoi formare un arcobaleno spruzzando dell'acqua mediante un innaffiatoio da giardino. In quale direzione devi spruzzare l'acqua rispetto al Sole?

- 4** Quando leggi a lungo, gli occhi «si stancano». Per riposarli, puoi smettere di leggere e guardare un oggetto in lontananza. Perché questo riposa i muscoli ciliari?
- 5** Una persona miope indossa i suoi occhiali. Perché i suoi occhi attraverso le lenti sembrano più piccoli? Nel caso di una persona ipermetrope, gli occhi sembrano più grandi: perché? Spiega mediante opportuni diagrammi dei raggi.
- 6** Una lente divergente può essere usata come lente d'ingrandimento?
- 7** Nonostante il nome, le immagini virtuali hanno molte applicazioni pratiche. Considera per esempio i seguenti strumenti ottici: proiettore per diapositive, lente d'ingrandimento, macchina fotografica, occhiali, microscopio, telescopio. Quali di essi formano immagini finali che sono virtuali?

Test

- 1** Quale delle seguenti affermazioni relative all'indice di rifrazione di un materiale è vera?
- A È minore di 1.
 B Può essere misurato in nanometri.
 C Dipende dallo spessore del materiale.
 D Dipende dalla velocità della luce nel materiale.
- 2** Un raggio di luce passa dall'aria all'acqua. Quale delle seguenti affermazioni è vera?
- A Il raggio rifratto è più intenso del raggio incidente.
 B Il raggio rifratto è più vicino alla normale alla superficie dell'acqua rispetto al raggio incidente.
 C Il raggio rifratto è più lontano dalla normale alla superficie dell'acqua rispetto al raggio incidente.
 D Il raggio rifratto è più vicino alla superficie dell'acqua rispetto al raggio incidente.
- 3** Un pesce nuota 2,00 m sotto la superficie di uno stagno. Quando passa sotto il pontile, lo osservi: a quale profondità sembra essere? L'indice di rifrazione dell'acqua è 1,33.
- A 1,33 m
 B 1,50 m
 C 2,00 m
 D 2,66 m
- 4** Un sub in immersione scatta una foto con il flash. La luce incide sulla superficie acqua-aria con un angolo di 43° . Qual è l'angolo di rifrazione con cui la luce esce dall'acqua?
- A 31°
 B 43°
 C 65°
 D 90°
- 5** Un raggio di luce si propaga dentro un diamante (indice di rifrazione $n = 2,419$) e incide sulla superficie. Qual è l'angolo minimo per il quale si ha riflessione totale?
- A $24,42^\circ$
 B $32,46^\circ$
 C $54,45^\circ$
 D $65,58^\circ$
- 6** Il termine *dispersione* si riferisce al fatto che l'indice di rifrazione di certi materiali:
- A dipende dal colore della luce.
 B dipende dallo spessore del materiale.
 C dipende dall'intensità della luce.
 D non dipende dalla velocità della luce nel materiale.
- 7** Un oggetto è posto nel fuoco di una lente convergente con distanza focale f . A quale distanza dalla lente si forma la sua immagine?
- A f
 B $2f$
 C $1/f$
 D A una distanza infinita.
- 8** Un oggetto è posto nel fuoco di una lente divergente con distanza focale f . A quale distanza dalla lente si forma la sua immagine?
- A f
 B $f/2$
 C $1/f$
 D A una distanza infinita.
- 9** Un oggetto è posto a 4,0 cm da una lente convergente con $f = 12$ cm. Quale delle seguenti affermazioni relative alla sua immagine è vera?

