

Strumenti ottici

Concetti da rivedere

- Distinzione tra immagini reali e virtuali (Paragrafo 21.6)
- Ingrandimento (Paragrafo 21.8)
- Rifrazione (Paragrafo 21.3)
- Lenti sottili (Paragrafo 21.9)
- Costruzione di immagini con lo schema di raggi (Paragrafo 21.6)
- Approssimazione per piccoli angoli (Appendice A.7)

APPLICAZIONI BIOMEDICHE



- Occhio umano (Paragrafo 22.3; Quesiti 10, 13, 14, 17, 18; Problemi 22-24, 26)
- Lenti correttive (Paragrafo 22.3; Esempi 22.4 e 22.5; Problemi di verifica 22.4 e 22.5; Problemi 25, 27, 28, 63, 74, 75)
- Microscopio (Paragrafo 22.5; Problema 39)

22.1 SISTEMI DI LENTI

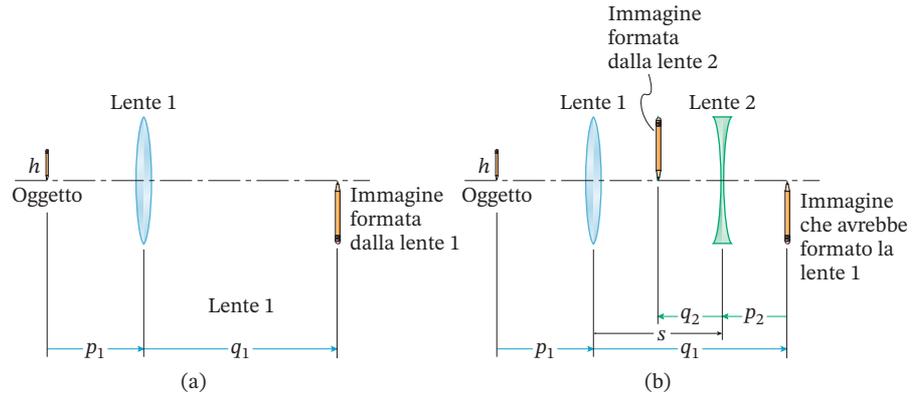
Gli strumenti ottici sono generalmente costituiti da un sistema di due o più lenti. Iniziamo il capitolo considerando cosa succede quando raggi luminosi uscenti da una lente attraversano un'altra lente. L'immagine formata dalla prima lente diventa l'oggetto per la seconda. Supponiamo che i raggi luminosi divergano da un punto dell'immagine formata dalla prima lente. I raggi verranno rifratti dalla seconda lente come se provenissero da un punto dell'oggetto. La posizione e la dimensione dell'immagine formata dalla seconda lente possono quindi essere calcolate applicando l'equazione delle lenti sottili, dove la distanza dell'oggetto p è data dalla distanza dell'immagine, formata dalla prima lente, dalla seconda lente. Quindi, in un sistema di lenti, si applica l'equazione delle lenti sottili singolarmente a ogni lente del sistema, ricordando che l'oggetto per una lente è dato dall'immagine formata dalla lente precedente nel sistema. Si ricordi anche che nell'equazione delle lenti sottili le distanze dell'oggetto e dell'immagine p e q vengono sempre misurate rispetto al centro della lente. Questa regola vale sia per un sistema di lenti che di specchi.

Nel Capitolo 21 tutti gli oggetti considerati erano reali e la distanza p sempre positiva. In un sistema di lenti è possibile invece avere un **oggetto virtuale** per il quale la distanza p è *negativa*. Se una lente produce un'immagine reale e si interpone davanti all'immagine una seconda lente, i raggi convergono in un punto

● In un sistema di lenti l'immagine formata da una lente diviene oggetto per l'altra lente.



Figura 22.1 (a) La lente 1, convergente, forma un'immagine reale di un oggetto. (b) La lente 2 viene posta a una distanza $s < q_1$ dopo la lente 1. La lente 2 intercetta i raggi luminosi prima che formino l'immagine reale, ma possiamo pensare l'immagine che *avrebbero* formato, come un *oggetto virtuale* per la lente 2. Per un oggetto virtuale si usa una distanza p negativa.



posto oltre la seconda lente, quindi l'immagine diviene un oggetto virtuale per la seconda lente (Figura 22.1). Se, prima che l'immagine reale possa essere formata da una lente, si interpone una seconda lente, i raggi che colpiscono la seconda lente convergeranno in un punto o divergeranno da un punto. Questa situazione all'apparenza complicata viene trattata semplicemente utilizzando per un oggetto virtuale una distanza p negativa.



Quando una lente forma un'immagine reale, la sua *posizione rispetto a una seconda lente* determina se l'oggetto sarà reale o virtuale per la seconda lente. Se la prima lente forma un'immagine reale *dietro* la seconda lente, l'immagine sarà un oggetto virtuale per la seconda lente. Se la prima lente forma invece un'immagine reale o virtuale *prima* della seconda lente, l'immagine sarà un oggetto reale per la seconda lente.

Per un sistema di due lenti sottili separate da una distanza s , si applica l'equazione delle lenti sottili separatamente per ogni singola lente:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1}$$

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2}$$

dove la distanza dell'oggetto p_2 per la seconda lente è:

$$p_2 = s - q_1 \quad (22-1)$$

L'Equazione (22-1) dà il segno corretto per p_2 in ogni caso. Se $q_1 < s$, allora l'immagine formata dalla prima lente è sul lato di incidenza della seconda lente e quindi rappresenta un oggetto reale per la seconda lente ($p_2 > 0$). Se $q_1 > s$, allora la seconda lente devia i raggi luminosi prima che possano formare l'immagine. L'immagine che viene generata dalla prima lente è posta oltre la seconda lente; l'immagine diviene quindi un oggetto virtuale per la seconda lente ($p_2 < 0$).

Diagramma dei raggi in un sistema di due lenti

Nel diagramma dei raggi per un sistema di due lenti, *solo uno dei raggi principali per la prima lente è anche raggio principale per la seconda lente*. La Figura 22.2 mostra un sistema costituito da due lenti, con la prima lente (lente 1) convergente e la seconda lente (lente 2) divergente. Il raggio 1 che proviene dall'oggetto passa per il punto focale F'_1 ed emerge dalla lente 1 parallelo all'asse principale. Il raggio 1 è quindi un raggio principale per la lente 2 uscendo come se provenisse direttamente da F_2 . In assenza della lente 2 il raggio 1 continuerebbe parallelo all'asse principale. Per localizzare l'immagine formata dalla lente 1, tracciamo un altro raggio principale (raggio 2) e ignoriamo la presenza della lente 2. I raggi 1 e 2 individuano quindi l'immagine formata dalla lente 1. Poiché l'immagine si forma oltre la lente 2, l'immagine diventa un oggetto virtuale per la lente 2.

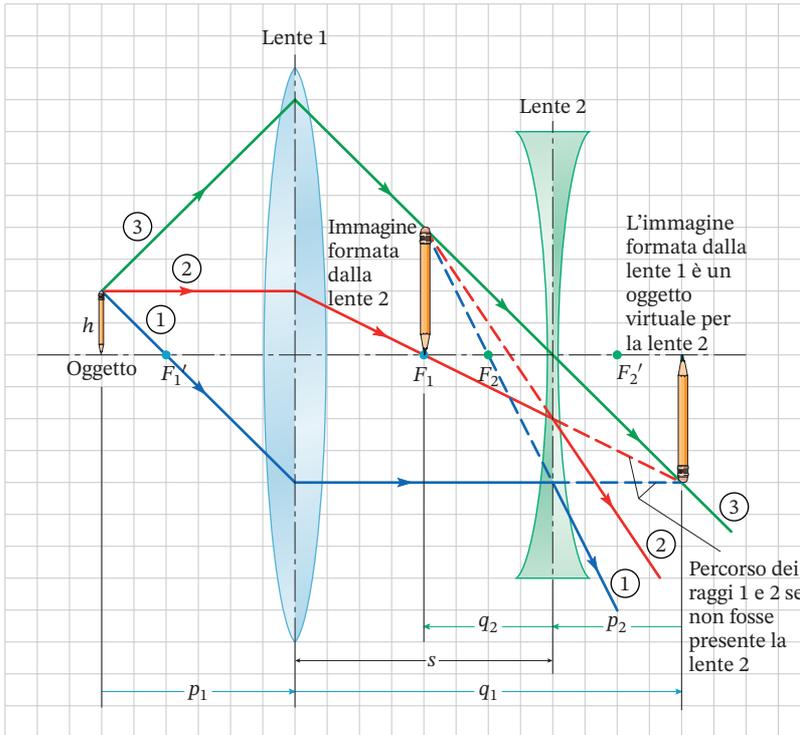


Figura 22.2
Diagramma dei raggi per un sistema costituito da due lenti.

Per ora non siamo ancora in grado di sapere cosa succede al raggio 2 quando incide sulla lente 2.

Per trovare l'immagine finale, è necessario individuare un altro raggio principale per la lente 2. Tracciamo quindi il raggio 3 in modo che attraversi senza alcuna deflessione il centro della lente 2; l'intersezione dei raggi 1 e 3 individua l'immagine finale, che è virtuale. Possiamo quindi ora completare il percorso del raggio 2; esso deve necessariamente uscire dalla lente 2 come se provenisse da un punto dell'immagine.

Ingrandimento

Si supponga di avere un sistema di N lenti. Sia h la dimensione dell'oggetto, h_1 la dimensione dell'immagine formata dalla prima lente e così via. Poiché vale:

$$\frac{h_N}{h} = \frac{h_1}{h} \times \frac{h_2}{h_1} \times \frac{h_3}{h_2} \times \dots \times \frac{h_N}{h_{N-1}}$$

l'ingrandimento lineare (o trasversale) totale dovuto alle N lenti è dato dal prodotto (non dalla somma) degli ingrandimenti delle singole lenti che costituiscono il sistema:

Ingrandimento trasversale totale

$$m_{\text{totale}} = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_N \quad (22-2)$$

Mettilti alla prova 22.1

I quadretti della Figura 22.2 hanno lati di 1 cm. Quanto valgono le distanze p_1 , q_1 , s , p_2 e q_2 ? Quanto valgono gli ingrandimenti lineari dovuti alla lente 1 e alla lente 2? Quanto vale l'ingrandimento lineare totale? Fai attenzione a utilizzare il corretto segno algebrico nel calcolo che dovrai fare.

Esempio 22.1

L'immagine virtuale come un oggetto

Consideriamo un sistema costituito da due lenti. Supponiamo che la prima lente formi un'immagine virtuale. L'immagine è un oggetto virtuale per la seconda lente?

Impostazione Un oggetto viene considerato reale o virtuale se i raggi incidenti sulla seconda lente sono rispettivamente convergenti o divergenti.

Soluzione e discussione Se la prima lente forma un'immagine virtuale, allora i raggi provenienti da ogni punto dell'oggetto *divergono* quando emergono dalla prima lente. Per individuare il punto dove si forma l'immagine prolunghiamo la traiettoria dei raggi fino a individuare il punto dove si intersecano (quindi il punto dal quale i raggi sembrano originare). Poiché i raggi in-

cidenti sulla seconda lente sono divergenti, l'immagine deve essere un oggetto *reale* per la seconda lente.

Soluzione alternativa: L'immagine formata dalla prima lente è posta *davanti* alla seconda lente. Così i raggi si comportano come se divergessero da un oggetto reale posto nella stessa posizione.

Problema di verifica 22.1 L'immagine reale come un oggetto

Consideriamo un sistema costituito da due lenti. Supponiamo che la prima lente formi un'immagine reale. L'immagine è un oggetto *reale* o virtuale per la seconda lente? Se sono possibili entrambi i casi, cosa determina se l'oggetto è reale o virtuale?

Esempio 22.2

Due lenti convergenti

Consideriamo un sistema costituito da due lenti convergenti separate da una distanza di 40.0 cm. Le lunghezze focali siano $f_1 = +10.0$ cm e $f_2 = +12.0$ cm. Un oggetto alto 4.0 cm sia posto a 15.0 cm dalla prima lente. Trovare le distanze dei punti dove si formano l'immagine intermedia e finale, l'ingrandimento finale e l'altezza dell'immagine finale.

Impostazione Schematizziamo il problema e applichiamo l'equazione delle lenti sottili ai singoli componenti del sistema. L'ingrandimento finale è dato dal prodotto degli ingrandimenti delle singole lenti.

Dati: $p_1 = +15.0$ cm; $f_1 = +10.0$ cm; $f_2 = +12.0$ cm; separazione $s = 40.0$ cm; $h = 4.00$ cm

Da trovare: q_1 ; q_2 ; m ; h'

Soluzione La Figura 22.3 riporta il diagramma dei raggi, ottenuto considerando due raggi principali per ogni lente, che permette di costruire l'immagine intermedia e l'immagine finale. Dal diagramma dei raggi osserviamo che l'immagine intermedia è reale e posta alla sinistra della seconda lente (lente 2 in Figura 22.3); l'immagine finale è invece virtuale, invertita, ingrandita e posta alla sinistra della prima lente (lente 1 in Figura 22.3).

Applicando l'equazione delle lenti sottili alla lente 1 si ottiene:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} \quad (21-10)$$

e introducendo i dati del problema otteniamo:

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{15.0 \text{ cm}} = \frac{1}{30 \text{ cm}}$$

quindi $q_1 = +30$ cm.

Dalla Figura 22.3 osserviamo che la distanza dell'oggetto per la lente 2 (p_2) è pari alla distanza tra le due lenti (s) diminuita della distanza dell'immagine formata dalla lente 1 (q_1). Quindi:

$$p_2 = s - q_1 = 40.0 \text{ cm} - 30 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$$

La distanza dell'oggetto è positiva poiché l'oggetto è reale: l'oggetto si trova alla sinistra della lente 2 e i raggi provenienti dall'oggetto ed entranti nella lente 2 sono divergenti. Applicando l'equazione delle lenti sottili alla lente 2 si ottiene:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{12.0 \text{ cm}} - \frac{1}{10 \text{ cm}} = -\frac{1}{60 \text{ cm}}$$

quindi $q_2 = -60$ cm.

L'immagine si forma alla sinistra della lente 2 a una distanza di 60 cm dalla lente o, equivalentemen-

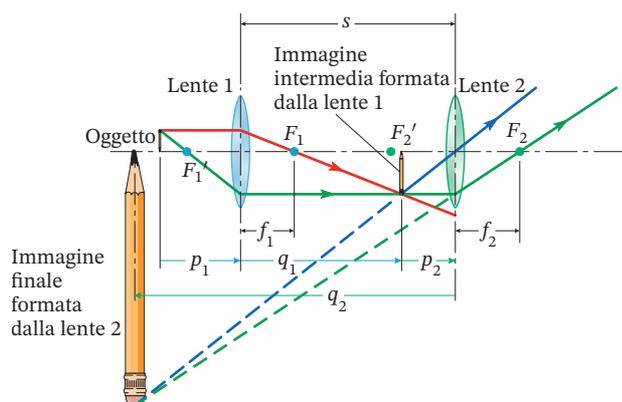

Figura 22.3

Diagramma dei raggi dell'Esempio 22.2. L'immagine reale intermedia formata dalla lente 1 si trova usando due raggi principali, quelli in rosso e verde. Il raggio verde è raggio principale anche per la lente 2. Il raggio principale, in blu, che passa per il centro della lente 2, non è reale – la lente 1 non è larga a sufficienza da far passare un raggio con quella direzione attraverso la lente 2. Tuttavia, possiamo utilizzarlo per trovare l'immagine finale.

te, alla sinistra della lente 1 a una distanza di 20 cm. La distanza dell'immagine è negativa, quindi l'immagine è virtuale.

Data una lente, l'ingrandimento vale:

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

In un sistema di due lenti l'ingrandimento finale è dato da:

$$\begin{aligned} m &= m_1 \times m_2 = -\frac{q_1}{p_1} \times \left(-\frac{q_2}{p_2} \right) \\ &= \left(-\frac{30 \text{ cm}}{15.0 \text{ cm}} \right) \times \left(-\frac{-60 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} \right) = -12 \end{aligned}$$

L'immagine finale risulta quindi invertita, come indicato dal valore negativo di m , e la sua altezza è:

$$4.00 \text{ cm} \times 12 = 48 \text{ cm}$$

Discussione Confrontiamo i valori numerici ottenuti con il diagramma dei raggi. Come ci aspettiamo, l'immagine intermedia è reale e posta alla sinistra della lente 2 ($q_1 = 30 \text{ cm} < s = 40 \text{ cm}$). L'immagine finale è virtuale ($q_2 < 0$), invertita ($m < 0$) e ingrandita ($|m| > 1$).

Problema di verifica 22.2 Oggetti posti a distanze maggiori del doppio della lunghezza focale

Consideriamo nuovamente l'Esempio 22.2 nel caso in cui lo stesso oggetto venga posto davanti alla prima lente a una distanza di 25.0 cm e la seconda lente sia avvicinata a solo 10.0 cm dalla prima lente. Dal diagramma dei raggi, cosa si può dire dell'immagine finale?

