CAPITOLO

16

Le lenti e gli strumenti ottici

Una lente non inventa nulla: raccoglie i raggi che un punto sparpaglia nello spazio e li rimette insieme in un altro punto.

OBIETTIVI

1. Distinguere lenti convergenti e divergenti e spiegare con la rifrazione perché deviano la luce.
2. Costruire le immagini date da una lente sottile con i raggi principali e classificarle come reali o virtuali, diritte o capovolte, ingrandite o rimpicciolite.
3. Usare l'equazione delle lenti sottili, l'ingrandimento e il potere diottrico con la convenzione dei segni.
4. Descrivere come l'occhio forma le immagini e mette a fuoco, e calcolare la lente che corregge miopia e ipermetropia.
5. Spiegare il funzionamento della lente d'ingrandimento, del microscopio e del cannocchiale e calcolarne l'ingrandimento.
6. Misurare in laboratorio la distanza focale di una lente convergente e valutarne l'incertezza.

INDICE DEL CAPITOLO

16.1 Le lenti sottili 2
16.2 Le immagini date dalle lenti 5
16.3 L'equazione delle lenti e il potere diottrico 7
16.4 L'occhio 10
16.5 Gli strumenti ottici 14

Fisica 2 · Parte V · L'ottica geometrica · versione 1.0
Capitolo 16: Le lenti e gli strumenti ottici · pagine 397–420 del volume completo · estratto per lo studio

Gli occhiali sul naso di un compagno, l'obiettivo della fotocamera del telefono, il microscopio del laboratorio di scienze: tutti contengono lenti, pezzi di vetro o di plastica trasparente con le facce curve. Una lente non fa nulla di misterioso: piega la luce con la rifrazione che hai studiato nel capitolo 15, ma lo fa in modo ordinato, così che i raggi partiti da un punto di un oggetto si ritrovino in un punto dell'immagine.

In questo ultimo capitolo vedremo come una lente forma le immagini e come calcolarne posizione e grandezza con un'equazione che conosci già dagli specchi (capitolo 14). Poi useremo queste idee per capire lo strumento ottico più importante di tutti, l'occhio, e come si correggono i suoi difetti; infine la lente d'ingrandimento, il microscopio e il cannocchiale, lo strumento con cui Galileo cambiò l'astronomia.

16.1 Le lenti sottili

16.1.1 Lenti convergenti e divergenti

Una **lente** è un corpo trasparente limitato da due superfici curve, di solito calotte sferiche, oppure da una superficie curva e una piana. Le lenti si dividono in due famiglie (Figura 16.1, in alto). Le lenti **più spesse al centro che ai bordi** (biconvesse, piano-convesse, a menisco convergente) fanno convergere un fascio di raggi paralleli: sono le **lenti convergenti**. Le lenti **più sottili al centro che ai bordi** (biconcave, piano-concave, a menisco divergente) lo fanno divergere: sono le **lenti divergenti**. Tutto questo vale per una lente di vetro o di plastica immersa in aria, cioè in un mezzo con indice di rifrazione minore di quello della lente: è il caso che considereremo sempre.

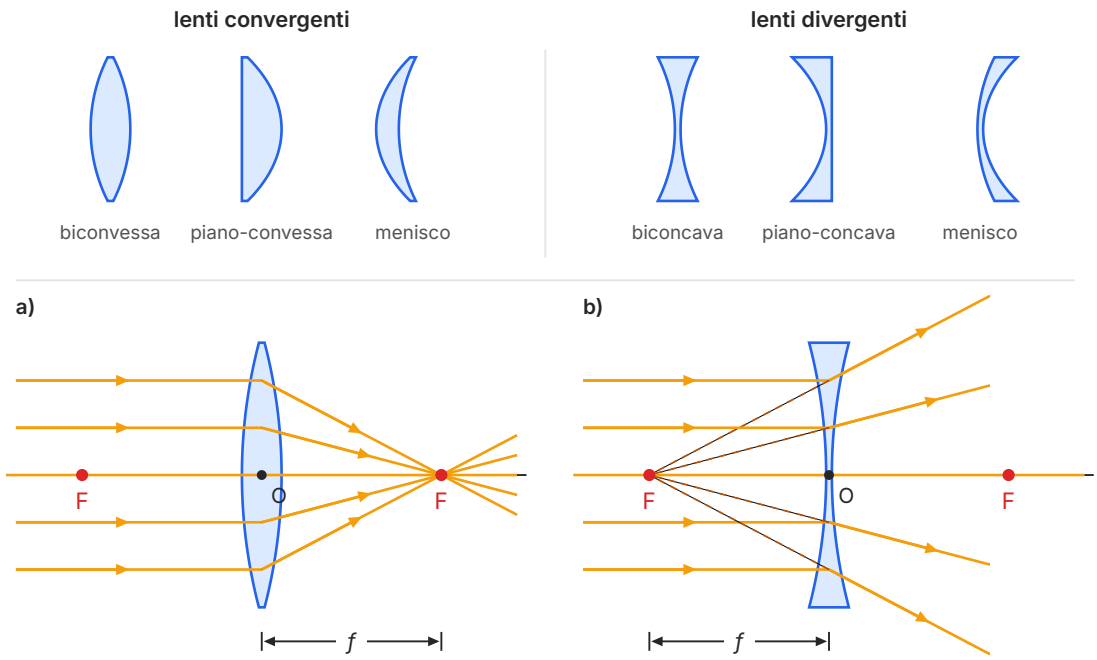


Figura 16.1 In alto: forme di lenti convergenti, più spesse al centro, e divergenti, più sottili al centro (sezioni). In basso: a) una lente convergente fa convergere i raggi paralleli all'asse nel fuoco F che si trova dalla parte opposta; b) una lente divergente li fa divergere come se provenissero dal fuoco F che si trova dalla parte da cui arriva la luce (prolungamenti tratteggiati). Ogni lente ha due fuochi, simmetrici rispetto al centro ottico O, alla stessa distanza f.