- [A] L'immagine è virtuale e dista 6,0 cm dalla lente.
 [B] L'immagine è virtuale e dista 12 cm dalla lente.
 [C] L'immagine è reale e dista 3,0 cm dalla lente.
 [D] L'immagine è reale e dista 6,0 cm dalla lente.
- 10** Un oggetto alto 6,0 cm è posto a 30,0 cm da una lente. La sua immagine è alta 2,0 cm e capovolta. Qual è la distanza focale della lente?
 [A] 7,5 cm
 [B] 15,0 cm
 [C] 22,5 cm
 [D] 30,0 cm
- 11** Una lente di 1,50 diottrie ha una distanza focale pari a:
 [A] +0,667 m
 [B] -0,667 m
 [C] +1,50 m
 [D] -1,50 m
- 12** Giulia ha il punto remoto a 5 m, quindi:
 [A] ha una vista normale.
 [B] è miope e necessita di occhiali con lenti divergenti.
 [C] è miope e necessita di occhiali con lenti convergenti.
 [D] è ipermetrope e necessita di occhiali con lenti convergenti.
- 13** Una lente d'ingrandimento:
 [A] produce immagini virtuali.
 [B] produce immagini capovolte.
 [C] può essere fatta con una lente divergente.
 [D] forma l'immagine di un oggetto solo se questo è posto nel suo fuoco.
- 14** Il microscopio composto presentato nella parte di teoria è formato da due lenti. L'immagine formata rispettivamente dall'obiettivo e dall'oculare è:
 [A] reale, reale.
 [B] virtuale, virtuale.
 [C] reale, virtuale.
 [D] virtuale, reale.
- 15** L'aberrazione sferica si presenta nelle lenti e non negli specchi perché:
 [A] la forma dello specchio impedisce il formarsi dell'aberrazione.
 [B] lo spessore della lente non è uniforme.
 [C] l'angolo di incidenza della luce varia per la lente ma non per lo specchio.
 [D] colori diversi sono rifratti con angoli diversi.

Problemi

1. L'indice di rifrazione

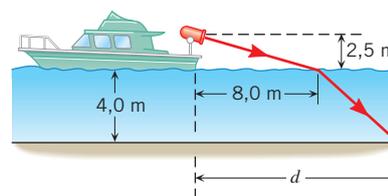
- 1** Il benzene è un idrocarburo il cui indice di rifrazione è riportato nella tabella 14.1.
 ► Qual è la velocità della luce nel benzene?
- 2** Una lastra di vetro ($n = 1,5$) ha uno spessore di $4,0 \cdot 10^{-3}$ m.
 ► Quanto tempo impiega un raggio di luce che incide perpendicolarmente sulla lastra per attraversarla?
- 3** Il rapporto tra gli indici di rifrazione di due materiali A e B è $n_A/n_B = 1,33$. La velocità della luce nel materiale A è $1,25 \cdot 10^8$ m/s.
 ► Qual è la velocità della luce nel materiale B?
- 4** A temperatura ambiente considera i due liquidi alcol etilico e bisolfuro di carbonio.
 ► Calcola il rapporto tra le velocità con cui la luce si propaga nelle due sostanze.
- 5** In un certo intervallo di tempo la luce percorre 6,20 km nel vuoto. Nello stesso intervallo di tempo la luce percorre solo 3,40 km in un liquido.
 * ► Qual è l'indice di rifrazione del liquido?

2. La legge della rifrazione

- 6** Un raggio luminoso proveniente dall'aria incide su una superficie d'acqua con un angolo di incidenza di 43° .
 ► Calcola l'angolo di riflessione e l'angolo di rifrazione.
- 7**  A spotlight on a boat is 2.5 m above the water, and the light strikes the water at a point that is 8.0 m horizontally

zontally displaced from the spotlight (see the figure). The depth of the water is 4.0 m.

- Determine the distance d , which locates the point where the light strikes the bottom.



- 8** Un fascio di luce si propaga nell'aria e incide su un materiale trasparente. Gli angoli di incidenza e di rifrazione sono rispettivamente $63,0^\circ$ e $47,0^\circ$.
 * ► Calcola la velocità della luce nel materiale.
- 9** Un nuotatore che è sott'acqua guarda verso l'alto e vede un raggio di sole a 28° dalla verticale.
 ► Con quale angolo il raggio incide sulla superficie del mare?
- 10** Un medaglione d'argento è sigillato dentro un blocco di plastica trasparente. Un osservatore che si trova nell'aria e guarda dall'alto il medaglione da un punto sulla sua verticale, lo vede a una profondità apparente di 1,6 cm sotto la superficie superiore del blocco.
 * ► Quale sarebbe la profondità apparente del medaglione se sia il blocco sia l'osservatore (senza occhiali) fossero sott'acqua?

11 Supponi che l'osservatore della figura 14.4B sia sulla verticale dell'oggetto sommerso.

 ▶ Dimostra che la profondità apparente dell'oggetto è $d' = d(n_2/n_1)$.

12 Supponi che nella figura 14.5 del testo l'angolo di incidenza sia $\theta_1 = 30,0^\circ$, lo spessore della lastra di vetro sia 6,00 mm e l'indice di rifrazione del vetro sia $n_2 = 1,52$.