22.2 MACCHINE FOTOGRAFICHE

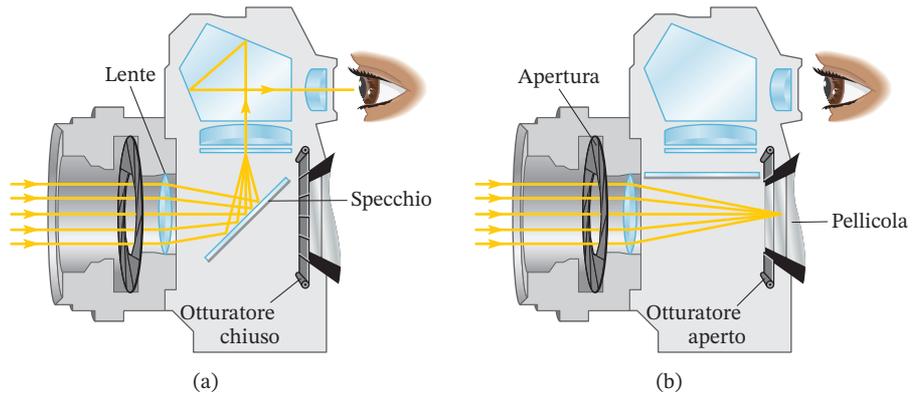
Uno tra gli strumenti ottici più semplici è la macchina fotografica, spesso costituita da una sola lente o, in alcuni casi, da una scatola con un semplice foro. La Figura 22.4 mostra una macchina fotografica da 35 mm. La macchina fotografica utilizza una lente convergente per creare un'immagine reale sulla pellicola. L'immagine deve essere reale per *impressionare* la pellicola (cioè innescare una reazione chimica): i raggi luminosi provenienti da un punto dell'oggetto da fotografare devono convergere a un corrispondente punto sulla pellicola.

Nelle macchine fotografiche di buona qualità la distanza lente-pellicola può essere regolata secondo l'equazione delle lenti sottili, affinché possa essere impressionata sulla pellicola un'immagine ben definita. Per oggetti lontani, la lente deve essere posizionata a una distanza dalla pellicola pari a una lunghezza focale. Per oggetti più vicini, la lente deve invece essere posizionata a una distanza leggermente maggiore poiché l'immagine si forma oltre il punto focale. Alcune macchine fotografiche hanno il fuoco fisso: la lente si trova in una posizione fissa e quindi tali macchine possono produrre buone immagini solo per oggetti lontani. Per fotografare oggetti vicini è dunque molto importante che la posizione della lente sia regolabile.



Macchine fotografiche

Figura 22.4 Macchina fotografica da 35 mm dotata di una lente convergente che forma un'immagine reale sulla pellicola (si noti che 35 mm non è la lunghezza focale della lente, ma la dimensione della pellicola). La macchina fotografica mette a fuoco oggetti a distanze differenti avvicinando o allontanando la lente dalla pellicola. (a) L'otturatore (*shutter*) è chiuso per evitare l'esposizione della pellicola. L'operatore vede l'immagine nell'oculare. (b) Lo specchio si alza e l'otturatore si apre per un breve intervallo di tempo per impressionare la pellicola.



In una macchina fotografica digitale la pellicola viene sostituita da un dispositivo CCD (*charge-coupled device*) che produce l'immagine in modo molto simile alla pellicola. L'immagine digitale rimane immagazzinata nel dispositivo CCD fino a quando non viene trasferita a un supporto magnetico o di altro tipo. Successivamente la memoria del dispositivo CCD viene cancellata in modo che il dispositivo sia in grado di registrare una nuova immagine. Le immagini salvate possono essere processate e visualizzate sul monitor di un computer o stampate.

Il principio di funzionamento del proiettore è proprio l'inverso di quello della macchina fotografica. Nel proiettore, una sorgente luminosa viene posta nel punto focale di una lente convergente in modo che raggi luminosi paralleli emergano dalla lente e illuminino l'oggetto; una lente convergente successiva crea un'immagine reale invertita dell'oggetto sullo schermo.

● Le macchine fotografiche e i proiettori formano immagini reali.

Mettilti alla prova 22.2

La lente di una macchina fotografica ha lunghezza focale f . È possibile utilizzare questa macchina per fotografare un oggetto che si trova a distanza minore di f dalla lente? Prova a spiegare.

Esempio 22.3

La macchina fotografica con fuoco fisso

La lente di una macchina fotografica ha lunghezza focale di 50.0 mm. Vengono scattate fotografie a oggetti posti in differenti posizioni, sia molto lontano (e cioè a distanza infinita) sia a soli 6.00 m dalla lente. (a) Per un oggetto posto all'infinito, a quale distanza dalla lente si forma l'immagine? (b) Per un oggetto posto a una distanza di 6.00 m, a quale distanza dalla lente si forma l'immagine?

Impostazione Applichiamo l'equazione delle lenti sottili nei due casi e calcoliamo dove si formano le immagini.

Soluzione (a) Per l'equazione delle lenti sottili:

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

Se l'oggetto è posto all'infinito, $1/p = 1/\infty = 0$:

$$0 + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Quindi $q = f$.

La distanza a cui si forma l'immagine è uguale alla lunghezza focale della lente; nel caso considerato $q = 50.0$ mm.

(b) Sia ora $p = 6.00$ m. Dall'equazione delle lenti sottili si ottiene:

$$\frac{1}{6.00 \text{ m}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{50.0 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

Risolvendo per q :

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{50.0 \times 10^{-3} \text{ m}} - \frac{1}{6.00 \text{ m}}$$

quindi $q = 50.4 \text{ mm}$.

Discussione Le due immagini si formano a una distanza tra loro di soli 0.4 mm, quindi la macchina fotografica è in grado di ottenere fotografie ben a fuoco di oggetti posti a distanze variabili da 6 m all'in-

finito anche mantenendo una distanza fissa tra lente e pellicola.

Problema di verifica 22.3 Le fotografie in primo piano

La stessa lente dell'Esempio 22.3 viene utilizzata in una macchina fotografica con fuoco regolabile per fotografare un oggetto posto a una distanza di 1.50 m. A quale distanza dalla pellicola deve essere posta la lente?

Come regolare l'esposizione di una pellicola

Un diaframma, costituito da lamine metalliche sovrapposte, si comporta come l'iride dell'occhio; regola, cioè, la grandezza dell'apertura attraverso la quale la luce entra nella macchina fotografica (vedi Figura 22.4). L'otturatore è il meccanismo che regola il *tempo di esposizione* – l'intervallo di tempo durante il quale la luce passa attraverso l'apertura. La grandezza dell'apertura e il tempo di esposizione sono regolati in modo che la pellicola sia esposta alla giusta quantità di luce. Se questi due parametri vengono scelti in maniera scorretta, la pellicola risulta sovra- o sottosposta.

Profondità di campo

Quando una lente viene messa a fuoco, regolando opportunamente la sua distanza q dalla pellicola, soltanto gli oggetti che si trovano sul piano focale (cioè alla distanza p dalla lente) formano immagini nitide sulla pellicola. I raggi provenienti da un punto dell'oggetto fuori da quel piano producono un *alone* sulla pellicola (*circolo di confusione*) invece che un singolo punto (Figura 22.5a). In un certo intervallo di distanze dal piano, il "circolo di confusione" risulta sufficientemente piccolo da formare comunque un'immagine nitida sulla pellicola. Tale intervallo di distanze viene chiamato *profondità di campo*.

Un diaframma può essere posizionato davanti a una lente per ridurne l'apertura, diminuendo la grandezza del circolo di confusione (Figura 22.5b). Infatti, a una riduzione dell'apertura corrisponde un aumento della profondità di campo. Tuttavia, con una minore apertura è necessario un tempo di esposizione più lungo per esporre correttamente la pellicola; questo può costituire un problema fotografando soggetti in movimento o impugnando la macchina fotografica non

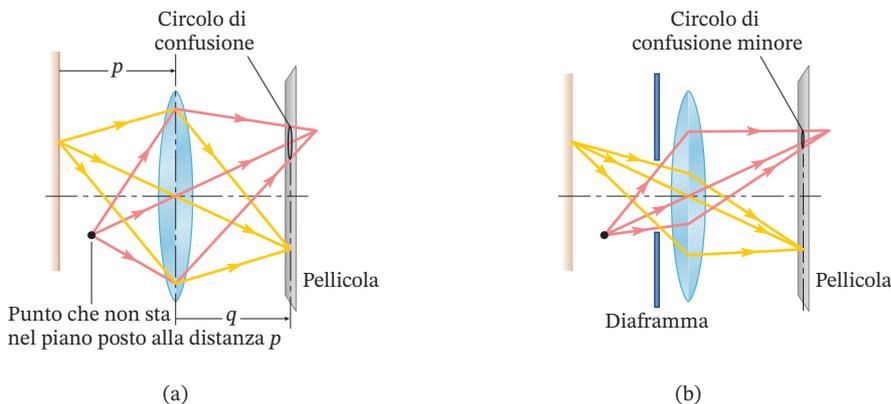
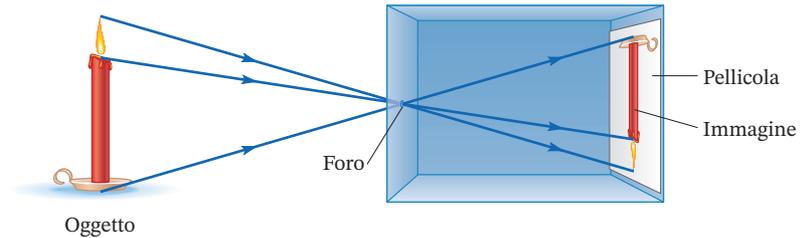


Figura 22.5 (a) Circolo di confusione per un punto al di fuori del piano focale. (b) Una riduzione dell'apertura riduce il circolo di confusione e quindi aumenta la profondità di campo.

Figura 22.6 Una piccola camera oscura.



saldamente. Si deve quindi trovare un giusto compromesso tra l'uso di una piccola apertura – cosicché la maggior parte degli oggetti sia a fuoco – e l'uso di un breve tempo di esposizione per non avere immagini sfuocate a causa del movimento del soggetto o della macchina fotografica.

Camera oscura

La più semplice macchina fotografica è la cosiddetta **camera oscura**. Tale macchina è realizzata semplicemente facendo un forellino sulla parete di una scatola (Figura 22.6). Un'immagine reale invertita si forma sulla parete della scatola opposta al foro. L'immagine può essere registrata su una lastra fotografica (una lastra di vetro ricoperta da un'emulsione fotosensibile) o su una pellicola posizionata sulla parete posteriore della scatola.

Molti artisti hanno utilizzato il principio della *camera oscura* lavorando in una stanza con una piccola apertura che lasciava entrare i raggi luminosi provenienti da una scena esterna. L'immagine poteva essere proiettata su una tela e l'artista poteva disegnare uno schizzo della scena. Jan van Eyck, Tiziano, Caravaggio, Vermeer e Canaletto sono solo alcuni degli artisti di cui si conosca, o presupponga, l'utilizzo della *camera oscura*.

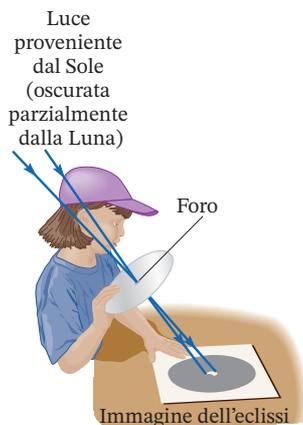


Figura 22.7 Camera oscura predisposta per osservare un'eclissi di Sole.

LA FISICA NEL QUOTIDIANO

Un modo non pericoloso per osservare il Sole è l'utilizzo di un dispositivo simile alla camera oscura (Figura 22.7). (Questo è un ottimo sistema per osservare un'eclissi solare.) Fora un pezzo di cartone, un foglio di carta o di alluminio. Metti un foglio bianco sotto il foro e osserva l'immagine del Sole su di esso. (Ricorda di non guardare mai direttamente il Sole, anche durante un'eclissi, perché può causare seri danni alla vista.)

Nella camera oscura non si forma un'immagine *reale* in quanto i raggi provenienti da un punto dell'oggetto non convergono verso un singolo punto sulla parete. Il foro della camera oscura lascia entrare uno stretto cono di raggi luminosi divergenti da ogni punto dell'oggetto; il cono di raggi crea una piccola macchia circolare sulla parete. Se tale macchia è sufficientemente piccola, l'immagine appare nitida all'occhio. Un foro di diametro inferiore permette di ottenere un'immagine più *nitida* ma più fioca.

22.3 OCCHIO UMANO

Occhio umano



L'occhio umano è simile a una macchina fotografica digitale. Mentre la macchina fotografica digitale forma un'immagine reale su un dispositivo CCD, l'occhio forma un'immagine reale sulla *retina*, una membrana con circa 125 milioni di cellule fotorecetrici (*bastoncelli e coni*). Il meccanismo di messa a fuoco nell'occhio

è però differente. In una macchina fotografica digitale la lente viene avvicinata o allontanata dalla pellicola per far sì che l'immagine si formi sulla pellicola stessa anche quando la distanza dell'oggetto cambia. Nell'occhio, il cristallino è posto a una distanza fissa dalla retina, ed è proprio la lunghezza focale del cristallino che viene modificata perché la posizione dell'immagine rimanga focalizzata sulla retina quando cambia la distanza dell'oggetto.

La Figura 22.8 mostra l'anatomia dell'occhio. L'occhio ha approssimativamente una forma sferica, con un diametro medio di 2.5 cm. Una piccola protuberanza, localizzata sulla parte anteriore dell'occhio e ricoperta all'esterno da una membrana trasparente (*cornea*), è riempita da un fluido acquoso (*umor acqueo*). Il fluido viene mantenuto in sovra-pressione per ottenere un rigonfiamento verso l'esterno. La superficie curva della cornea rifrange i raggi luminosi che entrano nell'occhio. Il *cristallino* permette la messa a fuoco fine. Per molti scopi la cornea e il cristallino possono essere considerati come una singola lente con lunghezza focale regolabile e distante circa 2.0 cm dalla retina. Per visualizzare oggetti posti a 25 o più centimetri dall'occhio, che è considerata la visione normale, la lunghezza focale deve variare tra 1.85 cm e 2.00 cm (vedi il Problema 22).

Il volume sferico dell'occhio, dietro al cristallino, è riempito da una sostanza gelatinosa (*umor vitreo*). Gli indici di rifrazione dell'umor acqueo e dell'umor vitreo sono simili a quello dell'acqua ($n = 1.333$). L'indice di rifrazione del cristallino, costituito da un materiale fibroso e gelatinoso, è leggermente maggiore ($n = 1.437$). La cornea ha un indice di rifrazione pari a $n = 1.351$.

L'occhio ha un'apertura regolabile, la *pupilla*, che funziona come il diaframma di una macchina fotografica (controlla, cioè, la quantità di luce che entra nell'occhio). La dimensione della pupilla è regolata dall'*iride*, un anello di tessuto muscolare (la parte colorata dell'occhio). In presenza di luce intensa, l'iride si espande per diminuire la dimensione della pupilla e quindi ridurre la quantità di luce che entra nell'occhio. Con poca luce l'iride si contrae, permettendo l'ingresso di una quantità maggiore di luce attraverso la pupilla dilatata. L'espansione e la contrazione dell'iride sono un *riflesso* automatico in risposta alla variazione dell'esposizione luminosa. In condizioni di intensa luminosità, il diametro della pupilla è di circa 2 mm; con poca luce di circa 8 mm.

Sulla retina le cellule fotorecetrici, distinte in coni e bastoncelli, sono altamente concentrate in una piccola regione chiamata *macula lutea*. I coni, di tre

● Modello semplificato dell'occhio umano: una lente convergente di lunghezza focale variabile posta a una distanza fissa dalla retina.

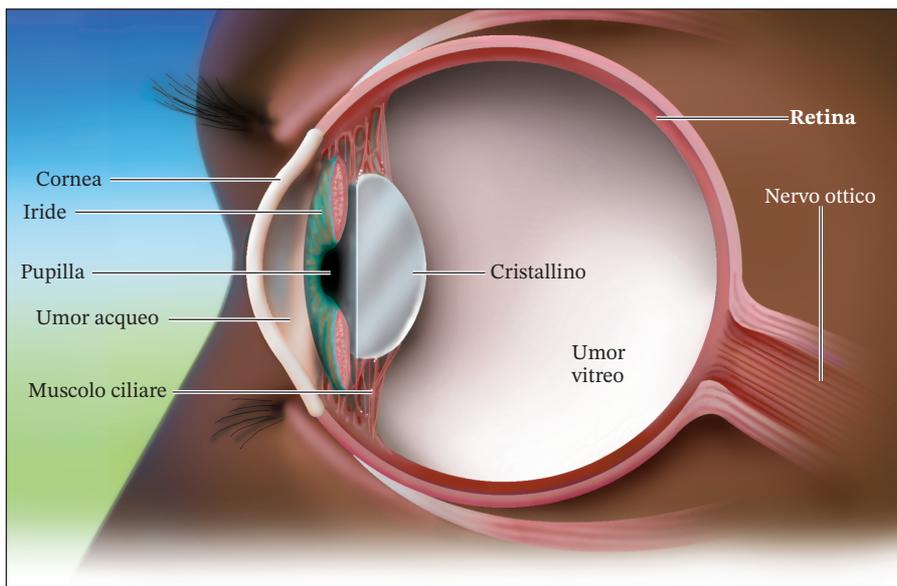
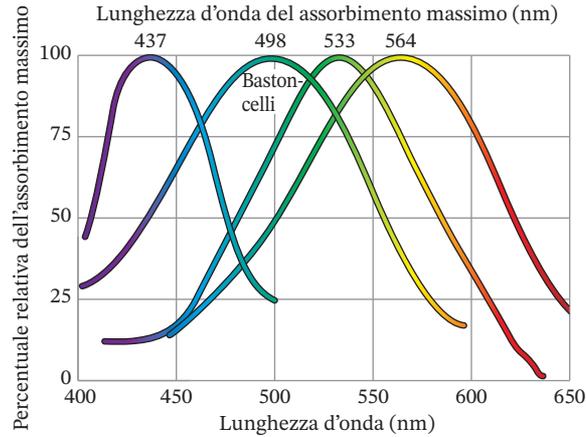


Figura 22.8 Anatomia dell'occhio.