Studieremo solo le **lenti sottili**, il cui spessore è trascurabile rispetto alla distanza focale e ai raggi di curvatura delle facce. È un'approssimazione ottima per gli occhiali e le lenti d'ingrandimento, e ci permette di disegnare la lente come un piano su cui i raggi cambiano direzione una sola volta.

16.1.2 Perché una lente devia la luce

Hai visto nel capitolo 15 che un prisma di vetro devia un raggio di luce verso la sua base, cioè verso la parte più spessa. Una lente convergente si può immaginare come una pila di piccoli prismi: quello al centro è una lastra a facce parallele, che non devia, mentre quelli verso i bordi hanno le facce sempre più inclinate fra loro e la base rivolta verso l'asse. Un raggio che attraversa la lente lontano dal centro viene quindi deviato verso l'asse, e tanto di più quanto più è lontano: per questo raggi paralleli fra loro si incontrano in un punto. In una lente divergente i prismi hanno la base rivolta verso l'esterno, e i raggi vengono allontanati dall'asse.

Gli elementi di una lente sottile sono pochi (Figura 16.1, in basso). La retta che passa per i centri di curvatura delle due facce è l'**asse ottico**; il punto in cui l'asse attraversa la lente è il

centro ottico O. I raggi paralleli all'asse, dopo la lente, convergono in un punto dell'asse, il **fuoco** F della lente convergente; in una lente divergente sono i loro prolungamenti a passare per un fuoco, virtuale, che si trova dalla parte da cui arriva la luce. La distanza fra il fuoco e il centro ottico è la **distanza focale** f.

A differenza di uno specchio, una lente si può attraversare in entrambi i versi: se la luce arriva da destra, il fascio parallelo converge nel punto simmetrico, dall'altra parte. Una lente sottile ha quindi **due fuochi**, alla stessa distanza f dal centro ottico, uno per parte; la distanza focale è la stessa anche se le due facce hanno curvature diverse. Come per gli specchi, la convergenza in un solo punto vale per i raggi vicini all'asse e poco inclinati, e ci limiteremo sempre a questi.

> **ERRORE FREQUENTE**
> «Le lenti convergenti sono convesse, quindi convergono sempre.» La forma dice se una lente converge solo in confronto con il mezzo che la circonda. Una lente di vetro più spessa al centro è convergente in aria, ma una «lente» d'aria della stessa forma, cioè una bolla in un blocco di vetro o d'acqua, fa divergere la luce, perché ora la luce passa da un mezzo con indice maggiore a uno con indice minore e la rifrazione la allontana dall'asse. In questo libro le lenti sono sempre di vetro o di plastica, in aria.

16.1.3 I tre raggi principali

Anche per le lenti, per trovare l'immagine di un punto si usano due dei tre **raggi principali**, di cui conosciamo il percorso senza misurare angoli:

1. il raggio **parallelo all'asse**, dopo la lente, passa per il fuoco che si trova dall'altra parte (lente convergente) oppure prosegue come se provenisse dal fuoco che si trova dalla parte della luce (lente divergente);
2. il raggio che passa per il **centro ottico** prosegue **senza essere deviato**: al centro la lente si comporta come una lastra a facce parallele sottile, che sposta il raggio di una distanza trascurabile;
3. il raggio che passa per il fuoco che si trova dalla parte della luce (lente convergente), oppure che è diretto verso il fuoco dalla parte opposta (lente divergente), esce **parallelo all'asse**.

Il terzo raggio è il primo percorso al contrario: il cammino della luce è reversibile. Il secondo è il più comodo, perché non richiede di conoscere la lente: per questo nei disegni si usa quasi sempre.

16.2 Le immagini date dalle lenti

16.2.1 La lente convergente

Mettiamo come oggetto una freccia verticale con la base sull'asse, a una distanza p dalla lente. Nella Figura 16.2, parte a l'oggetto è più lontano di $2f$: i raggi uscenti dalla punta si incontrano davvero dall'altra parte della lente, fra F e 2F, e lì si forma un'**immagine reale**, **capovolta** e **rimpicciolita**, che puoi raccogliere su uno schermo. È ciò che succede nella macchina fotografica e nell'occhio, dove l'oggetto è di solito lontano e l'immagine piccola cade sul sensore o sulla retina.