 ▶ Trova lo spostamento laterale (in millimetri) del raggio emergente rispetto al raggio incidente.

3. La riflessione totale

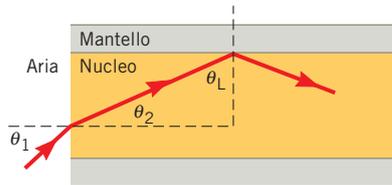
13 Un metodo per determinare l'indice di rifrazione di un solido trasparente è quello di misurare il suo angolo limite quando il solido è nell'aria.
 ▶ Se si misura un angolo limite θ_L di $40,5^\circ$, qual è l'indice di rifrazione del solido?

14 Considera il bisolfuro di carbonio alla temperatura ambiente.

 ▶ Calcola il suo angolo limite.

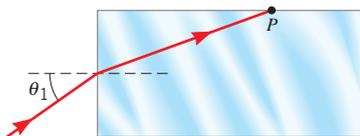
15 La figura rappresenta una fibra ottica formata da un nucleo di vetro Flint ($n_{\text{Flint}} = 1,667$) circondato da un mantello di vetro Crown ($n_{\text{Crown}} = 1,523$). Un fascio di luce proveniente dall'aria entra nella fibra con un angolo di incidenza θ_1 rispetto alla normale.

 ▶ Qual è l'ampiezza di θ_1 se la luce incide sulla superficie di separazione tra il nucleo e il mantello con un angolo uguale all'angolo limite?



16 La figura rappresenta la sezione rettangolare di una lastra di quarzo e un fascio di luce che incide sulla superficie della lastra con un angolo di incidenza $\theta_1 = 34^\circ$, entra nel quarzo e viaggia fino al punto P. La lastra è circondata da un fluido con indice di rifrazione n .

 ▶ Qual è il massimo valore che può avere n perché nel punto P ci sia una riflessione totale?



4. La dispersione della luce

17 Un raggio di luce solare passa da un diamante a un vetro Crown; l'angolo di incidenza è di $35,00^\circ$. Gli indici di rifrazione per le componenti blu e rosse della luce sono: blu ($n_{\text{diamante}} = 2,444$, $n_{\text{Crown}} = 1,531$); rosso ($n_{\text{diamante}} = 2,410$, $n_{\text{Crown}} = 1,520$).

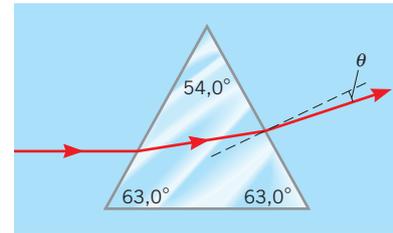
 ▶ Determina l'angolo formato dal raggio blu e dal raggio rosso rifratti nel vetro Crown.

18 Un fascio di luce solare incide su una lastra di vetro Crown a $45,00^\circ$.

 ▶ Calcola l'angolo tra i raggi violetto e rosso nel vetro (usa i dati della tabella 14.2).

19 La figura rappresenta un fascio orizzontale di luce solare che incide su un prisma di ghiaccio. Anche la base del prisma è orizzontale. Il prisma ha un indice di rifrazione $n = 1,31$ ed è circondato da un olio che ha un indice di rifrazione $n = 1,48$.

 ▶ Determina l'angolo θ che la luce emergente dal prisma forma con la normale alla superficie laterale di destra del prisma.



5. Le lenti ■ 6. Immagini formate da lenti ■ 7. L'equazione delle lenti sottili

(Nota. Nei seguenti problemi, quando disegni i diagrammi dei raggi, assicurati che l'altezza h_o dell'oggetto sia molto minore della distanza focale f della lente o dello specchio.)

20 Una lente divergente ha una distanza focale di -32 cm. Un oggetto è posto davanti a questa lente a una distanza di 19 cm. Calcola:
 ▶ la distanza dell'immagine.
 ▶ l'ingrandimento dell'immagine.
 ▶ L'immagine è reale o virtuale, dritta o capovolta, ingrandita o rimpicciolita?

21 Una lente convergente ($f = 12,0$ cm) è tenuta 8,0 cm sopra un quotidiano i cui caratteri sono alti 2,00 mm. Calcola:
 ▶ la distanza dell'immagine.
 ▶ l'altezza dell'immagine (in mm).