Figura 22.9 Sensibilità dei bastoncelli e dei tre tipi di coni alla lunghezza d'onda della luce incidente nel vuoto. (I bastoncelli sono *molto* più sensibili dei coni; se la scala verticale fosse assoluta invece che relativa, il grafico dei bastoncelli sarebbe molto più alto.)



tipi differenti, sono sensibili a differenti lunghezze d'onda della luce visibile e permettono la visione dei colori (Figura 22.9). Al centro della macula lutea è localizzata la fovea (*fovea centralis*), regione con diametro di 0.25 mm in cui i coni sono densamente impacchettati, dove avviene la visione in presenza di luce intensa. I muscoli che controllano i movimenti dell'occhio assicurano che l'immagine di un oggetto sia centrata sulla fovea.

LA FISICA NEL QUOTIDIANO

Ogni retina ha una zona cieca, senza coni e bastoncelli, localizzata dove il nervo ottico si connette alla retina. La presenza della zona cieca, priva di visione, non è avvertibile soggettivamente. Per osservare la zona cieca, disegna una croce e un punto a una distanza di circa 10 cm su un foglio di carta bianca. Copri l'occhio sinistro e tieni il foglio lontano dagli occhi con il punto sulla destra. Focalizza la croce e avvicina lentamente il foglio. Il punto scompare quando l'immagine che si forma sulla retina si trova nella zona cieca. Continua ad avvicinare il foglio. Rivedrai nuovamente il punto quando l'immagine sulla retina si sarà spostata dalla zona cieca.

I bastoncelli sono più sensibili dei coni a un'illuminazione debole, ma non hanno la capacità di distinguere i colori. Per questo motivo, in presenza di poca luce non siamo in grado di distinguere i colori. Al di fuori della macula le cellule fotorecetrici, tutte bastoncelli, sono poco densamente raggruppate. Tuttavia, i bastoncelli fuori della macula sono più densamente raggruppati che all'interno. Se si prova a osservare una stella poco luminosa in cielo è più facile vederla spostando l'occhio e guardando verso un punto vicino alla stella, in modo da formare l'immagine al di fuori della macula (dove sono presenti più bastoncelli).

Messa a fuoco

La **messa a fuoco** nell'occhio avviene modificando la lunghezza focale del cristallino; la contrazione dei *muscoli ciliari* determina infatti un cambiamento della forma del cristallino, permettendo di focalizzare oggetti posti a distanze differenti senza modificare la distanza cristallino-retina. Quando un oggetto è lontano, i muscoli ciliari si rilassano e il cristallino assume una forma relativamente piatta e sottile con una lunghezza focale maggiore (Figura 22.10a). Quando un oggetto

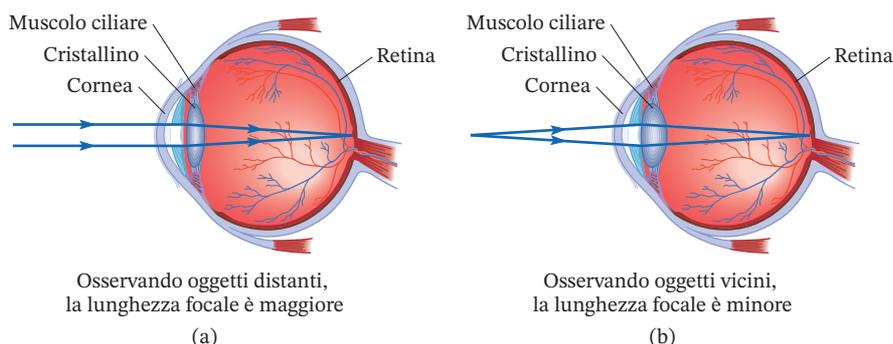


Figura 22.10 Il cristallino dell'occhio ha una lunghezza focale maggiore quando si osservano oggetti distanti (a) e una lunghezza focale minore quando si osservano oggetti vicini (b).

è vicino, i muscoli ciliari comprimono il cristallino, che assume una forma più arrotondata con una lunghezza focale minore (Figura 22.10b).

La messa a fuoco consente all'occhio di proiettare un'immagine nitida sulla retina per oggetti che si trovano a distanze che variano tra il **punto prossimo** e il **punto remoto**, cioè le distanze minima e massima a cui l'occhio riesce a mettere a fuoco un oggetto. Un uomo adulto dotato di buona vista ha il punto prossimo a circa 25 cm e il punto remoto all'infinito. Un bambino può avere il punto prossimo fino a 10 cm. Le lenti correttive (occhiali da vista o lenti a contatto) o un'operazione chirurgica possono compensare un punto prossimo maggiore di 25 cm e/o un punto remoto non all'infinito.

Gli optometristi classificano le lenti in base al **potere rifrattivo** (P) piuttosto che in base alla lunghezza focale. Il potere rifrattivo di una lente è definito come il reciproco della lunghezza focale:

$$P = \frac{1}{f} \quad (22-3)$$

Il potere rifrattivo viene solitamente misurato in **diottrie** (D), $1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$. Minore è la lunghezza focale, più "potente" è la lente poiché i raggi vengono maggiormente deflessi. Le lenti convergenti hanno potere rifrattivo positivo e le lenti divergenti negativo.

Perché si utilizza il potere rifrattivo invece della lunghezza focale? Quando due o più lenti sottili con poteri rifrattivi P_1, P_2, \dots sono sufficientemente vicine, si comportano come una singola lente sottile con potere rifrattivo:

$$P = P_1 + P_2 + \dots \quad (22-4)$$

(vedi Problema 8 sostituendo P con $1/f$).

Miopia

L'occhio miope vede nitidamente solo oggetti vicini. Si ha miopia quando la forma dell'occhio è allungata o la curvatura della cornea è eccessiva: l'occhio miope forma infatti l'immagine di un oggetto lontano *davanti* alla retina (Figura 22.11a). Il potere rifrattivo del cristallino è troppo grande; i raggi convergono troppo presto. Una lente correttiva divergente (con potere rifrattivo negativo) compensa la miopia deflettendo i raggi verso l'esterno (Figura 22.11b) in modo tale che l'immagine dell'oggetto si formi esattamente sulla retina. Si può anche dire che per oggetti lontani dall'occhio, la lente correttiva divergente forma un'immagine virtuale più vicina all'occhio dell'oggetto reale. Se l'oggetto si trova all'infinito, la lente correttiva forma un'immagine virtuale di quell'oggetto nel *punto remoto* dell'occhio (Figura 22.11c). Per oggetti meno distanti, l'immagine virtuale è più vicina del punto remoto. L'occhio è dunque capace di focalizzare i raggi sulla retina poiché l'immagine non viene mai formata oltre il punto remoto.



Correggere la miopia

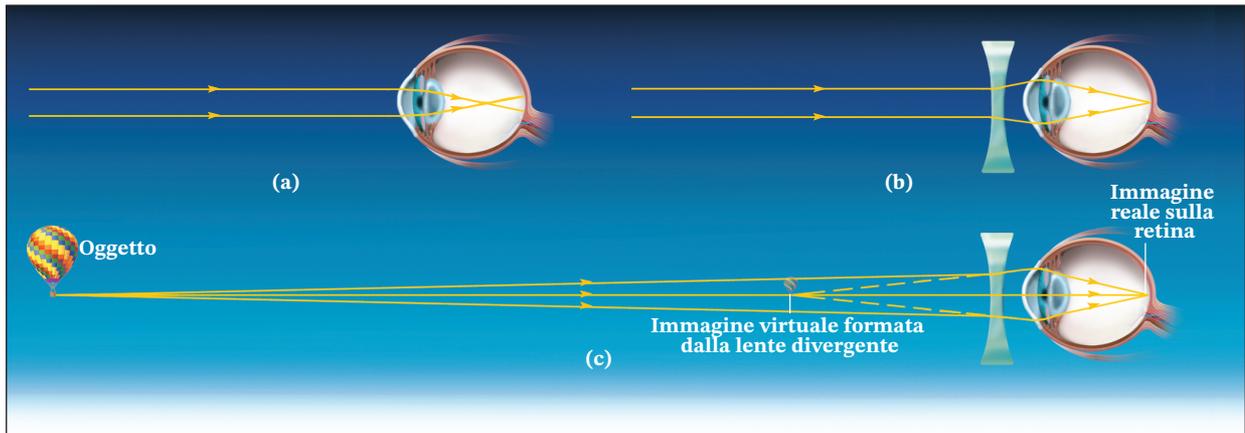


Figura 22.11 (a) In un occhio miope, i raggi paralleli provenienti da un oggetto distante convergono prima di raggiungere la retina. (b) Una lente divergente corregge la miopia deviando i raggi verso l'esterno e facendoli convergere sulla retina. (c) La lente divergente forma un'immagine virtuale più vicina all'occhio; l'occhio riesce così a far convergere i raggi per formare un'immagine reale sulla retina. (La figura non è in scala.)

Esempio 22.4

La correzione per la miopia

Senza le sue lenti a contatto, Diana non riesce a vedere bene oggetti distanti più di 40.0 cm. Quale potere rifrattivo devono avere le lenti a contatto per correggere la sua miopia?

Impostazione Il punto remoto per gli occhi di Diana è a 40.0 cm. Per un oggetto all'infinito la lente correttiva deve formare un'immagine virtuale a 40.0 cm dall'occhio.

Applichiamo l'equazione delle lenti sottili con $p = \infty$ e $q = -40.0$ cm e calcoliamo la lunghezza focale e il potere rifrattivo della lente correttiva. La distanza dove si forma l'immagine è negativa poiché l'immagine è virtuale – cioè l'immagine si forma dalla stessa parte della lente dove è posto l'oggetto.

Soluzione Per l'equazione delle lenti sottili:

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

Poiché vale $p = \infty$; $1/p = 0$. Quindi:

$$0 + \frac{1}{-40.0 \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

e risolvendo per f :

$$\text{lunghezza focale} = f = -40.0 \text{ cm.}$$

Il potere rifrattivo di una lente, misurato in diottrie, è l'inverso della lunghezza focale misurata in metri. Quindi:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0.400 \text{ m}} = -2.50 \text{ D}$$

Discussione La lunghezza focale e il potere rifrattivo sono negativi, come atteso per lenti divergenti. Si poteva prevedere che $f = -40.0$ cm senza utilizzare l'equazione delle lenti sottili. Infatti, i raggi provenienti da una sorgente molto distante possono essere considerati quasi paralleli. Raggi paralleli incidenti su una lente divergente emergono dalla lente come se provenissero dal punto focale posto davanti alla lente. Così, l'immagine si forma nel punto focale della lente sul lato dove incidono i raggi.

Problema di verifica 22.4 Cosa succede nel punto prossimo?

Supponiamo che il punto prossimo di Diana (senza le sue lenti a contatto) sia a 10.0 cm. Qual è la minima distanza a cui può vedere un oggetto senza lenti a contatto? (Aiuto: per quale distanza dell'oggetto le lenti a contatto formano, davanti alla lente, un'immagine virtuale a 10.0 cm?)

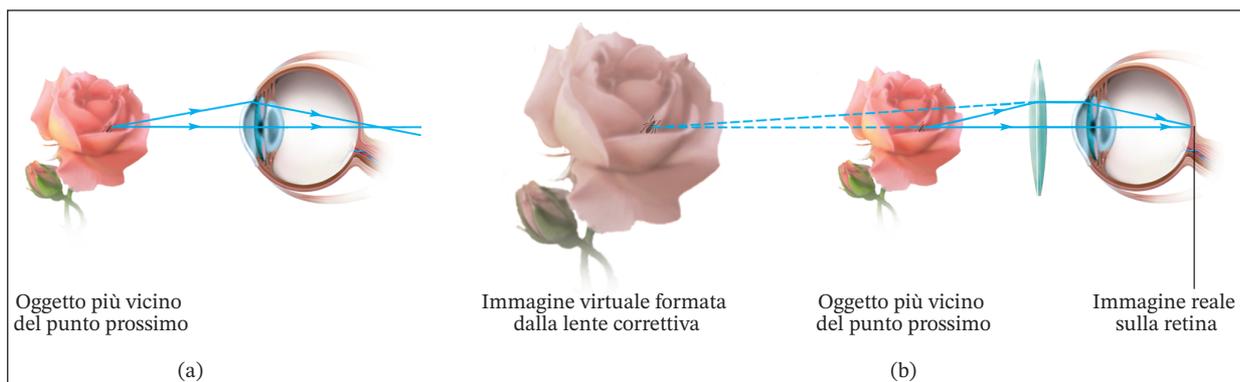


Figura 22.12 (a) Un occhio affetto da ipermetropia forma l'immagine di oggetti vicini dopo la retina. (b) Una lente correttiva convergente forma un'immagine virtuale che si trova a maggior distanza dall'occhio di quella dell'oggetto. I raggi provenienti dall'immagine virtuale possono così essere fatti convergere correttamente dal cristallino sulla retina. (La figura non è in scala.)

Ipermetropia

L'occhio affetto da ipermetropia vede nitidamente solo oggetti distanti; il punto prossimo è cioè troppo lontano. Il potere rifrattivo dell'occhio è troppo basso; la cornea e il cristallino non rifrangono i raggi in modo sufficiente da farli convergere sulla retina (Figura 22.12a). Una lente convergente può correggere l'ipermetropia deflettendo i raggi verso l'interno in modo da farli convergere sulla retina (Figura 22.12b). Per avere una visione normale, il punto prossimo deve essere a circa 25 cm (o meno). Così, per un oggetto che dista 25 cm dall'occhio, una lente correttiva forma un'immagine virtuale nel punto prossimo dell'occhio.



Correggere
l'ipermetropia

Esempio 22.5

La correzione per l'ipermetropia

Beatrice non mette a fuoco oggetti distanti meno di 2.50 m. Che potere rifrattivo devono avere le sue lenti correttive?

Impostazione Se un oggetto si trova a distanza di 25 cm dall'occhio di Beatrice, la lente correttiva ne forma un'immagine virtuale nel punto prossimo (2.50 m). Utilizziamo l'equazione delle lenti sottili con $p = 25$ cm e $q = -2.50$ m per calcolare la lunghezza focale. Come nell'esempio precedente, il punto dove si forma l'immagine è a una distanza negativa poiché si forma un'immagine virtuale dalla stessa parte dell'oggetto.

Soluzione Utilizzando l'equazione delle lenti sottili:

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

Sostituendo $p = 0.25$ m e $q = -2.50$ m si ha:

$$\frac{1}{0.25 \text{ m}} + \frac{1}{-2.50 \text{ m}} = 3.6 \text{ m}^{-1} = \frac{1}{f}$$

Risolviendo rispetto alla lunghezza focale:

$$f = 0.28 \text{ m}$$

Il potere rifrattivo è:

$$P = \frac{1}{f} = +3.6 \text{ D}$$

Discussione La soluzione presuppone che le lenti correttive siano molto vicine all'occhio, come nel caso delle lenti a contatto. Se Beatrice usa occhiali che distano 2.0 cm dagli occhi, allora le distanze dell'oggetto e dell'immagine da utilizzare – poiché vengono misurate dalla *lente* – sono $p = 23$ cm e $q = -2.48$ m. L'equazione delle lenti sottili dà in questo caso: $P = +3.9$ D.

Problema di verifica 22.5 Utilizzare gli occhiali

Un uomo vede nitidamente un oggetto posto a una distanza di 2.00 m (o più) senza usare gli occhiali.

Se le lenti hanno un potere rifrattivo di $+1.50\text{ D}$, quanto può essere vicino agli occhiali l'oggetto per es-

sere visto chiaramente? Assumere che gli occhiali siano a una distanza di 2.0 cm dagli occhi.

Presbiopia

Con l'avanzare degli anni il cristallino perde flessibilità e quindi la capacità di mettere a fuoco. Questo difetto è chiamato presbiopia. Le persone anziane hanno difficoltà nel focalizzare oggetti vicini, ma già dall'età di circa 40 anni molte persone necessitano di occhiali per leggere. A 60 anni si ha il punto prossimo a circa 50 cm ; alcune persone possono averlo anche a un metro o più. Gli occhiali da lettura per un presbite sono simili a quelli usati da una persona affetta da ipermetropia.

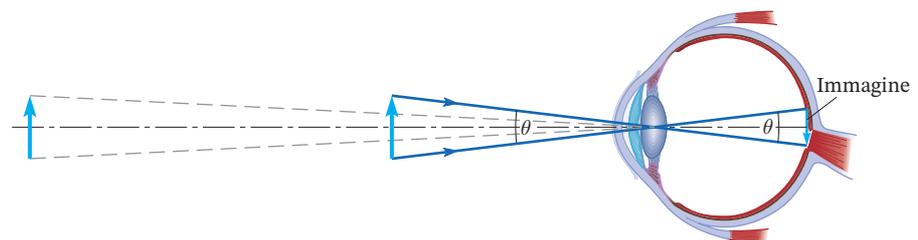
✓ Mettiti alla prova 22.3

A un campeggio con degli amici, scoprite che nessuno ha portato dei fiammiferi per accendere il fuoco. Un tuo amico suggerisce di provare ad accenderlo usando le lenti dei propri occhiali per concentrare i raggi del sole su un po' di foglie secche. Dato che il tuo amico è miope, può funzionare questa idea? E se invece fosse presbite? Prova a spiegare.

22.4 INGRANDIMENTO ANGOLARE E LENTI DI INGRANDIMENTO

Si utilizzano lenti di ingrandimento e microscopi per ingrandire oggetti che sono troppo piccoli per essere visti a occhio nudo. Che cosa intendiamo con il termine *ingrandire*? La dimensione apparente di un oggetto dipende dalla dimensione dell'immagine *formata sulla retina*. A occhio nudo la dimensione dell'immagine sulla retina è proporzionale all'angolo sotteso dall'oggetto. La Figura 22.13 mostra due oggetti identici visti da differenti distanze. Supponiamo che i due raggi provenienti dal punto più alto e più basso dell'oggetto si intersechino al centro del cristallino. L'angolo θ viene chiamato **dimensione angolare** dell'oggetto. L'immagine sulla retina sottende lo stesso angolo θ ; la dimensione angolare dell'immagine è la stessa dell'oggetto. Raggi provenienti da oggetti posti a distanze maggiori sottendono angoli più piccoli. La dimensione angolare dipende quindi dalla distanza dell'oggetto dall'occhio. Una lente di ingrandimento, un microscopio o un telescopio, permettono di formare un'immagine sulla retina più grande di quella *che si formerebbe osservando l'oggetto a occhio nudo*. Poiché la dimensione dell'immagine sulla retina è proporzionale alla dimensione angolare, valutiamo l'utilità di uno strumento ottico dal suo **ingrandimento angolare** – che è definito come il rapporto tra la dimensione angolare dell'oggetto osservato con lo strumento ottico e la dimensione angolare dell'oggetto osservato a occhio nudo.