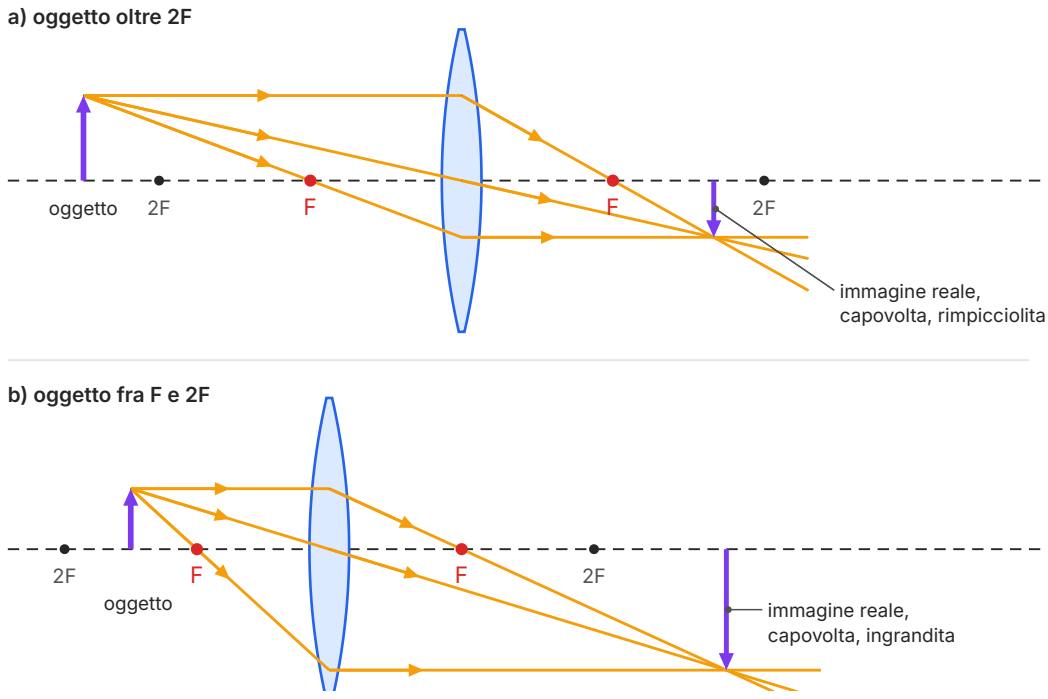


Figura 16.2 Costruzione delle immagini di una lente convergente con i tre raggi principali; posizioni calcolate con l'equazione delle lenti. a) Oggetto a 200 unità del disegno da una lente con f = 80: immagine reale, capovolta e rimpicciolita, a 133 unità dalla lente (ingrandimento −0,67). b) Oggetto a 105 unità da una lente con f = 70: immagine reale, capovolta e ingrandita due volte, a 210 unità dalla lente.

Avvicinando l'oggetto alla lente l'immagine si allontana e diventa più grande. Con l'oggetto in 2F l'immagine è in 2F dall'altra parte, capovolta e della stessa grandezza; con l'oggetto fra 2F e F l'immagine reale cade oltre 2F ed è **ingrandita** (Figura 16.2, parte b): è il principio del proiettore, che da una piccola immagine illuminata ne forma una grande sullo schermo. Con l'oggetto

nel fuoco i raggi escono paralleli e l'immagine «va all'infinito». Infine, con l'oggetto fra il fuoco e la lente, i raggi uscenti divergono: l'occhio che li riceve vede, dalla stessa parte dell'oggetto, un'immagine **virtuale**, **diritta** e **ingrandita**. È la lente d'ingrandimento, che studieremo nel paragrafo sugli strumenti ottici. La Tabella 16.1 riassume tutti i casi.

Tabella 16.1 Immagini date da una lente sottile di un oggetto reale (distanze dal centro ottico; f = distanza focale in valore assoluto).

Lente e posizione dell'oggetto	Posizione dell'immagine	Caratteristiche	Un esempio
convergente, oggetto oltre 2F ($p > 2f$)	dall'altra parte, fra F e 2F	reale, capovolta, rimpicciolita	macchina fotografica, occhio
convergente, oggetto in 2F ($p = 2f$)	dall'altra parte, in 2F	reale, capovolta, stessa grandezza	—
convergente, oggetto fra 2F e F ($f < p < 2f$)	dall'altra parte, oltre 2F	reale, capovolta, ingrandita	proiettore
convergente, oggetto in F ($p = f$)	nessuna immagine (raggi uscenti paralleli)	—	faro, torcia
convergente, oggetto fra F e la lente ($p < f$)	dalla parte dell'oggetto	virtuale, diritta, ingrandita	lente d'ingrandimento
divergente, qualunque posizione	dalla parte dell'oggetto, fra F e la lente	virtuale, diritta, rimpicciolita	spioncino della porta

16.2.2 La lente divergente

Con una lente divergente i raggi uscenti divergono sempre, qualunque sia la posizione dell'oggetto, e si devono usare i loro prolungamenti (Figura 16.3). Questi si incontrano dalla parte dell'oggetto, fra il fuoco e la lente: l'immagine di un oggetto reale è sempre **virtuale, diritta e rimpicciolita**. Lo spioncino delle porte contiene lenti divergenti: chi guarda dall'interno vede, rimpicciolito, tutto il pianerottolo.