22 Una turista fotografa una montagna distante 14 km usando una macchina fotografica che ha un obiettivo con una distanza focale di 50 mm. Fa poi una seconda fotografia della montagna quando è a una distanza di 5 km da essa.

 ▶ Qual è il rapporto tra l'altezza dell'immagine della montagna sulla pellicola della seconda fotografia e quella della prima fotografia?

23 Una lente convergente ha una distanza focale di 88,00 cm. Un oggetto alto 13,0 cm è posto davanti alla lente a una distanza di 155,0 cm.
 ▶ Qual è la distanza dell'immagine?
 ▶ L'immagine è reale o virtuale?
 ▶ Qual è l'altezza dell'immagine?
 (Ricorda di indicare il risultato con il segno appropriato.)

- 24** Una lente divergente ha distanza focale -25 cm.
 * ▶ Calcola la distanza dell'immagine quando l'oggetto dista 38 cm dalla lente.
 ▶ L'immagine è reale o virtuale?
- 25** La distanza tra un oggetto e la sua immagine formata da una lente divergente è di 49 cm. La distanza focale della lente è $-233,0$ cm. Trova:
 * ▶ la distanza dell'immagine.
 ▶ la distanza dell'oggetto.
- 26** Un oggetto è posto a 18 cm da una lente divergente che ha una distanza focale di -12 cm.
 ** ▶ A quale distanza dalla lente deve trovarsi l'oggetto perché la sua immagine risulti rimpicciolita di un fattore 2,0?
- 27** Un oggetto è posto davanti a una lente convergente ($f = 12,0$ cm). La sua immagine è reale e si forma a 21,0 cm dalla lente. Senza spostare l'oggetto, si sostituisce la lente con una lente convergente di distanza focale 16,0 cm. Si forma una nuova immagine reale dell'oggetto.
 ** ▶ Qual è la distanza di questa nuova immagine dalla lente?
- 28** Una lente convergente ($f = 25,0$ cm) è usata per proiettare l'immagine di un oggetto su uno schermo. L'oggetto dista 125 cm dallo schermo.
 ** ▶ Determina le due posizioni in cui può essere messa la lente.

8. Combinazioni di lenti

- 29** Due lenti divergenti identiche sono distanti 16 cm. La distanza focale di ciascuna lente è $-8,0$ cm. Un oggetto è posto a sinistra della lente di sinistra a una distanza di 4,0 cm da essa.
 ▶ Determina la distanza dalla lente di destra dell'immagine finale formata dal sistema delle due lenti.
- 30** Due lenti convergenti sono poste alla distanza di 24,00 cm. La distanza focale di entrambe è 12,00 cm. Un oggetto è posto a 36,00 cm a sinistra della lente più a sinistra.
 * ▶ Determina la distanza della sua immagine finale rispetto alla lente di destra.
- 31** Una lente divergente ($f = -10,0$ cm) si trova a sinistra di una lente convergente ($f = 30,0$ cm) a una distanza di 20,0 cm. Un oggetto alto 3,00 cm è posto a sinistra della lente divergente esattamente nel suo fuoco.
 ▶ Trova la distanza dalla lente convergente dell'immagine finale formata dal sistema delle due lenti. Qual è l'altezza dell'immagine finale e qual è il suo segno?
- 32** Una lente convergente ($f = 12,0$ cm) si trova a sinistra di una lente divergente ($f = -6,00$ cm) a una distanza di 30,0 cm da essa. Un francobollo è posto a sinistra della lente convergente a una distanza di 36,0 cm.
 * ▶ Trova la posizione dell'immagine finale del francobollo formata dal sistema delle due lenti rispetto alla lente divergente.
 ▶ Calcola l'ingrandimento totale.
 ▶ L'immagine finale è virtuale o reale? Rispetto all'oggetto originale, l'immagine finale è diritta o capovolta, ingrandita o rimpicciolita?