Figura 22.13 Oggetti identici visti da distanze differenti. I raggi tracciati dal punto superiore e dal punto inferiore dell'oggetto più vicino individuano l'angolo θ sotteso dall'oggetto.



Definizione di ingrandimento angolare

$$M = \frac{\theta_{\text{strumento}}}{\theta_{\text{occhio}}} \quad (22-5)$$

Si noti che in questo caso l'ingrandimento lineare (o *trasversale*) (come abbiamo visto prima, definito dal rapporto tra la dimensione dell'immagine e la dimensione dell'oggetto) non è utile. Per esempio, l'ingrandimento trasversale di un telescopio è minimo: la Luna è *molto* più grande dell'immagine che si forma sulla retina anche utilizzando un telescopio, sebbene il telescopio renda l'immagine apparente della Luna molto più grande che a occhio nudo.

LA FISICA NEL QUOTIDIANO

In una notte serena con la Luna visibile, vai all'aperto, chiudi un occhio e, tenendo il braccio teso, copri la Luna con una matita. Confronta l'apertura angolare della Luna con quella della matita. Valuta la distanza fra il tuo occhio e la matita e la larghezza di quest'ultima. Usa queste informazioni e la distanza Terra-Luna (4×10^5 chilometri) per valutare il diametro della Luna. Confronta il tuo risultato con il diametro reale della Luna (3.5×10^3 chilometri).



Quando si vuole osservare meglio un oggetto, si avvicina l'occhio all'oggetto per aumentarne la dimensione angolare. Tuttavia, la capacità dell'occhio di vedere oggetti vicini è limitata; c'è un punto limite oltre il quale, avvicinandosi, tutto appare sfuocato: il punto prossimo. Quindi, la dimensione angolare massima di un oggetto osservato a occhio nudo si ha quando l'oggetto si trova nel punto prossimo.

Una **lente di ingrandimento** è una lente convergente in cui l'oggetto viene posto a una distanza minore della lunghezza focale. L'immagine virtuale così formata è ingrandita e più distante rispetto all'oggetto (Figura 22.14). Tipicamente, l'immagine si forma ben oltre il punto prossimo, in modo che possa essere osservata facilmente, a scapito di una piccola riduzione dell'ingrandimento angolare. L'angolo sotteso dall'immagine ingrandita virtuale, vista dall'occhio, è molto più grande dell'angolo sotteso dall'oggetto posizionato nel punto prossimo.

Se un oggetto piccolo di altezza h viene osservato a occhio nudo (Figura 22.15a), la dimensione angolare, quando è posto nel punto prossimo (a distanza N dall'occhio) è:

$$\theta \approx \frac{h}{N} \quad (\text{in radianti})$$

assumendo $h \ll N$, θ diventa sufficientemente piccolo in modo che valga $\tan \theta \approx \theta$. Se l'oggetto viene ora posto nel punto focale di una lente convergente, l'immagine si forma all'infinito e può essere osservata senza fatica a occhio nudo (Figura 22.15b). La dimensione angolare dell'immagine è:

$$\theta_{\infty} \approx \frac{h}{f} \quad (\text{in radianti})$$

Allora l'ingrandimento angolare M è:

$$M = \frac{\theta_{\infty}}{\theta} = \frac{h/f}{h/N} = \frac{N}{f} \quad (22-6)$$

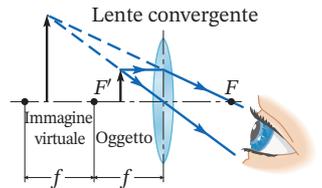
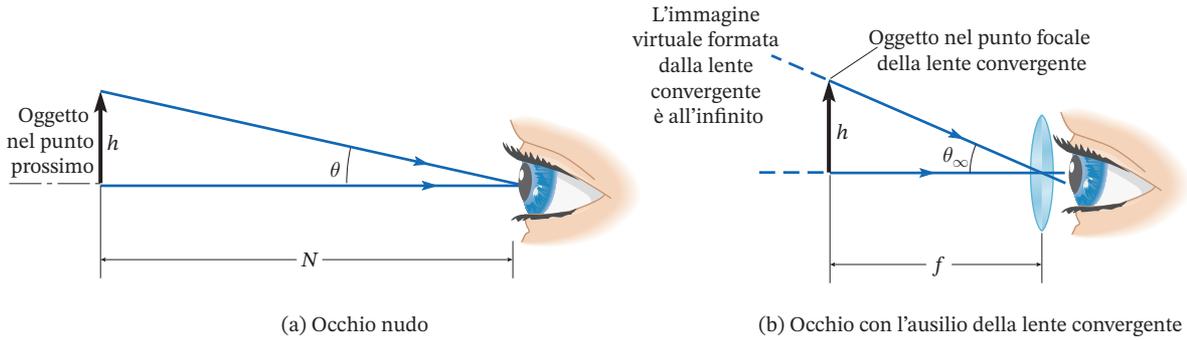


Figura 22.14 Una lente convergente utilizzata come lente di ingrandimento forma un'immagine virtuale ingrandita. La distanza dell'oggetto è inferiore alla lunghezza focale.

**Figura 22.15**

(a) L'angolo θ sotteso all'occhio da un oggetto posto nel punto prossimo. (b) La lente di ingrandimento forma un'immagine virtuale dell'oggetto all'infinito. L'angolo θ_∞ sotteso dall'immagine virtuale è più grande di θ .

Nel calcolare l'ingrandimento angolare di uno strumento ottico, si utilizza solitamente un valore per il punto prossimo pari a $N = 25$ cm.

L'Equazione (22-6) permette di calcolare l'ingrandimento angolare di un oggetto posto nel punto focale della lente. Se l'oggetto viene avvicinato, l'ingrandimento angolare è sempre maggiore. In molti casi, il piccolo aumento nell'ingrandimento angolare non giustifica l'affaticamento della vista provocato dall'immagine posta più vicino agli occhi (vedi Problema 35).

✓ Mettiti alla prova 22.4

Una lente divergente ($f < 0$) può formare un'immagine virtuale di un oggetto reale. Una lente divergente può quindi essere utilizzata come lente di ingrandimento? Prova a spiegare. (*Aiuto*: nota che la distanza dell'immagine è minore della distanza dell'oggetto: $|q| < p$.)

Esempio 22.6

La lente di ingrandimento

Una lente convergente di lunghezza focale 4.00 cm viene usata come lente di ingrandimento. La lente forma un'immagine virtuale nel punto prossimo, distante 25.0 cm dall'occhio. Dove deve essere posto l'oggetto e qual è l'ingrandimento angolare, assumendo che la lente di ingrandimento venga tenuta vicino all'occhio?

Impostazione Possiamo usare 25.0 cm come distanza dell'immagine dalla *lente*; se la lente di ingrandimento si trova vicino all'occhio, le distanze dall'occhio e dalla lente sono simili. Applichiamo l'equazione delle lenti sottili per calcolare la distanza dell'oggetto utilizzando la lunghezza focale e la distanza dell'immagine note.

Soluzione Dall'equazione delle lenti sottili calcoliamo la distanza dell'oggetto:

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

Sostituiamo $q = -25.0$ cm (negativo per immagini virtuali) e $f = +4.00$ cm:

$$p = \frac{4.00 \text{ cm} \times (-25.0 \text{ cm})}{-25.0 \text{ cm} - 4.00 \text{ cm}} = 3.45 \text{ cm}$$

L'oggetto è posto a 3.45 cm dalla lente. La dimensione angolare (in radianti) dell'immagine formata è:

$$\theta = \frac{h}{p}$$

dove h è la dimensione dell'oggetto.

L'oggetto *non* si trova alla lunghezza focale della lente, quindi la dimensione angolare non è data da h/f come mostrato in Figura 22.15b. Se l'oggetto fosse osservato senza lente di ingrandimento, quando è po-

sto nel punto prossimo, $N = 25.0$ cm, la dimensione angolare sarebbe:

$$\theta_0 = \frac{h}{N}$$

L'ingrandimento angolare è:

$$M = \frac{h/p}{h/N} = \frac{N}{p} = \frac{25.0 \text{ cm}}{3.45 \text{ cm}} = 7.25$$

Discussione Se l'oggetto viene messo nel punto focale principale, 4.00 cm dalla lente, per formare un'immagine finale all'infinito, l'ingrandimento angolare diviene:

$$M = \frac{N}{f} = \frac{25.0 \text{ cm}}{4.00 \text{ cm}} = 6.25$$

Problema di verifica 22.6 Come posizionare un oggetto con una lente di ingrandimento

La lunghezza focale di una lente di ingrandimento è 12.0 cm. Assumiamo che l'osservatore tenga la lente vicino all'occhio. (a) Qual è l'ingrandimento angolare se la lente forma un'immagine finale nel punto prossimo dell'osservatore (25.0 cm)? (b) Qual è l'ingrandimento angolare se l'immagine finale si trova all'infinito?

22.5 MICROSCOPI

La lente di ingrandimento non può ingrandire più di 15-20 volte la dimensione angolare di un oggetto. Tuttavia, il **microscopio**, strumento che utilizza due lenti convergenti, permette di ottenere ingrandimenti angolari fino a oltre 2000 volte la dimensione angolare di un oggetto. Il microscopio fu probabilmente inventato in Olanda nel 1600.

Un oggetto che viene osservato al microscopio viene posto *appena dopo* il punto focale di una lente convergente, chiamata **obiettivo**. La funzione dell'obiettivo è quella di formare un'immagine reale ingrandita. Una seconda lente convergente, chiamata **oculare**, viene utilizzata per osservare l'immagine reale formata dall'obiettivo (Figura 22.16). L'oculare agisce quindi come una lente di ingrandimento: forma, cioè, un'immagine virtuale ingrandita. La posizione dell'immagine finale può essere localizzata ovunque fra il punto prossimo dell'osservatore e l'infinito. Nel microscopio, le posizioni delle due lenti sono regolate in modo che l'immagine formata dall'obiettivo cada nel punto focale dell'oculare; in questo modo, l'immagine finale si forma all'infinito. Questa geometria permette l'osservazione senza affaticamento della vista e non riduce di molto l'ingrandimento angolare.

Se si utilizzasse soltanto l'oculare come lente di ingrandimento per osservare un oggetto, l'ingrandimento angolare sarebbe:

$$M_e = \frac{N}{f_e} \quad (\text{dovuto all'oculare})$$

dove f_e indica la lunghezza focale dell'oculare e l'immagine virtuale si forma all'infinito. Solitamente si assume $N = 25$ cm.

L'obiettivo forma un'immagine più grande dell'oggetto; come visto nel Problema 44, l'ingrandimento *trasversale* dovuto all'obiettivo è dato da:

$$m_o = -\frac{L}{f_o} \quad (\text{dovuto all'obiettivo})$$

dove L indica la distanza tra i punti focali delle due lenti.

Poiché l'immagine formata dall'obiettivo è posta nel punto focale dell'oculare, come in Figura 22.16, la lunghezza L è data da:

$$L = q_o - f_o \tag{22-7}$$



Microscopi

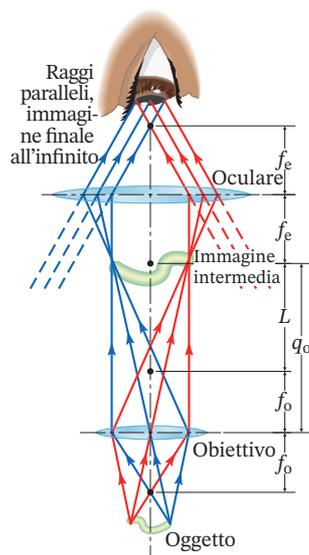


Figura 22.16 In un microscopio l'immagine intermedia deve essere formata nel punto focale dell'oculare per avere l'immagine finale all'infinito.

Molti microscopi sono progettati con una lunghezza L di 16 centimetri.

Quando osserviamo l'immagine con l'oculare, questo dà lo stesso ingrandimento angolare calcolato prima (M_e), ma ingrandisce ora un'immagine m_o volte più grande dell'oggetto. L'ingrandimento angolare totale è dato quindi dal prodotto di m_o e M_e :

Ingrandimento angolare del microscopio

$$M_{\text{totale}} = m_o M_e = -\frac{L}{f_o} \times \frac{N}{f_e} \quad (22-8)$$

Il segno negativo nell'Equazione (22-8) indica che l'immagine finale è invertita. A volte nei microscopi e nei telescopi il segno negativo viene ignorato e l'ingrandimento angolare (chiamato anche *potere d'ingrandimento*) viene indicato con un numero positivo.

L'Equazione (22-8) mostra che, per avere un forte ingrandimento, le lunghezze focali dell'obiettivo e dell'oculare devono essere piccole. I microscopi sono fatti spesso in modo da poter cambiare obiettivo a seconda dell'ingrandimento voluto. Il produttore fornisce solitamente i valori dell'ingrandimento ($|m_o|$ e M_e) invece delle lunghezze focali delle lenti. Per esempio, se un oculare è identificato con "5×" allora vale $M_e = 5$.

● Si ricordi che in un microscopio la lunghezza L nell'Equazione (22-8) è pari alla distanza tra i punti focali delle due lenti.

Esempio 22.7

L'ingrandimento di un microscopio

Un microscopio ha un obiettivo di lunghezza focale 1.40 cm e un oculare di lunghezza focale 2.20 cm. Obiettivo e oculare sono distanti 19.6 cm. L'immagine finale è all'infinito. (a) Trovare l'ingrandimento angolare. (b) A quale distanza dall'obiettivo deve essere posto l'oggetto?

Impostazione Poiché l'immagine finale è all'infinito, l'Equazione (22-8) può essere usata per calcolare l'ingrandimento angolare M . Calcoliamo inizialmente la lunghezza L . La Figura 22.16 mostra che la distanza tra le due lenti è data dalla somma delle due lunghezze focali con la lunghezza L . Consideriamo per il punto prossimo dell'occhio $N = 25$ cm. Per calcolare il punto dove posizionare l'oggetto, applichiamo l'equazione delle lenti sottili all'obiettivo. L'immagine formata dall'obiettivo è nel punto focale dell'oculare poiché l'immagine finale è all'infinito.

Dati: $f_o = 1.40$ cm, $f_e = 2.20$ cm, distanza tra le lenti = 19.6 cm

Da trovare: (a) ingrandimento angolare totale M ; (b) distanza dell'oggetto p_o

Soluzione (a) La lunghezza L vale:

$$\begin{aligned} L &= \text{distanza tra le lenti} - f_o - f_e \\ &= 19.6 \text{ cm} - 1.40 \text{ cm} - 2.20 \text{ cm} = 16.0 \text{ cm} \end{aligned}$$

Quindi l'ingrandimento angolare è dato da:

$$\begin{aligned} M &= -\frac{L}{f_o} \times \frac{N}{f_e} \\ &= -\frac{16.0 \text{ cm}}{1.40 \text{ cm}} \times \frac{25 \text{ cm}}{2.20 \text{ cm}} = -130 \end{aligned}$$

Il valore negativo dell'ingrandimento indica che l'immagine finale è invertita.

(b) Per avere l'immagine finale all'infinito, l'immagine formata dall'obiettivo deve essere posta nel punto focale dell'oculare. Dalla Figura 22.16 ricaviamo che la distanza intermedia dell'immagine è:

$$q_o = L + f_o = 16.0 \text{ cm} + 1.40 \text{ cm} = 17.4 \text{ cm}$$

Quindi utilizzando l'equazione delle lenti sottili si ottiene per la distanza dall'obiettivo:

$$\frac{1}{p_o} + \frac{1}{q_o} = \frac{1}{f_o}$$

Risolvendo rispetto alla distanza dell'oggetto p :

$$p_o = \frac{f_o q_o}{q_o - f_o} = \frac{1.40 \text{ cm} \times 17.4 \text{ cm}}{17.4 \text{ cm} - 1.40 \text{ cm}} = 1.52 \text{ cm}$$

Discussione Possiamo controllare il risultato di (b) per vedere se l'oggetto è appena oltre il punto focale dell'obiettivo. L'oggetto dista 1.52 cm dall'obiettivo mentre il punto focale è a 1.40 cm, quindi l'oggetto è solo 1.2 mm oltre il punto focale.

Problema di verifica 22.7 La distanza di un oggetto per avere una buona messa a fuoco

Un osservatore con il punto prossimo a 25 cm osserva un oggetto con un microscopio dotato di un obiettivo di lunghezza focale $f_o = 1.20$ cm. Quando l'oggetto viene posto a 1.28 cm dall'obiettivo, l'ingrandimento angolare è -198 e l'immagine finale si forma all'infinito. (a) Qual è la lunghezza L del tubo del microscopio? (b) Qual è la lunghezza focale dell'oculare?