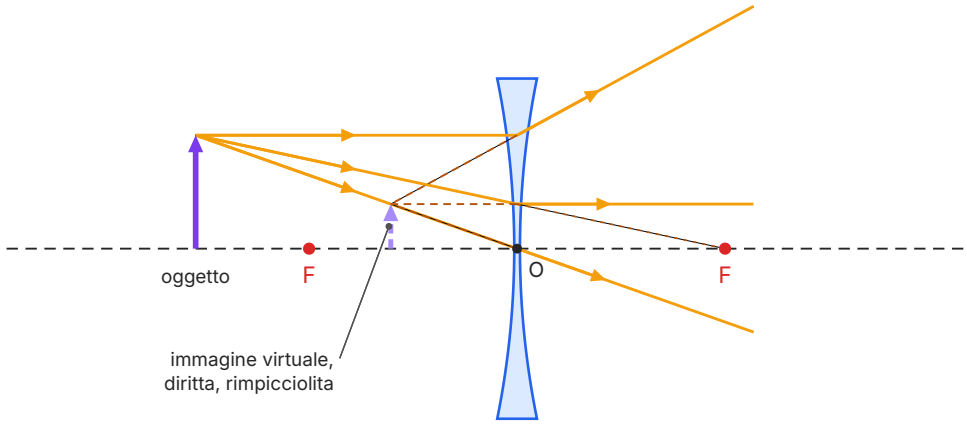


Figura 16.3 Costruzione dell'immagine in una lente divergente ($f = -110$ unità del disegno, oggetto a 170 unità dalla lente). Il raggio parallelo all'asse esce come se provenisse dal fuoco dalla parte della luce; quello diretto verso il fuoco dalla parte opposta esce parallelo all'asse; quello per il centro ottico non è deviato. I prolungamenti (tratteggiati) si incontrano a 67 unità dalla lente: l'immagine è virtuale, diritta e rimpicciolita (ingrandimento 0,39).

DA RICORDARE

Un'immagine **reale** si forma dove i raggi si incontrano davvero e si può raccogliere su uno schermo; per una lente sta dalla parte **opposta** all'oggetto. Un'immagine **virtuale** si forma dove si incontrano i prolungamenti dei raggi, non si può proiettare, ma si vede guardando attraverso la lente; sta dalla **stessa parte** dell'oggetto. Una lente divergente, da sola, dà di un oggetto reale solo immagini virtuali.

Se copri metà di una lente, l'immagine sullo schermo non perde metà della figura: ogni punto dell'oggetto manda raggi su tutta la lente, e la parte libera basta a formare l'immagine intera, solo meno luminosa.

16.3 L'equazione delle lenti e il potere diottrico

16.3.1 L'equazione delle lenti sottili

Nel capitolo 14 hai ricavato, con due coppie di triangoli simili, l'equazione dei punti coniugati di uno specchio. Per una lente sottile il ragionamento è lo stesso: il raggio per il centro ottico, che non è deviato, forma con l'oggetto e con l'immagine due triangoli simili che danno $h'/h = q/p$; il raggio per il fuoco, che esce parallelo, ne forma altri due che danno $h'/h = f/(p - f)$. Uguagliando i rapporti si trova la stessa relazione, che per le lenti si chiama **equazione delle lenti sottili**:

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

Qui p è la distanza dell'oggetto dal centro ottico, q quella dell'immagine e f la distanza focale, tutte nella stessa unità. La convenzione dei segni è quella degli specchi, adattata al fatto che la luce attraversa la lente:

- $p > 0$ per un oggetto reale (sempre, nei nostri problemi);
- $q > 0$ se l'immagine è **reale**, dalla parte opposta all'oggetto; $q < 0$ se è **virtuale**, dalla stessa parte dell'oggetto;
- $f > 0$ per una lente **convergente**, $f < 0$ per una lente **divergente**.

L'**ingrandimento lineare** si calcola come per gli specchi, e con questa convenzione ha anche il segno giusto:

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

$G < 0$ indica un'immagine capovolta, $G > 0$ un'immagine diritta; $|G| > 1$ un'immagine ingrandita, $|G| < 1$ rimpicciolita. Poiché $p > 0$, le immagini reali ($q > 0$) di una lente sono sempre capovolte e quelle virtuali sempre diritte, proprio come negli specchi.

ESEMPIO SVOLTO

Una lente convergente, due posizioni dell'oggetto

Problema. Una lente convergente ha distanza focale 15 cm. Un oggetto alto 3,0 cm è posto a) a 45 cm dalla lente; b) a 10 cm dalla lente. Trova in ciascun caso posizione, ingrandimento, altezza e caratteristiche dell'immagine.

Dati e convenzione. Lente convergente: $f = +15$ cm; oggetto reale: $p > 0$.

Calcolo. a) $1/q = 1/f - 1/p = 1/(15\text{ cm}) - 1/(45\text{ cm}) = 2/(45\text{ cm})$, quindi $q = +22{,}5$ cm $\approx +23$ cm. $G = -q/p = -22{,}5/45 = -0{,}50$; $h' = Gh = -1{,}5$ cm. b) $1/q = 1/(15\text{ cm}) - 1/(10\text{ cm}) = -1/(30\text{ cm})$, quindi $q = -30$ cm. $G = -(-30)/10 = +3{,}0$; $h' = +9{,}0$ cm.

Interpretazione. a) Immagine reale, a 23 cm dalla lente dalla parte opposta all'oggetto, capovolta, alta metà dell'oggetto: l'oggetto è oltre 2F (45 cm > 30 cm) e l'immagine cade fra F e 2F, come nella prima riga della Tabella 16.1. b) Immagine virtuale, 30 cm dalla lente dalla parte dell'oggetto, diritta, ingrandita tre volte: l'oggetto è fra il fuoco e la lente, e la lente fa da lente d'ingrandimento.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere il grafico di q in funzione di p

Problema. La Figura 16.4 mostra la distanza q dell'immagine in funzione della distanza p dell'oggetto, calcolata con l'equazione delle lenti per una lente convergente con $f = 10$ cm. a) Che cosa succede all'immagine quando l'oggetto si avvicina al fuoco da lontano? b) Perché per $p < 10$ cm la curva sta sotto l'asse delle ascisse? c) Per quale valore di p l'immagine è reale e della stessa grandezza dell'oggetto?