9. L'occhio ■ 10. L'ingrandimento angolare e la lente d'ingrandimento

- 33** Una persona ipermetrope, che ha un punto prossimo distante 67,0 m dai suoi occhi, usa occhiali correttivi che le permettono di leggere un giornale tenuto a una distanza di 25 cm dagli occhi.
 Calcola la distanza focale delle lenti degli occhiali supponendo che le lenti siano:
 ▶ una distanza di 2,2 cm dagli occhi.
 ▶ a una distanza di 3,3 cm dagli occhi.
- 34** Una studentessa ha il punto remoto dell'occhio destro a 5,0 m e il punto remoto dell'occhio sinistro a 6,5 m.
 ▶ Determina le diottrie delle lenti a contatto che deve mettere per vedere distintamente oggetti molto lontani.
- 35** Un tuo amico ha il punto prossimo a 138 cm e usa lenti a contatto di distanza focale 35,1 cm.
 ▶ Determina qual è la distanza minima a cui può leggere distintamente un quotidiano.
- 36** Una persona miope ha il punto remoto a soli 3,62 m.
 * Corregge questo difetto usando lenti a contatto. Quando non usa le lenti, ha il punto prossimo a 25 cm.
 ▶ Qual è la distanza minima a cui può leggere distintamente un quotidiano usando le lenti?
- 37** Una persona ipermetrope riesce a leggere i caratteri stampati a una distanza di 25 cm quando usa le sue lenti a contatto che hanno una distanza focale di 45,4 cm. Un giorno però dimentica le lenti e legge usando una lente d'ingrandimento come indicato nella figura 14.32B del testo. Questa lente fornisce un ingrandimento massimo di 7,50 quando è usata da una persona con un punto prossimo alla distanza normale di 25,0 cm.
 ** ▶ Qual è l'ingrandimento angolare massimo che la lente può fornire alla persona ipermetrope che ha dimenticato le lenti a contatto?
- ## 11. Il microscopio e il telescopio ■
- ## 12. Aberrazioni delle lenti
- 38** Un microscopio composto ha un oculare con distanza focale 1,4 cm. L'oculare e l'obiettivo distano 16,0 cm. L'osservatore ha il punto prossimo distante 25 cm e sceglie l'obiettivo in modo da avere -320 ingrandimenti angolari.
 ▶ Quale distanza focale ha l'obiettivo scelto?
- 39** Un anatomista osserva le cellule del muscolo cardiaco con un microscopio che ha due obiettivi selezionabili, uno con un potere diottrico di 100 diottrie e l'altro con un potere diottrico di 300 diottrie. Quando usa l'obiettivo da 100 diottrie, l'immagine della cellula ha un diametro angolare di $3 \cdot 10^{-3}$ rad.
 ▶ Qual è il diametro angolare dell'immagine quando usa l'obiettivo da 300 diottrie?
- 40** Il diametro angolare di Marte quando è visto a occhio nudo è $8,0 \cdot 10^{-5}$ rad. Un telescopio astronomico ha un oculare con una distanza focale di 0,032 m. Quando è visto con il telescopio, il diametro angolare di Marte è $2,8 \cdot 10^{-3}$ rad.

► Trova la distanza focale dell'obiettivo del telescopio.

41 Un telescopio astronomico per uso amatoriale ha un ingrandimento angolare di -155 . La distanza focale dell'oculare è $5,00$ mm.

► Determina la distanza focale dell'obiettivo e la lunghezza approssimativa del telescopio.

42 Un telescopio astronomico ha un ingrandimento angolare di -184 e la distanza focale del suo obiettivo è $48,0$ cm.

► Qual è la distanza focale dell'oculare?

43 Un astrofilo si costruisce un telescopio utilizzando due lenti, una di 11 diottrie e una di $1,3$ diottrie.

► Quale lente deve usare come obiettivo?

► A quale distanza deve posizionare le due lenti?

► Qual è l'ingrandimento angolare del telescopio?

44 Un telescopio astronomico è impiegato per osservare un oggetto relativamente vicino, che si trova a una distanza di $114,00$ m dall'obiettivo del telescopio. Le distanze focali dell'obiettivo e dell'oculare sono rispettivamente di $1,500$ m e $0,070$ m. In questo caso, per calcolare l'ingrandimento angolare non si può usare l'equazione $M \approx -f_o/f_e$ perché l'oggetto è troppo vicino.

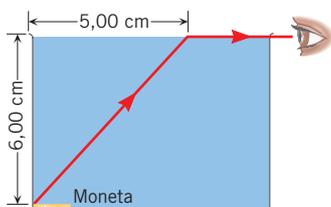
► Determina l'ingrandimento angolare mediante l'equazione delle lenti sottili e l'equazione dell'ingrandimento.

Suggerimento: osserva la figura 14.34 del testo e nota che i fuochi F_o e F_e sono così vicini che la loro distanza può essere considerata trascurabile.