Microscopio elettronico a trasmissione

Esistono vari tipi di microscopi oltre al microscopio ottico tradizionale. Tra questi, il più simile al microscopio ottico è il microscopio elettronico a trasmissione (*Transmission Electron Microscope*, TEM). Negli anni '20 del secolo scorso, Ernst Ruska (1906-1988) scoprì che un campo magnetico generato da una bobina si comporta per un fascio di elettroni come una lente. Una lente in ottica cambia la direzione dei raggi luminosi; la bobina magnetica crea un campo magnetico che cambia la traiettoria di un fascio di elettroni. Ruska utilizzò la *lente magnetica* per formare un'immagine di un oggetto "illuminato" da un fascio di elettroni. Nel 1933, accoppiando due lenti magnetiche, Ruska costruì il primo microscopio elettronico a trasmissione, utilizzando un fascio di elettroni per "illuminare" oggetti molto piccoli, ottenendo una risoluzione più elevata di un microscopio ottico. Il microscopio costruito da Ruska viene chiamato microscopio a *trasmissione* perché il fascio di elettroni attraversa una sottile sezione del campione che viene visualizzato.

Risoluzione

Un forte ingrandimento risulta poco utile se l'immagine prodotta è sfuocata. La risoluzione è definita come la capacità di formare immagini chiare e ben definite di punti molto vicini. La definizione è la seguente: la **risoluzione** di uno strumento rappresenta la minima variazione apprezzabile della grandezza in esame attraverso tutto il campo di misura. In particolare, nel caso di uno strumento ottico, la risoluzione è la capacità di vedere come distinti due punti vicini tra loro. La distanza minima alla quale due punti sono visti come distinti si chiama **limite di risoluzione**. La capacità di ottenere immagini *ad alta risoluzione* è una tra le caratteristiche più apprezzate in un microscopio. La massima risoluzione ottenibile in uno strumento ottico è infatti limitata dalla diffrazione della luce. Due oggetti possono essere distinti se la loro separazione è pari approssimativamente alla lunghezza d'onda della luce utilizzata per osservarli. Quindi, utilizzando luce visibile (per es., un microscopio ottico) non è possibile visualizzare oggetti con dimensioni inferiori a circa 400 nanometri. Un atomo ha un diametro di circa 0.2-0.5 nanometri, molto minore cioè della lunghezza d'onda della luce visibile; quindi un microscopio ottico non è in grado di visualizzare dettagli strutturali su scala atomica. I microscopi a ultravioletti, utilizzando radiazione ultravioletta con lunghezze d'onda minori (circa 100 nanometri), consentono di ottenere una migliore risoluzione. I microscopi elettronici a trasmissione riescono a risolvere dettagli strutturali fino a circa 0.5 nanometri.

22.6 TELESCOPI

Telescopi rifrattori

Il più diffuso telescopio non professionale è il **telescopio rifrattore**, costituito da due lenti convergenti che si comportano come le lenti di un microscopio (oculare e obiettivo). L'obiettivo, nel telescopio rifrattore, forma un'immagine reale dell'oggetto; l'oculare permette di osservare l'immagine reale creata dall'obiettivo. Tuttavia, mentre il microscopio permette di osservare oggetti di *piccole* dimensioni posti vicino all'obiettivo formandone un'immagine *ingrandita*, il telescopio consente di osservare oggetti di piccole dimensioni *angolari* (quindi oggetti molto lontani dall'obiettivo) formandone un'immagine piccola rispetto alle dimensioni reali dell'oggetto, che viene però osservata molto da vicino grazie all'oculare.

Il telescopio *astronomico* rifrattore viene dunque utilizzato per osservare oggetti molto lontani, praticamente localizzati a distanza infinita (i raggi provenienti dall'oggetto possono quindi essere considerati quasi-paralleli) (Figura 22.17). L'obiettivo forma un'immagine reale nel suo fuoco principale che corrisponde al punto focale secondario dell'oculare. In questo modo, l'immagine finale si forma all'infinito e quindi può essere osservata facilmente. In un telescopio, il punto focale principale dell'obiettivo deve quindi coincidere con il punto focale secondario dell'oculare (si ricordi che nel microscopio, invece, i due fuochi sono separati da una distanza L). Quando un telescopio astronomico viene connesso a una macchina fotografica per documentare un'immagine, la lente della macchina fotografica sostituisce l'oculare. In questo caso l'obiettivo *non* forma l'immagine nel punto focale della lente della macchina fotografica, poiché la macchina fotografica deve formare un'immagine reale *sulla pellicola*.

In un telescopio l'obiettivo e l'oculare sono posti alle due estremità del tubo che costituisce il telescopio; la *lunghezza del tubo* è quindi data dalla somma delle lunghezze focali dell'obiettivo e dell'oculare.

$$\text{lunghezza del tubo} = f_o + f_e \quad (22-9)$$

Nella Figura 22.17, il raggio luminoso evidenziato attraversa il punto focale secondario dell'obiettivo, emerge dalla lente parallelo all'asse principale, incontra l'oculare e viene rifratto in modo da passare per il punto focale principale dell'oculare. I due triangoli rettangoli ottenuti dal diagramma dei raggi sono stati ridisegnati per maggiore chiarezza. Le ipotenuse (AC , FD) dei due triangoli sono dirette come il raggio evidenziato. I cateti (BC , EF) che congiungono l'asse principale con l'ipotenusa sono lunghi h poiché il segmento che congiunge C a F è

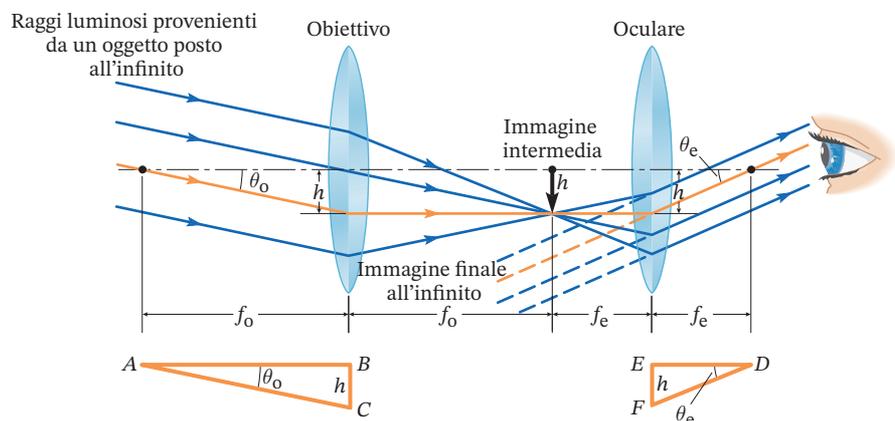


Figura 22.17 Un telescopio astronomico rifrattore.

parallelo all'asse principale e passa per il punto dove l'obiettivo forma l'immagine (immagine intermedia).

L'angolo sotto cui viene visto l'oggetto a occhio nudo è uguale all'angolo sotteso dall'obiettivo (θ_o). Osservando con l'oculare l'immagine finale formata all'infinito si ottiene un angolo θ_e . Considerando i due triangoli rettangoli e utilizzando l'approssimazione per piccoli angoli, la dimensione angolare dell'oggetto visto a occhio nudo è:

$$\theta_o \approx \tan \theta_o = \frac{h}{AB} = \frac{h}{f_o}$$

La dimensione angolare dell'immagine finale è data da:

$$\theta_e \approx \tan \theta_e = -\frac{h}{DE} = -\frac{h}{f_e}$$

L'immagine finale risulta invertita, quindi la sua dimensione angolare è negativa. In un telescopio l'ingrandimento utile è l'ingrandimento *angolare*, cioè il rapporto tra l'angolo sotteso dall'immagine ingrandita dal telescopio e l'angolo sotteso dall'immagine vista a occhio nudo. L'ingrandimento angolare è dato da:

Ingrandimento angolare di un telescopio astronomico

$$M = \frac{\theta_e}{\theta_o} = -\frac{f_o}{f_e} \quad (22-10)$$

dove il segno negativo indica che l'immagine è invertita. Come nei microscopi, l'ingrandimento angolare viene di solito indicato con un numero positivo. Per ottenere maggiori ingrandimenti, l'obiettivo dovrebbe avere la massima lunghezza focale e l'oculare la minima lunghezza focale possibile.



Mettiti alla prova 22.6

Per avere il maggior ingrandimento possibile, la lente dell'obiettivo di un microscopio dovrebbe avere la minore lunghezza focale possibile, mentre la stessa lente di un telescopio dovrebbe avere la maggiore lunghezza focale possibile. Prova a spiegare.

Esempio 22.8

Il telescopio rifrattore Yerkes

Il telescopio Yerkes nel sud Wisconsin è il più grande telescopio rifrattore al mondo. Il suo obiettivo ha una lente di 1.016 m di diametro e una lunghezza focale di 19.8 m. Se il potere di ingrandimento è 508, qual è la lunghezza focale dell'oculare?

Impostazione Il potere di ingrandimento è dato dall'ingrandimento angolare. I telescopi rifrattori hanno ingrandimento angolare negativo.

Soluzione Dall'Equazione (22-10), l'ingrandimento angolare è:

$$M = \frac{\theta_e}{\theta_o} = -\frac{f_o}{f_e}$$

Risolvendo rispetto a f_e si ha:

$$f_e = -\frac{f_o}{M}$$

Sostituiamo $M = -508$ e $f_o = 19.8$ m:

$$f_e = -\frac{19.8 \text{ m}}{-508} = 3.90 \text{ cm}$$

Discussione La lunghezza focale dell'oculare è positiva. L'oculare agisce come lente di ingrandimento per vedere l'immagine formata dall'obiettivo. La lente di ingrandimento è una lente convergente – cioè, una lente di lunghezza focale positiva.

Problema di verifica 22.8 Se si cambia l'oculare

Se l'oculare del telescopio Yerkes dell'Esempio 22.8 viene sostituito con un oculare di lunghezza focale 2.54 cm che produce un'immagine finale all'infinito, quale sarà l'ingrandimento angolare?

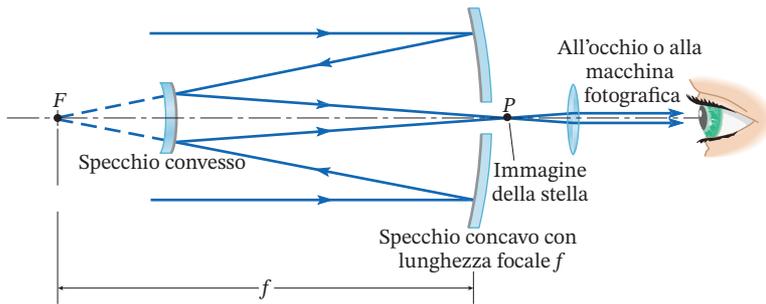
Un'immagine invertita non crea problemi in astronomia. Quando un telescopio viene utilizzato per osservare oggetti sulla Terra, per esempio un uccello appollaiato sul ramo di un albero o un cantante rock sul palco di un concerto all'aperto, l'immagine finale deve invece essere raddrizzata. Il binocolo è costituito da una coppia di telescopi con prisma riflettente che raddrizzano l'immagine finale.

Un modo alternativo per costruire un telescopio non astronomico è di utilizzare una terza lente, posta tra obiettivo e oculare, che raddrizzi l'immagine finale. Il telescopio galileiano, inventato da Galileo nel 1609, permette di ottenere un'immagine raddrizzata dell'oggetto utilizzando una lente *divergente* come oculare (vedi Problema 50). La posizione dell'oculare viene regolata in modo che l'immagine formata dall'obiettivo diventi un'immagine *virtuale* per l'oculare, che quindi forma un'immagine virtuale orientata correttamente. La lunghezza del tubo in un telescopio galileiano è minore di quella dei telescopi che utilizzano lenti convergenti.

Telescopi riflettori

I **telescopi riflettori** utilizzano uno o più specchi invece che lenti. Utilizzando specchi, si ottengono infatti numerosi vantaggi che risultano fondamentali quando si costruiscono grandi telescopi per raccogliere la luce emessa da stelle poco luminose e molto distanti. (I grandi telescopi minimizzano la perdita in risoluzione dovuta alla diffrazione.) Poiché l'indice di rifrazione varia con la lunghezza d'onda della luce (fenomeno chiamato *dispersione* della luce), una lente ha lunghezze focali leggermente differenti per le diverse lunghezze d'onda che compongono lo spettro visibile; la dispersione provoca perciò la distorsione dell'immagine. Nei telescopi riflettori lo specchio riflette la luce raccolta e si ha quindi la stessa lunghezza focale per tutte le lunghezze d'onda. Inoltre, gli specchi di grandi dimensioni possono essere costruiti molto più facilmente che le lenti. Quando si costruisce una lente di grandi dimensioni, la massa del vetro diviene così pesante da deformare la lente stessa. Inoltre, quando il vetro si raffredda subisce stress e deformazioni che riducono la qualità ottica della lente. Uno specchio di grandi dimensioni non è invece così pesante, poiché la parte riflettente è solo quella *in superficie*; lo specchio può quindi essere sostenuto in qualsiasi parte della sua superficie, mentre la lente solamente sui bordi. Un altro vantaggio di un telescopio riflettore è che la parte più pesante del telescopio – lo specchio concavo di grandi dimensioni – è localizzata alla base del telescopio, rendendo quindi lo strumento molto stabile. La più grande lente utilizzata in un telescopio rifrattore – poco più di 1 m di diametro – è quella utilizzata nel telescopio *Yerkes*. Gli specchi principali dei due telescopi riflettori gemelli *Keck* alle Hawaii hanno invece un diametro 10 volte maggiore.

La Figura 22.18 mostra un telescopio riflettore costruito utilizzando una particolare configurazione, detta di *Cassegrain*. (Laurent Cassegrain è l'astronomo

**Figura 22.18**

Configurazione Cassegrain in un telescopio riflettore utilizzato per dirigere i raggi provenienti da una stella lontana all'occhio o a una macchina fotografica.

che ideò questo schema ottico alla fine del XVII secolo.) I raggi luminosi paralleli, provenienti da una stella lontana, vengono riflessi da uno specchio concavo nel suo punto focale F . Prima di raggiungere il punto focale i raggi vengono intercettati da uno specchio convesso più piccolo che indirizza i raggi luminosi verso un foro praticato al centro dello specchio concavo in modo che siano focalizzati nel punto P . Una macchina fotografica in P , oppure una lente, viene utilizzata per visualizzare l'oggetto.

Telescopio spaziale Hubble

Un famoso telescopio che utilizza la configurazione Cassegrain è il telescopio spaziale *Hubble* (*Hubble Space Telescope*, HST). L'HST orbita attorno alla Terra a un'altezza superiore ai 600 km; il suo specchio principale ha un diametro di 2.4 m. Perché è utile mandare un telescopio in orbita? L'atmosfera limita la quantità di informazioni che possono essere raccolte utilizzando un telescopio sulla Terra. Infatti, la densità dell'aria nell'atmosfera varia continuamente e come conseguenza i raggi luminosi provenienti da stelle lontane vengono deflessi in modo differente impedendo una ben definita messa a fuoco dell'oggetto. A Terra i telescopi posseggono sistemi che correggono tale inconveniente, non necessari per l'HST che orbita al di fuori dell'atmosfera.

Tra i risultati ottenuti dall'HST ci sono nitide immagini di quasar, gli oggetti a più alta energia dell'universo, la prima mappa della superficie di Plutone, la scoperta della presenza di elio intergalattico originato dal *Big Bang* e la prova dell'esistenza dei buchi neri (oggetti così densi che neppure la luce riesce a uscire dal loro campo gravitazionale). L'HST ha anche permesso di dimostrare l'esistenza di *lenti gravitazionali*, cioè galassie così massive che la loro gravità deflette i raggi luminosi allo stesso modo di una lente quando forma l'immagine.

L'HST ha permesso di osservare galassie formatesi nei primi stadi dell'universo e di determinare l'età dell'universo. Nel 2011, la NASA ha pianificato di sostituire l'HST con il nuovo telescopio spaziale *James Webb* dotato di uno specchio concavo molto più grande dello specchio dell'HST. Il nuovo telescopio, il cui lancio è previsto per ottobre 2021, sarà posto in orbita a una distanza di 1.6 milioni di chilometri dalla Terra dalla parte opposta al Sole.

Radiotelescopi

La radiazione elettromagnetica emessa da oggetti celesti non è limitata solo allo spettro visibile. Per esempio, i radiotelescopi rivelano le onde radio provenienti dallo spazio. Uno dei radiotelescopi più famosi al mondo, immortalato anche in vari film, da *007* a *X-Files*, è il radiotelescopio di Arecibo, a Portorico, ormai dismesso a causa di considerevoli danni alla struttura portante dovuti al terremoto avvenuto nel gennaio 2020 (Figura 22.19). L'antenna del telescopio aveva un diametro di 305 m e una profondità di 51 m ed era costituita da un reticolo di pannelli metallici; si noti che in una configurazione di questo tipo l'antenna si

Figura 22.19 Il radiotelescopio di Arecibo, in Portorico, occupava una regione remota di quasi venti acri (quasi 81000 mq) sulla sommità di una collina.



©Bruce Dale/National Geographic/Getty Images

comportava come se fosse costituita da una superficie metallica continua e non da un reticolo di pannelli, poiché le dimensioni delle maglie del reticolo sono minori della lunghezza d'onda delle onde radio. Un rilevatore, sospeso in aria, era posto nel punto focale, 137 m sopra il collettore del telescopio. Il telescopio di Arecibo è stato a lungo il più sensibile radiotelescopio al mondo e in pochi minuti permetteva di ottenere una quantità di informazioni pari a quelle che un telescopio di minori dimensioni avrebbe raccolto solo in diverse ore di osservazione.

Una *parabola* è un radiotelescopio in miniatura. La parabola viene direzionata verso un satellite e forma un'immagine reale raccogliendo i segnali a microonde inviati dal satellite. Anche l'antenna parabolica visibile su molti tetti è un radiotelescopio: la parabola viene orientata in modo da ricevere i segnali inviati da un satellite televisivo. Le microonde inviate dal satellite vengono focalizzate sul ricevitore, il piccolo apparecchio montato davanti alla parabola con una staffa, che converte il segnale e lo invia al *decoder* all'interno dell'abitazione.