Lettura. a) Per p molto grande q si avvicina a 10 cm: l'immagine di un oggetto lontano si forma nel fuoco. Quando p diminuisce verso 10 cm, q cresce sempre più rapidamente: per $p = 30$ cm è 15 cm, per $p = 15$ cm è 30 cm, per $p = 12$ cm è già 60 cm. Le due rette tratteggiate $p = f$ e $q = f$ sono **asintoti**: la curva vi si avvicina senza mai toccarle. b) Per $p < f$, $1/p > 1/f$ e quindi $1/q = 1/f - 1/p$ è negativo: l'immagine è virtuale. c) Serve $G = -1$, cioè $q = p$; dall'equazione $2/p = 1/f$, quindi $p = 2f = 20$ cm: è il punto (20; 20) del grafico, l'unico in cui la curva incontra la bisettrice del primo quadrante.

Controllo. I punti (15; 30) e (30; 15) sono simmetrici rispetto alla bisettrice: scambiando p e q l'equazione non cambia, perché il cammino della luce è reversibile.

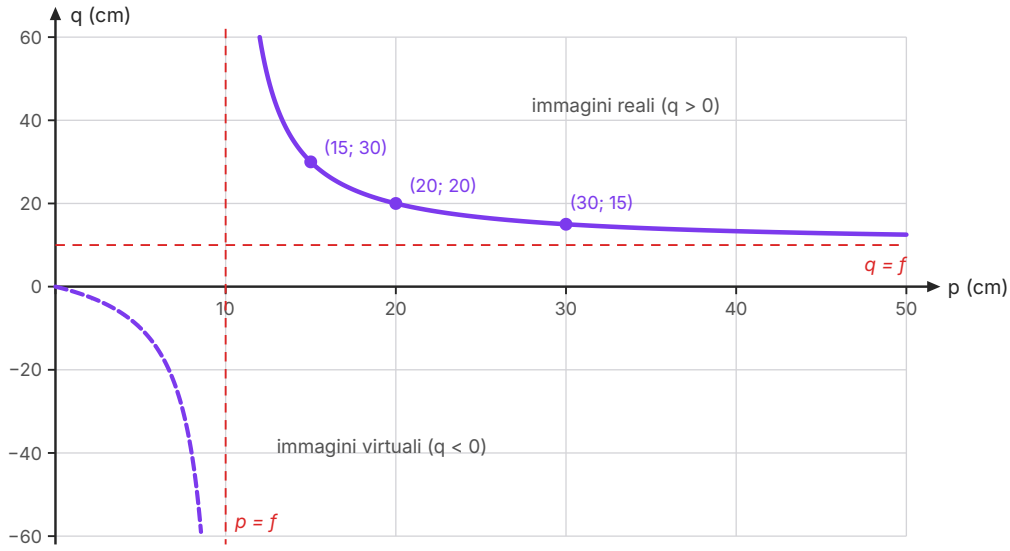


Figura 16.4 Distanza dell'immagine q in funzione della distanza dell'oggetto p per una lente convergente con $f = 10$ cm, calcolata con l'equazione delle lenti sottili. Il ramo continuo ($p > f$) corrisponde a immagini reali, quello tratteggiato ($p < f$) a immagini virtuali; le rette $p = f$ e $q = f$ sono asintoti.

16.3.2 Il potere diottrico

Una lente con distanza focale piccola devia molto i raggi: è una lente «forte». Per questo si definisce il **potere diottrico** come l'inverso della distanza focale:

$$D = \frac{1}{f} \qquad (f \text{ in metri})$$

La sua unità è la **diottria** (simbolo D, pari a 1 m^{-1}): una lente con $f = 0{,}50$ m ha un potere di +2,0 diottrie, una lente con $f = -0{,}25$ m un potere di −4,0 diottrie. Il potere diottrico ha lo stesso segno della distanza focale: positivo per le lenti convergenti, negativo per le divergenti. È la grandezza scritta sulle prescrizioni degli oculisti, e ha un vantaggio pratico: quando due lenti sottili sono a contatto, il potere del sistema è la **somma** dei poteri, $D = D_1 + D_2$. Una lente da +3,0 D a contatto con una da −1,0 D equivale a una lente da +2,0 D, cioè con $f = 0{,}50$ m.

APPROFONDIMENTO

Come si costruisce una lente: l'equazione del costruttore

La distanza focale di una lente dipende dall'indice di rifrazione n del materiale e dai raggi di curvatura delle facce. Per una lente sottile in aria vale l'**equazione del costruttore di lenti**, che non dimostriamo; per una lente biconvessa con raggi di curvatura R_1 e R_2 si scrive $1/f = (n - 1)(1/R_1 + 1/R_2)$. Una lente biconvessa simmetrica di vetro ($n = 1{,}5$) con facce di raggio 20 cm ha $1/f = 0{,}5 \times 2/(20\text{ cm})$, cioè $f = 20$ cm: la distanza focale è uguale al raggio delle facce.

L'equazione spiega due fatti. Più le facce sono curve, più la lente è forte: per questo le lenti degli occhiali per forti difetti sono spesse, a meno di usare materiali con indice più alto. E poiché n dipende un po' dal colore (la dispersione, capitolo 15), una lente semplice ha una distanza focale leggermente diversa per il rosso e per il violetto: le immagini hanno bordi colorati, un difetto chiamato **aberrazione cromatica**. Gli obiettivi di qualità lo correggono accoppiando lenti di vetri diversi.