PROBLEMI FINALI

45 La figura rappresenta una moneta sul fondo di un recipiente di vetro pieno di un liquido sconosciuto. Un raggio di luce proveniente dalla moneta viaggia fino alla superficie del liquido e viene rifratto quando passa nell'aria. Una persona vede questo raggio rifratto come un raggio radente alla superficie del liquido.

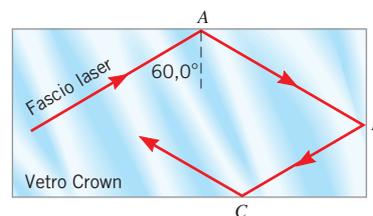
► Qual è la velocità di propagazione della luce nel liquido?



46 La figura rappresenta la sezione rettangolare di una lastra di vetro ottico e un fascio laser che incide sulla superficie superiore della lastra con un angolo d'incidenza di $60,0^\circ$. Dopo essere stato riflesso dalla superficie superiore, il fascio viene riflesso dalle superfici laterali e dalla superficie inferiore della lastra.

► Se la lastra è circondata dall'aria, determina in quale dei punti A , B o C una parte del fascio esce per la prima volta dalla lastra.

► Rispondi alla domanda precedente supponendo che la lastra di vetro sia circondata da acqua.



47 Un oggetto è posto a una distanza di $9,0$ cm da una lente convergente ($f = 6,0$ cm).

► Traccia con precisione un diagramma dei raggi e determina la posizione dell'immagine.

48 Un nuotatore che è sott'acqua guarda verso l'alto e vede sulla sua verticale un trampolino a un'altezza apparente di $4,0$ m sulla superficie dell'acqua.

► Qual è l'altezza reale del trampolino?

49 Una fotocopiatrice usa una lente per formare un'immagine di un documento su un tamburo rotante. La fotocopia è prodotta stampando questa immagine.

► Che tipo di lente è usata nella fotocopiatrice?

► Se il documento e la fotocopia devono avere le stesse dimensioni ma risultare capovolti uno rispetto all'altro, qual è la distanza tra la lente e il documento e la distanza tra la lente e l'immagine?

(Esprimi le tue risposte in funzione della distanza focale della lente.)

50 Un oggetto è posto davanti a una lente convergente ($f = 0,30$ m). L'ingrandimento della lente è $G = 4,0$.

► In quale direzione rispetto alla lente dovrebbe essere spostato l'oggetto perché l'ingrandimento diventi $G = -4,0$?

► Di quanto dovrebbe essere spostato l'oggetto?

51 Una persona di 40 anni usa lenti a contatto con una distanza focale di $65,0$ cm per leggere un libro tenendolo a 25 cm di distanza dagli occhi. Quando ha 45 anni scopre che, usando le stesse lenti, deve tenere il libro a una distanza di $29,0$ cm per riuscire a leggerlo.

► Di quanto è cambiata la distanza del suo punto prossimo?

► Qual è la distanza focale delle lenti a contatto che dovrebbe usare per leggere un libro tenendolo a una distanza di 25 cm?

52 Una persona miope ha un punto remoto distante $6,0$ m dai suoi occhi e usa lenti a contatto che le permettono di vedere distintamente gli oggetti lontani. Un albero alto $2,0$ m dista 18 m da questa persona.

► Quando guarda l'albero usando le lenti a contatto, qual è la distanza dell'immagine dell'albero?

► Qual è l'altezza dell'immagine dell'albero formata dalle lenti a contatto?

53 Osservi un oggetto attraverso un telescopio, prima guardando attraverso l'oculare, poi guardando attraverso l'obiettivo. L'ingrandimento angolare è $32\,800$ volte maggiore la prima volta rispetto alla seconda.

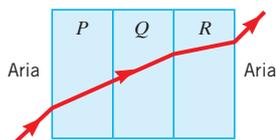
► Calcola l'ingrandimento angolare del telescopio.

QUESITI

- 1 Dopo aver definito l'indice di rifrazione n di un materiale trasparente, enuncia e dimostra la legge della rifrazione.
- 2 Descrivi il fenomeno della riflessione totale e deriva la formula per l'angolo limite.
- 3 Descrivi le caratteristiche tecniche delle lenti convergenti e di quelle divergenti.
- 4 Ricava la formula delle lenti sottili e illustra con un disegno la costruzione di un'immagine formata da una lente sottile, variando la posizione dell'oggetto rispetto al centro della lente.
- 5 Illustra i difetti della miopia e dell'ipermetropia e, per ciascuno, quale tipo di lente può essere usato per correggerlo.