22.7 ABERRAZIONI DI LENTI E SPECCHI

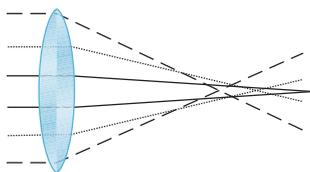


Figura 22.20 Aberrazione sferica in una lente convergente. A causa di angoli di incidenza che non possono essere sempre considerati piccoli, la lente ha lunghezze focali differenti a seconda della distanza dall'asse principale del raggio di luce che l'attraversa.

Il comportamento di lenti e specchi *reali* differisce da quello di lenti e specchi *ideali*. Infatti, esistono molti tipi di **aberrazioni** che allontanano il comportamento reale da quello ideale. In questa sede considereremo solo due tipi di aberrazioni, mentre nel Capitolo 23 si esaminerà in dettaglio il limite alla risoluzione degli strumenti ottici dovuto al fenomeno della diffrazione.

Aberrazione sferica

Le equazioni delle lenti e degli specchi ipotizzano che i raggi luminosi siano parassiali, cioè quasi paralleli all'asse principale e non molto distanti dall'asse. Questa ipotesi consente di utilizzare l'approssimazione per piccoli angoli. I raggi luminosi per i quali l'angolo di incidenza sulla lente o sullo specchio *non* può essere considerato piccolo non convergono però tutti nello stesso punto focale (o non divergono tutti da uno stesso punto focale). Di conseguenza, i raggi provenienti da un punto di un oggetto non corrispondono a un singolo punto dell'immagine; l'immagine appare quindi fuori fuoco a causa dell'**aberrazione sferica** (Figura 22.20). L'aberrazione sferica può essere minimizzata ponendo un diaframma davanti alla lente o allo specchio in modo che solo i raggi che si propagano in pros-

simità dell'asse principale possano raggiungere la lente. L'immagine formata risulta più definita anche se meno luminosa.

Negli specchi l'aberrazione sferica può essere evitata utilizzando uno specchio *parabolico* invece di uno specchio sferico. Uno specchio parabolico, infatti, focalizza raggi paralleli in un punto anche se non sono parassiali. I grandi telescopi astronomici riflettori utilizzano in effetti specchi parabolici. Poiché i raggi luminosi sono reversibili, se una sorgente luminosa puntiforme viene posta nel punto focale di uno specchio parabolico i raggi riflessi formano un fascio parallelo. I proiettori e i fari delle automobili utilizzano riflettori parabolici per avere fasci di luce ben definiti e quasi paralleli.

Aberrazione cromatica

Un'altra aberrazione delle lenti (ma non degli specchi) è dovuta al fenomeno della dispersione. Quando la luce, composta da differenti lunghezze d'onda, attraversa una lente, le diverse lunghezze d'onda vengono deflesse differentemente a causa della dispersione (Figura 22.21); questo difetto viene chiamato **aberrazione cromatica**. Per correggere l'aberrazione cromatica si possono utilizzare sistemi di lenti costituite da materiali diversi, in modo che l'aberrazione di ogni lente elimini l'aberrazione prodotta dalle altre lenti.

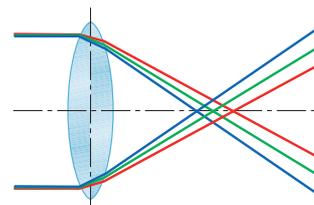


Figura 22.21 In un mezzo dispersivo, l'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda. Come risultato, la lunghezza focale di una lente dipende dalla lunghezza d'onda della luce che l'attraversa. Come schematizzato, l'indice di rifrazione generalmente diminuisce all'aumentare della lunghezza d'onda.

LA FISICA NEL QUOTIDIANO

Guarda la televisione o il monitor di un computer a occhio nudo (o con i tuoi occhiali). Fai un pugno con la mano lasciando una piccola apertura al centro. Guarda ora lo stesso schermo attraverso il foro; vedrai un'immagine molto più nitida. Allargando lentamente l'apertura, l'immagine diventerà sempre più sfuocata. Chi ha problemi alla vista a volte socchiude gli occhi per vedere meglio.

Riepilogo

- In un sistema di lenti, l'immagine formata da una lente diventa un oggetto per la lente successiva.
- In un sistema di due lenti, se una lente forma un'immagine reale *dopo* la seconda lente – quindi i raggi convergono in un punto posto oltre la seconda lente – l'immagine diventa un *oggetto virtuale* per la seconda lente. Per un oggetto virtuale, nell'equazione delle lenti sottili p è *negativo*.
- In un sistema di due lenti distanti s , quando l'immagine formata dalla prima lente diventa un oggetto per la seconda lente, la distanza dell'oggetto (p_2) dalla seconda lente vale:

$$p_2 = s - q_1 \quad (22-1)$$

- L'ingrandimento trasversale totale di un'immagine formata da un sistema di due o più lenti è dato dal prodotto degli ingrandimenti delle singole lenti:

$$m_{\text{totale}} = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_N \quad (22-2)$$

- Una macchina fotografica semplice è costituita da una sola lente convergente. Per focalizzare un

oggetto, la distanza tra lente e pellicola viene regolata in modo che l'immagine reale si formi esattamente sul piano della pellicola.

- L'apertura e il tempo di esposizione devono essere regolati in modo che la pellicola sia esposta a una quantità di luce sufficiente. Quando una lente viene messa a fuoco, soltanto gli oggetti che si trovano in un piano a una determinata distanza dalla lente formano immagini nitide sulla pellicola. I raggi provenienti da punti dell'oggetto fuori da tale piano producono un cerchio sulla pellicola (*circolo di confusione*) invece che un singolo punto. Per un determinato intervallo di distanze dal piano il "circolo di confusione" è sufficientemente piccolo da formare comunque un'immagine nitida sulla pellicola. Tale intervallo di distanze definisce la *profondità di campo*. Le maggiori profondità di campo si ottengono utilizzando piccole aperture.
- Nell'occhio umano, la cornea e il cristallino rifrangono i raggi luminosi per formare un'immagine reale sulla retina. Per molti scopi, la cornea

e il cristallino possono essere considerati come una singola lente con lunghezza focale regolabile. Il cristallino può variare la propria forma per compensare differenti distanze dell'oggetto. Le distanze minima e massima che l'occhio può osservare sono dette rispettivamente punto prossimo e punto remoto. Un giovane senza problemi di vista ha il punto prossimo a circa 25 cm (o poco meno) e il punto remoto all'infinito.

- Il potere rifrattivo di una lente è definito come il reciproco della lunghezza focale:

$$P = \frac{1}{f} \quad (22-3)$$

Il potere rifrattivo si misura in diottrie ($1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$).

- L'occhio miope ha il punto remoto non all'infinito; osservando oggetti posti oltre il punto remoto l'occhio forma un'immagine *davanti* alla retina. Una lente correttiva divergente (con potere rifrattivo negativo) corregge la miopia deflettendo i raggi luminosi verso l'esterno.
- L'occhio affetto da ipermetropia ha il punto prossimo troppo lontano; il potere rifrattivo dell'occhio è troppo piccolo. Osservando oggetti più vicini del punto prossimo, l'occhio forma un'immagine *dietro* la retina. Una lente correttiva convergente corregge l'ipermetropia deflettendo i raggi luminosi verso l'interno.
- Con l'avanzare degli anni il cristallino perde in flessibilità e capacità di mettere a fuoco; tale difetto è chiamato presbiopia.
- L'ingrandimento *angolare* è definito come il rapporto tra la dimensione angolare dell'oggetto osservato con uno strumento ottico e la dimensione angolare dell'oggetto osservato a occhio nudo.

$$M = \frac{\theta_{\text{strumento}}}{\theta_{\text{occhio}}} \quad (22-5)$$

- Una lente di ingrandimento è una lente convergente in cui la distanza dell'oggetto è minore della lunghezza focale. L'immagine virtuale che si

forma è ingrandita e orientata correttamente. Se l'immagine si è formata all'infinito, l'ingrandimento angolare M vale:

$$M = \frac{N}{f} \quad (22-6)$$

dove N indica il punto prossimo, solitamente posto a 25 cm.

- Un microscopio è costituito da due lenti convergenti. L'obiettivo forma un'immagine reale ingrandita di un oggetto di piccole dimensioni posto *appena oltre* il suo punto focale. L'oculare ingrandisce l'immagine formata dall'obiettivo. Se l'immagine finale si forma all'infinito, l'ingrandimento angolare del microscopio vale:

$$M_{\text{totale}} = m_o M_e = -\frac{L}{f_o} \times \frac{N}{f_e} \quad (22-8)$$

dove N indica il punto prossimo (solitamente a 25 cm) e L la distanza tra i punti focali delle due lenti. Il segno negativo indica che l'immagine finale è invertita.

- Un telescopio astronomico rifrattore è costituito da due lenti convergenti. Come nel microscopio, l'obiettivo forma un'immagine reale. L'oculare permette di osservare tale immagine agendo come una lente di ingrandimento. L'ingrandimento angolare è dato da:

$$M = -\frac{f_o}{f_e} \quad (22-10)$$

dove il segno negativo indica che l'immagine è invertita.

- In un telescopio riflettore, uno specchio concavo sostituisce l'obiettivo.
- Si ha aberrazione sferica quando i raggi luminosi non sono parassiali e, quindi, non convergono tutti in uno stesso punto focale (o non divergono tutti da uno stesso punto focale).
- Nelle lenti l'aberrazione cromatica è dovuta al fenomeno della dispersione della luce.

 Problema o quesito di tipo concettuale e quantitativo

 Applicazione biologica o medica

1. Problemi o quesiti con unità di misura non SI

Livello di difficoltà:

Nessun  semplice

 medio

  alto

Quesiti

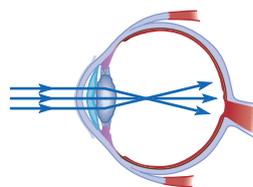
1. Perché in una macchina fotografica o in un proiettore si utilizza una lente convergente? Perché l'obiettivo di un microscopio o di un telescopio è costituito da una lente convergente (o uno specchio convergente)? Perché l'oculare di un telescopio può essere sia convergente sia divergente?
2. Una lente di ingrandimento può essere tenuta sopra un foglio di carta bianca e la sua posizione

regolata in modo che si formi l'immagine di una sorgente di luce sul foglio. Spiegare.

3. Se un cartone bianco viene posto dove si trova un oggetto virtuale, cosa si può osservare sul cartone (se si osserva qualcosa)?
4. Perché un telescopio rifrattore con un elevato ingrandimento angolare è più lungo di un telescopio con un minore ingrandimento angolare?
5. Perché gli osservatori astronomici spesso sono costruiti in cima alle montagne?
6. Perché alcuni telescopi producono immagini invertite?
7. Perché l'antenna ricevente di una parabola viene posta a una distanza ben stabilita dalla parabola?
8. Due lenti di ingrandimento sono identificate dal loro ingrandimento angolare. La lente A ha un ingrandimento di "2×" ($M = 2$), la lente B un ingrandimento di "4×". Quale lente ha la maggiore lunghezza focale? Spiegare.
9. Da cosa sono prodotte le aberrazioni cromatiche? Come si possono correggere le aberrazioni cromatiche?
10. 🌐 Nell'occhio umano, circa il 70% della rifrazione avviene a livello della cornea; meno del 25% sui due lati del cristallino. Perché? (*Aiuto:* considerare gli indici di rifrazione.) Lo stesso vale per gli occhi dei pesci?
11. Un oggetto è reale o virtuale se i raggi tracciati dal oggetto sono convergenti quando incidono su una lente?
12. Nei telescopi astronomici, quali sono i vantaggi nell'utilizzare specchi invece che lenti?
13. 🌐 Facendo snorkeling si usano occhiali per vedere meglio. Perché senza occhiali si ha una visione annebbiata? Un miope vede meglio oggetti vicini quando è sott'acqua (senza occhiali o lenti correttive). Perché?
14. 🌐 Si ha affaticamento della vista quando i muscoli dell'occhio sono tesi per un lungo intervallo di tempo. Quanto tale situazione può creare problemi a una persona che usa (a) un microscopio, (b) un telescopio, (c) una lente di ingrandimento?
15. Un microscopio e un telescopio possono essere costruiti utilizzando due lenti convergenti. Quali sono le differenze? Perché un telescopio non può essere usato come un microscopio? Perché un microscopio non può essere usato come un telescopio?
16. Un fotografo ha tre lenti di differenti lunghezze focali: 400.0 mm, 50.0 mm e 28.0 mm. Quale lente deve utilizzare per fotografare (a) una cattedrale vista dalla piazza di fronte (obiettivo a gran-

dangolo), (b) dei bambini che giocano (fotografia normale), (c) dei leoni visti da lontano (fotografia con il teleobiettivo)?

17. 🌐 La figura mostra lo schema di un occhio con un difetto alla vista. Come si chiama tale difetto?

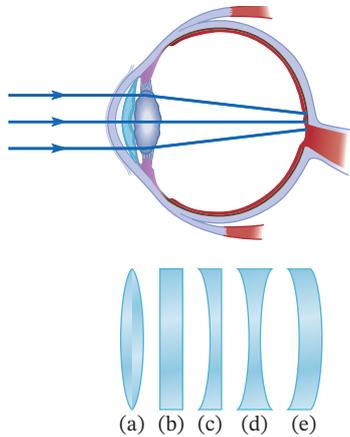


18. 🌐 Disegna uno schema semplificato dell'occhio indicando la cornea, il cristallino, l'iride, la retina, l'umor vitreo e l'umor acqueo.

Quesiti a risposta multipla

1. Il microscopio è costituito da due lenti. Quale tra le seguenti affermazioni è vera?
 - (a) Entrambe le lenti formano immagini reali.
 - (b) Entrambe le lenti formano immagini virtuali.
 - (c) La lente più vicina all'oggetto forma un'immagine virtuale; l'altra lente un'immagine reale.
 - (d) La lente più vicina all'oggetto forma un'immagine reale; l'altra lente un'immagine virtuale.
2. Quale tra le seguenti affermazioni spiega meglio perché un telescopio permette di osservare un oggetto distante come la Luna o un pianeta?
 - (a) L'immagine formata dal telescopio è più grande dell'oggetto.
 - (b) L'immagine formata dal telescopio sottende un angolo maggiore rispetto all'oggetto visto a occhio nudo.
 - (c) Il telescopio può raccogliere anche onde radio che permettono una migliore messa a fuoco.
3. Alessandra ha un punto remoto a una distanza di 25 cm dagli occhi. Quale tra le seguenti affermazioni è vera?
 - (a) Può avere una visione normale.
 - (b) È miope e necessita di lenti correttive divergenti.
 - (c) È miope e necessita di lenti correttive convergenti.
 - (d) È affetta da ipermetropia e necessita di lenti correttive divergenti.
 - (e) È affetta da ipermetropia e necessita di lenti correttive convergenti.

4. La figura mostra lo schema di un occhio con un difetto visivo e alcune lenti. Quale lente può correggere il difetto?



5. Un miope porta occhiali da vista. Uno dei punti focali delle lenti correttive deve essere:
- Sulla cornea
 - Sulla retina
 - All'infinito
 - Oltre la retina
 - Nel punto prossimo
 - Nel punto remoto
6. Un telescopio astronomico ha un ingrandimento angolare di 10. La lunghezza del tubo del telescopio è 33 cm. Quali sono le lunghezze focali rispettivamente dell'obiettivo e dell'oculare?
- 3 cm, 30 cm
 - 30 cm, 3 cm
 - 20 cm, 13 cm
 - 0.3 m, 3 m
7. Un microscopio ha tre obiettivi (con lunghezze focali f_0) e due oculari (con lunghezze focali f_e). Per avere il massimo ingrandimento angolare, come devono essere scelti l'obiettivo e l'oculare?
- f_0 e f_e hanno i massimi valori possibili.
 - f_0 e f_e hanno i minimi valori possibili.
 - f_0 ha il massimo valore possibile; f_e il minimo valore possibile.
 - f_e ha il massimo valore possibile; f_0 il minimo valore possibile.
 - f_0 e f_e hanno gli stessi valori.
8. Da cosa sono prodotte le aberrazioni cromatiche?
- La luce è un'onda elettromagnetica e ha proprietà intrinseche di diffrazione.
 - Differenti lunghezze d'onda della luce hanno differenti angoli di rifrazione all'interfaccia aria-lente.
 - Il coefficiente di riflessione varia con la lunghezza d'onda della luce.
 - La superficie esterna e la regione interna di una lente mettono a fuoco in punti differenti.
 - L'assorbimento della luce nel vetro dipende dalla lunghezza d'onda.
9. Da cosa sono prodotte le aberrazioni sferiche?
- La luce è un'onda elettromagnetica e ha proprietà intrinseche di diffrazione.
 - Differenti lunghezze d'onda della luce hanno differenti angoli di rifrazione all'interfaccia aria-lente.
 - La superficie della lente non è perfettamente piana.
 - La superficie esterna e la regione interna di una lente mettono a fuoco in punti differenti.
10. Riducendo l'apertura di una macchina fotografica:
- Si riduce la profondità di campo ed è necessario un tempo di esposizione più lungo.
 - Si riduce la profondità di campo ed è necessario un tempo di esposizione più breve.
 - Si aumenta la profondità di campo ed è necessario un tempo di esposizione più lungo.
 - Si aumenta la profondità di campo ed è necessario un tempo di esposizione più breve.
 - Non varia la profondità di campo ed è necessario un tempo di esposizione più lungo.
 - Non varia la profondità di campo ed è necessario un tempo di esposizione più breve.