16.4 L'occhio

16.4.1 Come è fatto l'occhio

L'occhio umano è una sfera di circa 2,4 cm di diametro (Figura 16.5). La luce entra attraverso la **cornea**, la membrana trasparente e curva sulla parte anteriore, attraversa la **pupilla**, il foro al centro dell'**iride** (la parte colorata), e poi il **cristallino**, una lente convergente elastica. Dopo aver attraversato l'umor vitreo, una sostanza gelatinosa trasparente, la luce arriva sulla **retina**, lo strato di cellule sensibili alla luce che riveste il fondo dell'occhio, e da lì i segnali raggiungono il cervello attraverso il nervo ottico.

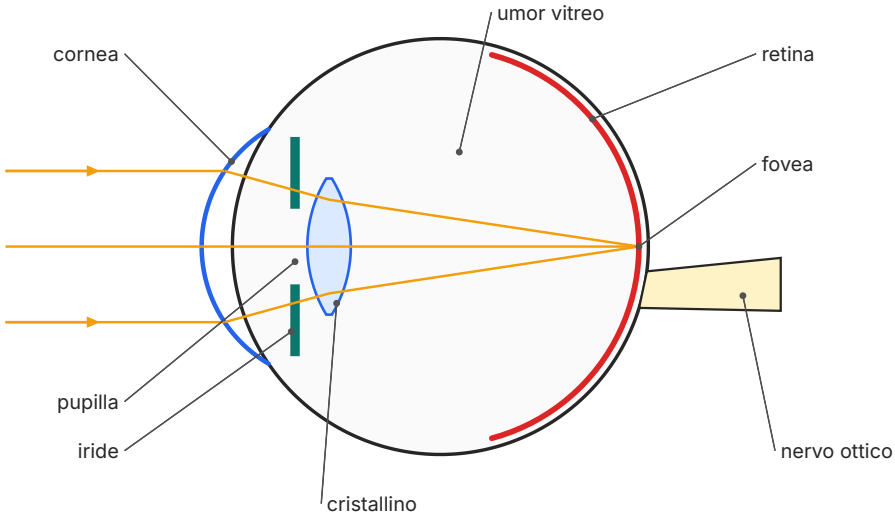


Figura 16.5 Sezione schematica dell'occhio umano, non in scala. Cornea e cristallino formano un sistema convergente che fa convergere sulla retina i raggi provenienti da un punto lontano; l'iride regola l'apertura della pupilla. La deviazione dei raggi è disegnata in modo qualitativo: la maggior parte avviene alla cornea.

Cornea e cristallino formano insieme un sistema convergente, che forma sulla retina un'**immagine reale, capovolta e rimpicciolita** degli oggetti: è la prima riga della Tabella 16.1. È il cervello a interpretare l'immagine capovolta come un mondo diritto. Il grosso della deviazione avviene alla cornea, dove la luce passa dall'aria a un tessuto con indice di rifrazione vicino a quello dell'acqua; il cristallino aggiunge una deviazione più piccola, ma **regolabile**. L'iride, intanto, funziona come il diaframma di una macchina fotografica: con poca luce la pupilla si allarga, con molta luce si restringe.

16.4.2 L'accomodamento

La distanza fra il cristallino e la retina è fissa. Se il potere dell'occhio fosse fisso, l'equazione delle lenti dice che sarebbero nitidi solo gli oggetti a una certa distanza: avvicinando l'oggetto (p più piccolo) l'immagine si formerebbe dietro la retina. L'occhio risolve il problema cambiando la distanza focale: piccoli muscoli attorno al cristallino ne modificano la curvatura, rendendolo più bombato, e quindi più convergente, per guardare da vicino. Questa capacità si chiama **accomodamento**.

Un occhio normale a riposo mette a fuoco gli oggetti lontani: il suo **punto remoto**, il punto più lontano che vede nitidamente, è all'infinito. Accomodando al massimo mette a fuoco fino al **punto prossimo**, il punto più vicino visto nitidamente. Per convenzione, per un occhio adulto normale il punto prossimo si pone a **25 cm**, la cosiddetta **distanza della visione distinta**: è la

distanza a cui di solito teniamo un libro. Nei bambini il punto prossimo è molto più vicino; con l'età il cristallino perde elasticità e il punto prossimo si allontana.

COLLEGAMENTI

L'occhio e la macchina fotografica

In biologia studierai la retina in dettaglio: contiene due tipi di fotorecettori, i **coni**, che funzionano con molta luce e distinguono i colori, e i **bastoncelli**, molto sensibili, che permettono di vedere al buio ma non distinguono i colori. I coni sono concentrati nella **fovea**, la piccola zona al centro della retina dove la visione è più nitida; dove il nervo ottico lascia l'occhio non ci sono fotorecettori, ed è il **punto cieco**.

La Tabella 16.2 confronta l'occhio con una macchina fotografica. La differenza principale è nel modo di mettere a fuoco: nella macchina fotografica la lente ha distanza focale fissa e si sposta avanti e indietro per cambiare q; nell'occhio la distanza q è fissa e cambia f.

Tabella 16.2 L'occhio e la macchina fotografica a confronto.