OLIMPIADI DELLA FISICA

- 1 Un ingegnere, per realizzare una finestra attraverso cui osservare un esperimento, utilizza tre diverse lamine P , Q e R di materiali plastici trasparenti. Un raggio di luce attraversa la finestra come mostrato in figura. Quali sono i possibili valori dell'indice di rifrazione dei tre materiali plastici?



	P	Q	R
A	1,5	1,9	2,3
B	1,5	1,5	2,3
C	2,3	2,3	1,5
D	2,3	1,9	1,5
E	1,5	1,5	1,2

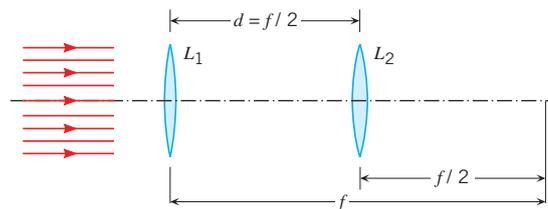
(Gara di 1° livello edizione 2008)

- 2 Un oggetto viene posto a 60 cm da una lente convergente. L'immagine prodotta è rovesciata e di dimensione pari a metà di quella dell'oggetto. Qual è la distanza focale della lente?
 - A) 90 cm
 - B) 60 cm
 - C) 45 cm
 - D) 30 cm
 - E) 20 cm

(Gara di 1° livello edizione 2006)

- 3 Sia $f = 16$ cm la focale di una lente sottile. A distanza $f/2$ da questa lente, sullo stesso asse ottico, si dispone una seconda lente di focale pari a $f/2$. Una sorgente puntiforme all'infinito è posta sull'asse ottico, a sinistra del sistema delle due lenti, come mostrato in figura. Attra-

verso una costruzione geometrica o, in alternativa, con una soluzione analitica, si determini a che distanza dalla seconda lente si forma l'immagine della sorgente.



(Gara di 2° livello edizione 2007)

TEST DI AMMISSIONE ALL'UNIVERSITÀ

- 1 Qual è la lunghezza d'onda di un fascio di luce monocromatica di frequenza $\mu = 4,28 \cdot 10^{14}$ Hz quando si propaga nell'acqua, il cui indice di rifrazione assoluto è 1,33?
 - A) 530 nm
 - B) 700 nm
 - C) 620 nm
 - D) 800 nm

(Concorso a borse di studio per l'iscrizione ai corsi di laurea della classe «Scienze e Tecnologie Fisiche» della SIF, 2006-2007)

- 2 Un raggio luminoso che viaggia nel mezzo ottico A , se raggiunge la superficie di separazione fra A e un altro mezzo B si spezza, a volte, in due parti che costituiscono il raggio riflesso e quello trasmesso. I , R e T sono rispettivamente le intensità dei raggi incidente, riflesso e trasmesso.
 - A) Il fenomeno si chiama «rifrazione».
 - B) Il fenomeno si chiama «diffrazione».
 - C) Il fenomeno si chiama «dispersione».
 - D) $R = I + T$
 - E) $T = I + R$

(Prova di ammissione al corso di laurea in Odontoiatria e Protesi dentaria, 2003-2004)

PROVE D'ESAME ALL'UNIVERSITÀ

- 1 Un oggetto viene posto davanti a una lente convergente a una distanza di 10 cm da essa. Sapendo che la lente ha distanza focale $f = 2,5$ cm, calcolare:
 - a) il potere diottrico della lente, espresso in diottrie;
 - b) dove si forma l'immagine;
 - c) l'ingrandimento della lente;
 - d) le dimensioni dell'immagine sapendo che l'oggetto è una sbarretta alta $O = 30$ cm.

(Tratto da esame di Fisica, corso di laurea in Scienze biologiche, Università di Genova, 2005-2006)

- 2 Determinare la distanza da una lente sottile, convergente, di potere diottrico pari a 12 diottrie alla quale deve trovarsi un oggetto perché si formi un'immagine con ingrandimento lineare uguale a 3.

(Esame di Fisica, corso di laurea in Scienze biologiche, Università di Torino, 2001-2002)