Problemi

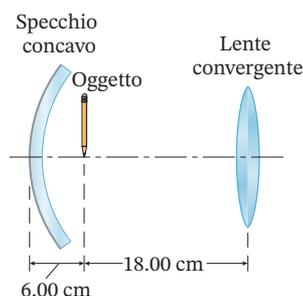
- Un oggetto viene posto 12.0 cm davanti a una lente di lunghezza focale 5.0 cm. Un'altra lente di lunghezza focale 4.0 cm viene posta 2.0 cm oltre la prima lente. (a) Dove si forma l'immagine finale? (b) Qual è l'ingrandimento totale?
- In un sistema di lenti, una lente convergente viene posta a una distanza di 30.0 cm da una lente divergente. La lente convergente ha una lunghezza focale di 15.0 cm. La lente divergente ha una lunghezza focale incognita. Un oggetto viene posto 20.0 cm davanti alla lente convergente; l'immagine finale è virtuale e si forma 12.0 cm davanti alla lente divergente. Qual è la lunghezza focale della lente divergente?
- Due lenti convergenti distano 88.0 cm. Un oggetto viene posto 1.100 m alla sinistra della prima lente che ha una lunghezza focale di 25.0 cm. L'immagine finale si forma 15.0 cm alla destra della seconda lente. (a) Qual è la lunghezza focale della seconda lente? (b) Qual è l'ingrandimento totale?
- Una lente convergente di lunghezza focale 15 cm dista 25.0 cm da una lente divergente. La lente convergente si trova alla sinistra della lente divergente. Un oggetto alto 2.00 cm viene posto 22 cm alla sinistra della lente convergente. L'immagine finale si forma 34 cm alla sinistra della lente convergente. (a) Qual è la lunghezza focale della

lente divergente? (b) Qual è l'altezza dell'immagine finale? (c) L'immagine finale è invertita o orientata correttamente?

5. Un oggetto viene posto 16.0 cm davanti a una lente convergente di lunghezza focale 12.0 cm. Alla destra della lente convergente, a una distanza di 20.0 cm, si pone una lente divergente di lunghezza focale 10.0 cm. Calcolare dove si forma l'immagine utilizzando il diagramma dei raggi e l'equazione delle lenti sottili.
6. Un oggetto viene posto a 10.0 cm da una lente convergente di lunghezza focale 12.0 cm. A una distanza di 30.0 cm alla destra della lente viene posta una seconda lente convergente di lunghezza focale 10.0 cm. Calcolare dove si forma l'immagine finale utilizzando il diagramma dei raggi e l'equazione delle lenti sottili.
7. Calcolare le posizioni e le dimensioni delle immagini formate dal sistema costituito da due lenti mostrato in Figura 22.1b, utilizzando l'equazione delle lenti sottili e i seguenti dati: $f_1 = +4.00$ cm, $f_2 = -2.00$ cm, $s = 8.00$ cm (s indica la distanza tra le due lenti), $p_1 = +6.00$ cm e $h = 2.00$ mm. (Si noti che la scala verticale è differente da quella orizzontale.)
8. ♦ Dimostrare che due lenti sottili ravvicinate (s , la distanza tra le due lenti, può essere considerata trascurabile) possono essere sostituite da una singola lente equivalente di lunghezza focale f_{eq} . Calcolare il valore di f_{eq} in funzione di f_1 e f_2 .
9. Si vuole proiettare un'immagine orientata correttamente 32.0 cm alla destra di un oggetto. Si dispone di una lente convergente di lunghezza focale 3.70 cm posta 6.00 cm alla destra dell'oggetto. Posizionando una seconda lente 24.65 cm alla destra dell'oggetto si ottiene un'immagine nella posizione desiderata. (a) Qual è la lunghezza focale della seconda lente? (b) La seconda lente è convergente o divergente? (c) Qual è l'ingrandimento totale? (d) Se l'oggetto è alto 12.0 cm, qual è l'altezza dell'immagine?
10. Si vuole proiettare un'immagine invertita 30.0 cm alla destra di un oggetto. Si dispone di una lente divergente di lunghezza focale -4.00 cm posta 6.00 cm alla destra dell'oggetto. Posizionando una seconda lente 18.0 cm alla destra dell'oggetto si ottiene un'immagine nella posizione desiderata. (a) Qual è la lunghezza focale della seconda lente? (b) La seconda lente è convergente o divergente? (c) Qual è l'ingrandimento totale? (d) Se l'oggetto è alto 12.0 cm, qual è l'altezza dell'immagine?
11. Una lente convergente di lunghezza focale 3.00 cm viene posta 4.00 cm alla destra di un oggetto.

Una lente divergente di lunghezza focale pari a -5.00 cm viene posta 17.0 cm alla destra della lente convergente. (a) In quali posizioni si può posizionare uno schermo per mostrare l'immagine? (b) In quali posizioni si può posizionare lo schermo se la distanza tra le due lenti è 10.0 cm?

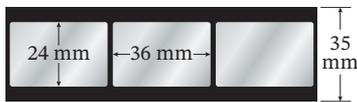
12. ♦♦ Una lente convergente di lunghezza focale 3.00 cm viene posta 24.00 cm alla destra di uno specchio concavo di lunghezza focale 4.00 cm. Un oggetto viene posto tra lo specchio e la lente 6.00 cm alla destra dello specchio e 18.00 cm alla sinistra della lente come mostrato in figura. Indicare tre posizioni dove si può formare l'immagine. Stabilire se ogni immagine è invertita o orientata correttamente e calcolare l'ingrandimento totale.



13. Una macchina fotografica utilizza un teleobiettivo di lunghezza focale 200.0 mm per fotografare dall'infinito fino a 2.0 m. Calcolare le distanze, minima e massima, lente-pellicola.
14. Kim afferma che si trovava a meno di 10 piedi dal presidente quando lo ha fotografato con la sua macchina fotografica dotata di una lente di lunghezza focale 50 mm. La fotografia mostra solo la parte superiore del corpo del presidente (solo 3 piedi dell'altezza totale del presidente). Nel negativo tale parte è alta 18 mm. Quanto distava Kim dal presidente quando lo ha fotografato?
15. ⓐ Una statua si trova a una distanza di 6.6 m dal foro di una camera oscura e lo schermo a una distanza di 2.8 m dal foro. (a) L'immagine formata è invertita o correttamente orientata? (b) Qual è l'ingrandimento dell'immagine? (c) Per ottenere un'immagine più luminosa si allarga il foro, ma così l'immagine risulta sfuocata. Perché? (d) Per avere più luce e l'immagine a fuoco si sostituisce il foro con una lente. La lente deve essere convergente o divergente? (e) Che lunghezza focale deve avere la lente?
16. Alice usa una macchina fotografica da 35 mm dotata di una lente di lunghezza focale 50.0 mm per fotografare suo figlio Carlo, alto 1.2 m e distante 3.0 m. (a) Che distanza lente-pellicola deve avere perché l'immagine sia ben a fuoco? (b) Qual è

l'ingrandimento dell'immagine? (c) Che altezza ha Carlo nell'immagine?

17. In un safari Giovanni fotografa un ippopotamo distante 75.0 m. L'animale è lungo 4.00 m e la sua immagine in fotografia risulta lunga 1.20 cm. (a) Quale lunghezza focale deve avere la lente utilizzata? (b) Quali sarebbero le dimensioni dell'immagine se la fotografia venisse scattata utilizzando una lente di lunghezza focale 50.0 mm? (c) A quale distanza dall'ippopotamo deve stare Giovanni perché in fotografia l'animale risulti lungo 1.20 cm utilizzando la lente di lunghezza focale 50 mm?
18. Tommaso vuole fotografare una torre con una macchina fotografica da 35 mm dotata di una lente di lunghezza focale 50.0 mm. Il rullino di una pellicola da 35 mm è largo 35 mm; ogni fotogramma ha le dimensioni di 24 mm \times 36 mm. La torre ha un'altezza di 52 m e Tommaso vuole fotografarla in primo piano. A che distanza dalla torre deve stare Tommaso perché l'immagine della torre intera sia la più grande possibile?



Pellicola da 35-mm

Striscia di una pellicola da 35 mm (Problemi 18, 20, 21, 56 e 68)

19. Nicola fotografa la torre Eiffel (alta 300 m) da una distanza di 300 m. Quale lunghezza focale deve avere la lente della macchina fotografica perché in fotografia la torre risulti alta 20 mm?
20. Se una diapositiva larga 36 mm (vedi la figura del Problema 18) viene proiettata su uno schermo largo 1.50 m e posto a una distanza di 12.0 m dal proiettore, quale lunghezza focale deve avere la lente perché l'immagine occupi tutto lo schermo?
21. Un proiettore ha una lente di lunghezza focale 12 cm. Ogni diapositiva ha le dimensioni di 24 mm \times 36 mm (vedi la figura del Problema 18). Il proiettore dista 5.0 m dallo schermo. Quanto deve essere largo lo schermo?
- Da qui in avanti, se non specificato altrimenti, si assumerà che la distanza del sistema cornea-cristallino dalla retina sia 2.0 cm e il punto prossimo a 25 cm dall'occhio.
22. Se la distanza tra il sistema del cristallino (cornea + cristallino) e la retina è 2.00 cm, dimostrare che la lunghezza focale del sistema del cristallino deve variare tra 1.85 cm e 2.00 cm per poter osservare oggetti posti a distanze maggiori di 25.0 cm dall'occhio.
23. Si supponga che in un occhio il sistema del cristallino (cornea + cristallino) abbia una lunghezza focale che può variare tra 1.85 cm e 2.00 cm e che la distanza tra il sistema del cristallino e la retina sia di soli 1.90 cm. (a) L'occhio è miope o affetto da ipermetropia? Spiegare. (b) In quale intervallo di distanze l'occhio riesce a osservare nitidamente oggetti senza l'uso di occhiali da vista?
24. Se Michela, per leggere, necessita di occhiali con un potere rifrattivo di +3.0 D, dove è localizzato il suo punto prossimo (senza utilizzare gli occhiali)? Si trascuri la distanza tra gli occhiali e l'occhio.
25. L'occhio di Nicola ha il punto remoto a 2.0 m. Quale potere rifrattivo devono avere le sue lenti a contatto perché possa osservare oggetti molto distanti?
26. In un occhio la distanza tra il sistema del cristallino (cornea + cristallino) e la retina è 1.75 cm. Qual è la lunghezza focale del sistema del cristallino quando l'occhio osserva nitidamente oggetti distante 25.0 cm?
27. Un miope non vede oggetti posti a distanze maggiori di 2.0 m. La distanza tra il cristallino e la retina è 2.0 cm e il potere rifrattivo dell'occhio 4.0 D. (a) Da optometrista dilettante, quali lenti correttive gli prescriveresti perché possa osservare oggetti distanti? Si assuma che la distanza delle lenti correttive dagli occhi sia 2.0 cm. (b) Calcolare la minore distanza a cui il miope può osservare nitidamente oggetti senza utilizzare gli occhiali.
28. Anna è affetta da ipermetropia; gli oggetti più vicini che può osservare nitidamente distano 2.0 m dagli occhi. La distanza tra il cristallino e la retina è 1.8 cm. (a) Disegna il diagramma dei raggi per rappresentare (qualitativamente) cosa succede quando Anna osserva oggetti posti a una distanza minore di 2.0 m senza utilizzare le lenti correttive. (b) Quale dovrebbe essere la lunghezza focale delle sue lenti a contatto perché possa osservare nitidamente oggetti distanti 20.0 cm dagli occhi?
29. Tommaso vuole usare i suoi occhiali da vista con un potere rifrattivo di 5.5 D come lente di ingrandimento. Qual è l'ingrandimento angolare di tale lente quando l'occhio di Tommaso è rilassato?
30. (a) Qual è la lunghezza focale di una lente di ingrandimento che produce, quando l'immagine è all'infinito, un ingrandimento angolare di 8.0? (b) Quanto deve distare l'oggetto dalla lente? Si assuma che la lente sia tenuta vicino agli occhi.
31. Caterina osserva un insetto con una lente di ingrandimento e vuole avere un'immagine orientata correttamente, ingrandita e a una distanza

di 25 cm. La lunghezza focale della lente di ingrandimento è +5.0 cm. Caterina tiene la lente vicino agli occhi. (a) Qual è la distanza tra la lente di ingrandimento e l'insetto? (b) Qual è l'ingrandimento angolare?

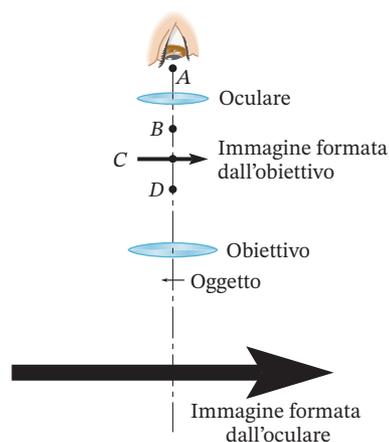
32. Carlo osserva un francobollo quadrato largo 3.00 cm con una lente di ingrandimento con un potere rifrattivo +40.0 D. La lente forma un'immagine del francobollo a una distanza di 25.0 cm. Carlo tiene la lente vicino agli occhi. (a) Qual è la distanza tra il francobollo e la lente di ingrandimento? (b) Qual è l'ingrandimento angolare? (c) Qual è la dimensione dell'immagine formata dalla lente di ingrandimento?
33. Un lente di ingrandimento può essere utilizzata per focalizzare la luce del Sole su un foglio di carta per accendere il fuoco. La lente di ingrandimento ha un diametro di 4.0 cm e una lunghezza focale di 6.0 cm. (a) Stimare le dimensioni dell'immagine del Sole quando la lente focalizza l'immagine nella sua dimensione minore. (b) Se l'intensità del Sole che colpisce la lente di ingrandimento è 0.85 kW/m^2 , qual è l'intensità dell'immagine del Sole?
34. Un insetto lungo 5.00 mm dista 10.0 cm da una lente convergente di lunghezza focale 12.0 cm. (a) Dove si forma l'immagine? (b) Qual è la dimensione dell'immagine? (c) L'immagine è invertita o correttamente orientata? (d) L'immagine è reale o virtuale? (e) Qual è l'ingrandimento angolare se la lente viene tenuta vicino agli occhi?
35. ✦ Una lente di ingrandimento produce il *massimo* ingrandimento angolare quando forma un'immagine virtuale nel punto prossimo dell'occhio invece che all'infinito. Per semplicità si assuma che la lente sia sovrapposta all'occhio in modo che le distanze dalla lente e dall'occhio siano le stesse. (a) Per un lente di ingrandimento di lunghezza focale f , calcolare la distanza dell'oggetto p in modo che l'immagine si formi nel punto prossimo, cioè a una distanza N dalla lente. (b) Dimostrare che la dimensione angolare di tale immagine, vista dall'occhio, è:

$$\theta = \frac{h(N+f)}{Nf}$$

dove h indica l'altezza dell'oggetto. (*Aiuto*: fare riferimento alla Figura 22.15.) (c) Calcolare l'ingrandimento angolare e confrontarlo con quello ottenuto quando l'immagine virtuale si forma all'infinito.

36. La figura mostra lo schema di un microscopio. Quando le posizioni dell'oggetto e dell'immagine sono quelle indicate in figura, quale dei punti (A,

B, C o D) rappresenta il punto focale dell'oculare? Disegnare il diagramma dei raggi.

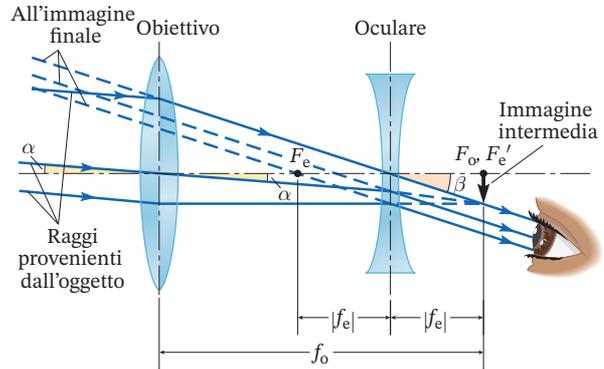


37. L'oculare di un microscopio ha la lunghezza focale di 1.25 cm; l'obiettivo la lunghezza focale di 1.44 cm. (a) Se il tubo del microscopio è lungo 18.0 cm, qual è l'ingrandimento angolare del microscopio? (b) Quale lunghezza focale dovrebbe avere l'obiettivo per produrre un ingrandimento doppio?
38. Giovanni vuole costruire un microscopio utilizzando un oculare di lunghezza focale 7.50 cm e un obiettivo di lunghezza focale 1.500 cm. Nel microscopio il campione verrà posto a una distanza di 1.600 cm dall'obiettivo. (a) Quale distanza oculare-obiettivo dovrà avere il microscopio? (b) Quale sarà l'ingrandimento angolare del microscopio?
39. 🌐 L'ala di un insetto è lunga 1.0 mm. Quando viene osservata al microscopio l'immagine è lunga 1.0 m ed è localizzata a una distanza di 5 m. Calcolare l'ingrandimento angolare.
40. Un microscopio ha l'oculare che produce un ingrandimento angolare di 5.00 per un'immagine finale all'infinito e l'obiettivo di lunghezza focale 15.0 mm. Il tubo del microscopio è lungo 16.0 cm. (a) Qual è l'ingrandimento trasversale prodotto dal solo obiettivo? (b) Qual è l'ingrandimento angolare del microscopio? (c) A quale distanza dall'obiettivo deve essere posto l'oggetto?
41. ✦ Calcolare il punto (c) del Problema 40 utilizzando un oculare che produce un ingrandimento angolare di 5.00 per un'immagine finale nel punto prossimo (25 cm) dell'osservatore invece che all'infinito.
42. Un microscopio ha l'obiettivo di lunghezza focale 5.00 mm. L'obiettivo forma un'immagine a una distanza di 16.5 cm. La lunghezza focale dell'oculare è 2.80 cm. (a) Qual è la distanza tra obiettivo e oculare? (b) Qual è l'ingrandimento angolare?