Funzione	Occhio	Macchina fotografica
formare l'immagine	cornea e cristallino (convergenti)	obiettivo (convergente)
regolare la luce	iride e pupilla	diaframma
raccogliere l'immagine	retina	sensore (o pellicola)
mettere a fuoco	cambia la curvatura del cristallino (varia f)	sposta l'obiettivo (varia q)

16.4.3 I difetti della vista e la loro correzione

In un occhio **miope** il sistema cornea–cristallino è troppo convergente rispetto alla lunghezza dell'occhio, di solito perché l'occhio è un po' troppo lungo: l'immagine di un oggetto lontano si forma **davanti alla retina** e sulla retina arriva sfocata (Figura 16.6, parte a). Il punto remoto non è all'infinito ma a una distanza finita: il miope vede bene da vicino e male da lontano. Per correggere la miopia si mette davanti all'occhio una **lente divergente** (Figura 16.6, parte b), che fa divergere un po' i raggi paralleli: la lente giusta forma degli oggetti lontani un'immagine virtuale nel punto remoto dell'occhio, che l'occhio vede nitida senza sforzo. Trascurando la distanza fra la lente e l'occhio, la distanza focale della lente correttiva è quindi $f = -$(distanza del punto remoto).

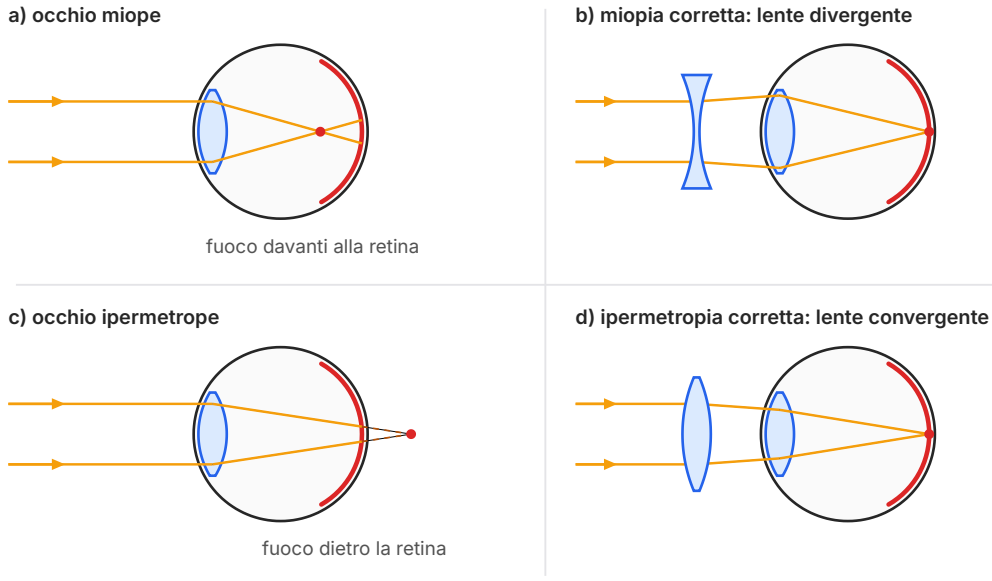


Figura 16.6 Due difetti della vista e la loro correzione (schema). a) Nell'occhio miope i raggi provenienti da un oggetto lontano convergono davanti alla retina; b) una lente divergente li fa divergere quanto basta perché convergano sulla retina. c) Nell'occhio ipermetrope a riposo i raggi convergerebbero dietro la retina (per un oggetto vicino il punto di convergenza sarebbe ancora più indietro, oltre ciò che l'accomodamento riesce a recuperare); d) una lente convergente li fa convergere sulla retina.

In un occhio **ipermetrope** succede il contrario: il sistema è poco convergente, spesso perché l'occhio è troppo corto, e l'immagine degli oggetti vicini si formerebbe **dietro la retina** (Figura 16.6, parte c). Il punto prossimo è più lontano di 25 cm, e leggere affatica. La correzione richiede una **lente convergente** (Figura 16.6, parte d), scelta in modo che un oggetto a 25 cm abbia un'immagine virtuale nel punto prossimo dell'occhio.

La **presbiopia** non è un difetto della forma dell'occhio, ma un effetto dell'età: il cristallino diventa meno elastico, l'accomodamento si riduce e il punto prossimo si allontana. Intorno ai 45 anni molte persone cominciano ad allontanare il giornale per leggerlo; la correzione usa lenti convergenti per la visione da vicino, spesso lenti «progressive» il cui potere cambia dall'alto verso il basso. L'**astigmatismo**, infine, nasce da una cornea che non ha la stessa curvatura in tutte le direzioni, come la superficie di un cucchiaio invece che di una sfera: le linee verticali e quelle orizzontali non vanno a fuoco insieme. Si corregge con lenti speciali, dette cilindriche, che hanno curvatura diversa nelle diverse direzioni.

ERRORE FREQUENTE

«Il miope ha bisogno di lenti che ingrandiscono.» Al contrario: l'occhio miope è già troppo convergente, e la lente correttiva deve ridurne la convergenza. Le lenti per miopi sono **divergenti**, con potere diottrico **negativo** (per esempio −2,5 D), e attraverso di esse gli oggetti appaiono un po' rimpiccioliti; le lenti per ipermetropi e presbiti sono convergenti, con potere positivo, e ingrandiscono un po'. Un modo per riconoscerle: guarda una scritta attraverso la lente tenendola a qualche centimetro dal foglio.

ESEMPIO SVOLTO

Gli occhiali di un miope

Problema. Giulia è miope: senza occhiali vede nitidamente solo fino a 50 cm (punto remoto) e il suo punto prossimo è a 12 cm. a) Quale lente le serve per vedere nitidi gli oggetti lontani? b) Con gli occhiali, qual è il nuovo punto prossimo? Trascura la distanza fra le lenti e gli occhi.