Il punto prossimo è a 25 cm. (c) A quale distanza dall'obiettivo deve essere posto l'oggetto?

43. ♦♦ Considerare il Problema 42 nel caso in cui la posizione dell'oculare venga regolata in modo che l'immagine finale si formi nel punto prossimo dell'osservatore (25.0 cm) invece che all'infinito.
44. ♦ Utilizzando l'equazione delle lenti sottili, dimostrare che l'ingrandimento trasversale dell'obiettivo di un microscopio vale $m_0 = -L/f_0$. (Aiuto: l'oggetto è vicino al punto focale dell'obiettivo; non si assuma che sia nel punto focale. Si elimini p_0 per calcolare l'ingrandimento in funzione di q_0 e f_0 . Come è correlato L a q_0 e f_0 ?).
45. (a) Se ti trovi su un'isola deserta con solo un paio di occhiali con un potere rifrattivo di 3.5 D puoi costruire un telescopio? Quale dovrà essere la lunghezza del tubo del telescopio e quale sarà il massimo ingrandimento angolare? (b) Rispondi alle stesse domande nel caso in cui avessi a disposizione anche un altro paio di occhiali con un potere rifrattivo di 1.3 D.
46. Lo specchio di un telescopio ha il raggio di curvatura di 10.0 m. Il telescopio viene utilizzato per visualizzare la Luna (raggio Luna 1740 km, distanza Terra-Luna 385000 km). Qual è il diametro dell'immagine della Luna prodotta dallo specchio?
47. Un vecchio telescopio rifrattore è lungo 45.0 cm ed è capace di ingrandire di un fattore 30.0 l'immagine di un oggetto. Assumendo che ciò valga quando si osserva, con il minimo affaticamento della vista, un oggetto posto all'infinito, qual è la lunghezza focale delle due lenti?
48. L'obiettivo di un telescopio astronomico forma l'immagine di un oggetto distante nel punto focale di un oculare che ha la lunghezza focale di 5.0 cm. Le due lenti distano 45.0 cm. Qual è l'ingrandimento angolare?
49. Un telescopio rifrattore viene utilizzato per osservare la Luna (diametro Luna 3474 km, distanza Terra-Luna 384500 km). Le lunghezze focali dell'obiettivo e dell'oculare sono rispettivamente +2.40 m e +16.0 cm. (a) Qual è la distanza tra le due lenti? (b) Qual è il diametro dell'immagine formata dall'obiettivo? (c) Qual è l'ingrandimento angolare?
50. ♦ L'oculare di un telescopio galileiano è costituito da una lente divergente. I punti focali F_0 e F'_e coincidono (vedi la figura che segue). Nel telescopio le lenti si trovano a una distanza $d = 32$ cm e la lunghezza focale dell'obiettivo è 36 cm. Un rinoceronte viene osservato da molto lontano. (a) Qual è la lunghezza focale dell'oculare? (b) A quale distanza dall'oculare si forma l'immagine

finale? (c) L'immagine finale formata dall'oculare è reale o virtuale? L'immagine finale è invertita o correttamente orientata? (d) Qual è l'ingrandimento angolare? (Aiuto: l'ingrandimento angolare è β/α .)



Problemi di riepilogo

51. Le lenti di migliore qualità utilizzate in macchine fotografiche e in altri strumenti ottici sono composte da sistemi di più lenti, cioè vengono costruite unendo più lenti in modo da minimizzare gli effetti dovuti alla dispersione (le aberrazioni cromatiche). Si supponga che una lente convergente di lunghezza focale 4.00 cm sia posta in prossimità di una lente divergente di lunghezza focale -20.0 cm. Un oggetto è posizionato 2.50 m alla sinistra di questo sistema di lenti. (a) Dove si formerà l'immagine? (b) L'immagine sarà reale o virtuale?
52. Si consideri un sistema costituito da due lenti convergenti separate da una distanza di 50.0 cm. La prima lente ha la lunghezza focale di 15.0 cm. La seconda lente, posta alla destra della prima, ha la lunghezza focale di 12.0 cm. Un oggetto alto 3.00 cm viene posto davanti alla prima lente a una distanza di 20.0 cm. (a) Calcolare la distanza dell'immagine intermedia rispetto alla prima lente e dell'immagine finale rispetto alla seconda lente. (b) Qual è l'ingrandimento totale? (c) Qual è l'altezza dell'immagine finale?
53. ♦♦ Un oggetto sia posto nel punto $x = 0$. Nel punto $x = 2.50$ cm è posizionata una lente convergente di lunghezza focale 2.00 cm, nel punto $x = 16.5$ cm una lente di tipo incognito e nel punto $x = 19.8$ cm un'altra lente convergente di lunghezza focale 4.00 cm. Un'immagine orientata correttamente si forma nel punto $x = 39.8$ cm. Per tutte le lenti che costituiscono il sistema, la distanza dell'oggetto è maggiore della loro lunghezza focale. L'ingrandimento totale del sistema è 6.84. (a) La lente di tipo incognito è divergente o convergente? (b) Qual è la lunghezza

za focale della lente di tipo incognito? (c) Disegnare il diagramma dei raggi per verificare le risposte.

54. Una macchina fotografica ha un teleobiettivo di lunghezza focale 240 mm. La distanza lente-pellicola può essere regolata fino a 16 mm. Se la lente può focalizzare oggetti all'infinito, qual è la minore distanza a cui può essere focalizzato un oggetto?

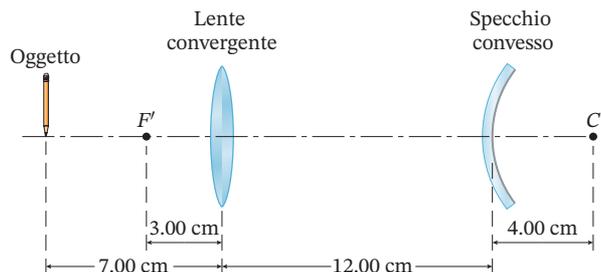
55.  Si considerino due lenti di lunghezza focale rispettivamente 25.0 cm (lente 1) e 5.0 cm (lente 2). (a) Per costruire un telescopio astronomico che produca un ingrandimento angolare di 5.0, quale delle due lenti deve essere l'obiettivo e quale l'oculare? Spiegare. (b) A quale distanza devono essere poste le due lenti?

56. La famiglia Rossi guarda le diapositive della loro recente vacanza in Sardegna. Il proiettore ha una lente di lunghezza focale 10.0 cm e lo schermo è posto a 2.5 m dalla lente. (a) Qual è la distanza tra le diapositive e la lente del proiettore? (b) Qual è l'ingrandimento dell'immagine? (c) L'immagine di una diapositiva larga 36 mm, quanto appare grande sullo schermo? (Vedi la figura del Problema 18.)

57. Un proiettore, utilizzando diapositive larghe 5.08 cm, forma immagini di 2.00 m su uno schermo distante 3.50 m. Qual è la lunghezza focale della lente del proiettore?

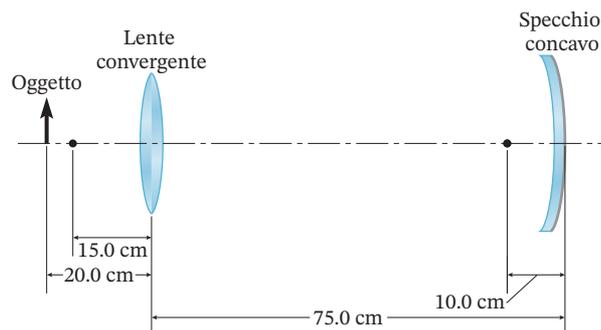
58.   Valentina è miope; non riesce a vedere nitidamente oggetti distanti più di 6.00 m senza utilizzare le lenti a contatto. Un giorno al lavoro, avendo dimenticato le lenti a contatto, usa dei vecchi occhiali che le erano stati prescritti quando non vedeva nitidamente oggetti distanti più di 8.00 m. Assumendo che gli occhiali distino 2.00 cm dagli occhi, qual è la massima distanza alla quale Valentina riuscirà a vedere nitidamente con gli occhiali?

59. Un oggetto viene posto 7.00 cm alla sinistra di una lente convergente di lunghezza focale 3.00 cm. Uno specchio convesso, con un raggio di curvatura di 4.00 cm, viene posto 12 cm alla destra della lente. (a) Dove forma l'immagine intermedia la lente? (b) L'immagine intermedia è reale o virtuale, invertita o correttamente orientata rispetto all'oggetto? (c) Qual è l'ingrandimento dell'immagine? (d) Dove forma l'immagine lo specchio? (e) L'immagine formata dallo specchio è reale o virtuale, invertita o correttamente orientata rispetto all'oggetto? (f) Qual è l'ingrandimento dello specchio? (g) Qual è l'ingrandimento totale?



60. Si consideri il Problema 59. Disegnare il diagramma dei raggi per le due immagini. Evidenziare i punti focali e tracciare tre raggi per costruire le immagini. (Aiuto: la seconda immagine è molto piccola, quindi conviene partire da un oggetto di grandi dimensioni.)

61. Un oggetto dista 20.0 cm da una lente convergente di lunghezza focale 15.0 cm (vedi la figura sottostante; le dimensioni non sono in scala). Uno specchio concavo di lunghezza focale 10.0 cm viene posto 75.0 cm alla destra della lente. (a) L'immagine finale è reale o virtuale? Invertita o correttamente orientata? (b) Dove si forma l'immagine finale? (c) Qual è l'ingrandimento trasversale totale?



62. Due lenti di lunghezza focale rispettivamente 3.0 cm e 30.0 cm vengono utilizzate per costruire un piccolo telescopio. (a) Quale delle due lenti deve essere usata come obiettivo? (b) Qual è l'ingrandimento angolare? (c) A quale distanza devono essere poste le due lenti?

63.  (a) Se Giuseppe ha il punto prossimo a 1.5 m, qual è la lunghezza focale delle sue lenti a contatto? (b) Qual è il potere rifrattivo, in diottrie, delle lenti a contatto?

64. Un telescopio astronomico produce un ingrandimento angolare di 12. Le due lenti convergenti distano 66 cm. Calcolare la lunghezza focale delle due lenti del telescopio.

65. Si consideri un sistema costituito da due lenti distanti 21.0 cm. La prima lente ha una lunghezza

- focale di +30.0 cm; la seconda lente una lunghezza focale di -15.0 cm. Un oggetto lungo 2.0 mm viene posto davanti alla prima lente a una distanza di 1.8 cm. (a) A quale distanza dalla prima lente si forma l'immagine intermedia? A quale distanza dalla seconda lente si forma l'immagine finale? (b) Qual è l'ingrandimento totale? (c) Qual è l'altezza dell'immagine finale?
66. La lente di una macchina fotografica ha la lunghezza focale fissa di 50.0 mm. La lente focalizza un bambino alto 1.0 m distante 3.0 m. (a) L'immagine che si forma è reale o virtuale? Perché? (b) La lente è convergente o divergente? Perché? (c) Qual è la distanza lente-pellicola? (d) Quanto è alta l'immagine sulla pellicola? (e) Per mettere a fuoco la lente viene allontanata o avvicinata alla pellicola? Se la macchina fotografica può fotografare oggetti posto a distanze che variano da 1.00 m all'infinito, a quale distanza può essere regolata la lente?
67. Una macchina fotografica con una lente di lunghezza focale 50 mm può focalizzare oggetti posti a distanze che variano da 1.5 m all'infinito regolando opportunamente la distanza lente-pellicola. Dopo aver fotografato montagne lontane, si cambia la messa a fuoco per fotografare oggetti distanti solo 1.5 m. Qual è ora la distanza lente-pellicola?
68. Lo spazio occupato da un fotogramma su una pellicola da 35 mm è 24 mm × 36 mm (vedi la figura del Problema 18). La lunghezza focale della lente di una macchina fotografica è 50.0 mm. Viene fotografata una persona alta 182 cm. Quale deve essere la minima distanza macchina fotografica-persona affinché l'altezza dell'immagine corrisponda perfettamente alle dimensioni della pellicola?
69. Un microscopio viene progettato per avere una grande distanza tra l'oggetto e l'obiettivo. Si supponga che la lunghezza focale dell'obiettivo sia 5.0 cm, la lunghezza focale dell'oculare 4.0 cm e la distanza obiettivo-oculare 32.0 cm. (a) Qual è la distanza oggetto-obiettivo? (b) Qual è l'ingrandimento angolare?
70. Si costruisce un microscopio utilizzando due lenti convergenti con un potere rifrattivo di +18 D poste ai due estremi di un tubo lungo 28 cm. (a) Qual è la lunghezza del tubo del microscopio? (b) Qual è l'ingrandimento angolare? (c) Quale deve essere la distanza oggetto-obiettivo?
71. Un microscopio ha l'oculare di lunghezza focale 2.0 cm e l'obiettivo di lunghezza focale 3.00 cm. L'oculare forma un'immagine virtuale nel punto prossimo dell'osservatore (a 25.0 cm dall'occhio). (a) Quanto dista dall'oculare l'immagine formata dall'obiettivo? (b) Se le due lenti distano 20.0 cm, qual è la distanza oggetto-obiettivo? (c) Qual è l'ingrandimento angolare?
72. Una lente convessa con un potere rifrattivo di +12 D viene utilizzata come lente di ingrandimento per esaminare un oggetto. Qual è l'ingrandimento angolare se l'immagine finale si forma (a) all'infinito o (b) nel punto prossimo dell'osservatore (a una distanza di 25 cm)?
73. Un telescopio rifrattivo ha l'obiettivo di lunghezza focale 2.20 m e l'oculare di lunghezza focale 1.5 cm. Se si utilizza il telescopio erroneamente, cioè osservando un oggetto attraverso l'obiettivo, di quale fattore risulta ridotta la dimensione angolare dell'oggetto?
74. Si supponga che in un occhio il sistema del cristallino (cornea + cristallino) disti dalla retina 18 mm. (a) Quale deve essere il potere rifrattivo del cristallino quando si osservano oggetti lontani? (b) Quale deve essere il potere rifrattivo del cristallino quando si osservano oggetti distanti 20.0 cm dall'occhio? (c) Si supponga che l'occhio sia affetto da ipermetropia; la persona non riesce a osservare nitidamente oggetti più vicini di 1.0 m. Calcolare il potere rifrattivo delle lenti a contatto che dovrebbero essere utilizzate per poter vedere nitidamente oggetti distanti 20 cm.
75. Un uomo necessita di occhiali con un potere rifrattivo di +2.0 D per leggere un libro tenuto a una distanza di 40.0 cm senza affaticare la vista. Si supponga che gli occhiali distino 2.0 cm dagli occhi. (a) Qual è il suo punto remoto senza utilizzare gli occhiali? (b) Quale potere rifrattivo dovrebbero avere le lenti perché possa osservare oggetti lontani? (c) Senza utilizzare gli occhiali, l'uomo ha il punto prossimo a 1 m. Quale potere rifrattivo dovrebbero avere le lenti perché possa osservare nitidamente oggetti posti a distanze che variano da 25 cm all'infinito?

Risposte ai Problemi di verifica

- 22.1 L'oggetto può essere sia reale che virtuale. Se l'immagine reale si forma davanti alla seconda lente, l'oggetto è reale; se la seconda lente interrompe i raggi luminosi prima che si formi l'immagine reale, l'oggetto è virtuale.
- 22.2 $q_1 = +16.7$ cm; $q_2 = 4.3$ cm; $m = -0.43$; $h' = 1.7$ cm.
- 22.3 51.7 mm.
- 22.4 13.3 cm.
- 22.5 49.9 cm.
- 22.6 (a) 3.08. (b) 2.08.

22.7 (a) 18 cm. (b) 1.9 cm.

22.8 -780 .

Risposte ai quesiti Mettiti alla prova

22.1 $p_1 = +6$ cm (oggetto reale), $q_1 = +12$ cm (un'immagine reale si sarebbe formata in questo punto se non ci fosse la lente 2); $s = 8$ cm; $p_2 = -4$ cm (oggetto virtuale); $q_2 = -4$ cm (immagine virtuale).

$m_1 = -2$ (l'immagine formata dalla lente 1 ha dimensioni doppie di quelle dell'oggetto; l'immagine è invertita). $m_2 = -1$ (l'oggetto e l'immagine hanno le stesse dimensioni; l'immagine è invertita).

$m = m_1 \times m_2 = +2$ (l'immagine finale ha dimensioni doppie di quelle dell'oggetto originale. L'immagine non è invertita).

22.2 No, dato che la lente deve formare un'immagine reale sul piano della pellicola (o del sensore). Se la distanza dell'oggetto p è minore di f , l'immagine che si forma è virtuale.

22.3 Se il tuo amico è miope, l'idea non potrà funzionare. Per correggere la miopia si usano in-

fatti lenti divergenti e una lente divergente non può essere utilizzata per concentrare i raggi del Sole! Se invece il tuo amico fosse presbite, l'idea potrebbe funzionare, dato che per correggere la presbiopia si usano lenti convergenti.

22.4 No. Per essere ben visibile, un'immagine non può essere posta a una distanza inferiore a quella del punto prossimo dell'occhio: $|q| = N$. Usando una lente divergente, la distanza dell'oggetto dall'occhio dovrebbe essere maggiore di quella dello stesso punto prossimo, $p > |q| = N$. La dimensione angolare dell'immagine risulterebbe perciò minore di quella che avremmo a occhio nudo.

22.6 In un microscopio, l'oggetto da ingrandire viene posto subito dopo il punto focale dell'obiettivo. Dato che la dimensione angolare dell'oggetto risulta maggiore quanto più è vicino all'obiettivo stesso, il maggiore ingrandimento possibile si ottiene con la minore lunghezza focale. In un telescopio, l'oggetto è molto lontano e la sua dimensione angolare è fissa. Tanto maggiore è la lunghezza focale dell'obiettivo, tanto più grande sarà l'immagine reale dell'oggetto lontano.