Ragionamento. La lente deve formare di un oggetto all'infinito ($p \to \infty$, quindi $1/p = 0$) un'immagine virtuale nel punto remoto: $q = -50$ cm $= -0{,}50$ m. Con gli occhiali, il nuovo punto prossimo è la posizione dell'oggetto la cui immagine virtuale cade a 12 cm: $q = -0{,}12$ m.

Calcolo. a) $1/f = 1/p + 1/q = 0 + 1/(-0{,}50\ \text{m}) = -2{,}0\ \text{m}^{-1}$: serve una lente divergente con $f = -0{,}50$ m, cioè di −2,0 diottrie. b) $1/p = 1/f - 1/q = -2{,}0\ \text{m}^{-1} + 1/(0{,}12\ \text{m}) = -2{,}0\ \text{m}^{-1} + 8{,}33\ \text{m}^{-1} = 6{,}33\ \text{m}^{-1}$, quindi $p \approx 0{,}16$ m.

Controllo. Con gli occhiali Giulia vede nitidi gli oggetti da 16 cm all'infinito: il segno negativo del potere conferma che la lente è divergente, come deve essere per un miope. Il punto prossimo si è allontanato un poco, da 12 a 16 cm, ma resta più vicino dei 25 cm convenzionali.

16.5 Gli strumenti ottici

16.5.1 La lente d'ingrandimento

Per vedere meglio un dettaglio lo avviciniamo agli occhi, perché un oggetto più vicino si vede sotto un angolo più grande e la sua immagine sulla retina è più grande. L'occhio però non mette a fuoco più vicino del punto prossimo: la massima grandezza apparente di un oggetto alto h, a occhio nudo, si ha a 25 cm. L'angolo sotto cui si vede un oggetto lontano dall'occhio, se è piccolo, è proporzionale al rapporto fra l'altezza dell'oggetto e la sua distanza.

La **lente d'ingrandimento** è una lente convergente con l'oggetto posto fra il fuoco e la lente: ne dà un'immagine virtuale, diritta e ingrandita, abbastanza lontana da essere vista nitidamente (Figura 16.7). Se l'oggetto è proprio nel fuoco, i raggi escono paralleli e l'occhio rilassato vede l'immagine all'infinito; l'oggetto si vede allora sotto un angolo proporzionale a h/f, invece che a $h/(25\ \text{cm})$. Il rapporto fra i due angoli è l'**ingrandimento angolare**:

$$G_a = \frac{25\ \text{cm}}{f} \qquad \text{(immagine all'infinito; } f \text{ in centimetri)}$$

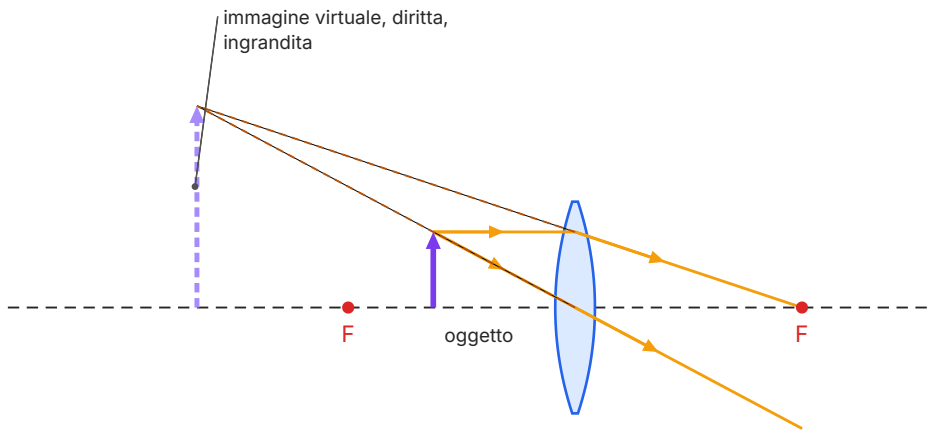


Figura 16.7 La lente d'ingrandimento: l'oggetto è fra il fuoco e la lente (f = 120, p = 75 unità del disegno). I raggi uscenti divergono e i loro prolungamenti (tratteggiati) formano, dalla parte dell'oggetto, un'immagine virtuale, diritta e ingrandita 2,7 volte, che l'occhio vede attraverso la lente.

Una lente con f = 5,0 cm, cioè di +20 D, ingrandisce 25/5,0 = 5,0 volte. Per avere ingrandimenti maggiori servono distanze focali più piccole, cioè lenti molto curve e piccole: oltre una decina di ingrandimenti una lente singola dà immagini troppo deformate, e si passa al microscopio.

16.5.2 Il microscopio composto

Il **microscopio composto** usa due sistemi di lenti convergenti. L'**obiettivo**, con distanza focale di pochi millimetri, è vicino al vetrino: l'oggetto è appena oltre il suo fuoco, e l'obiettivo ne forma all'interno del tubo un'immagine reale, capovolta e molto ingrandita (terza riga della Tabella 16.1). L'**oculare**, dalla parte dell'occhio, funziona da lente d'ingrandimento su questa immagine intermedia. L'ingrandimento totale è, con buona approssimazione, il **prodotto** dei due ingrandimenti: un obiettivo «40×» con un oculare «10×» dà un ingrandimento di 400 volte. Una cellula di 20 µm appare allora grande come un oggetto di 8 mm visto a 25 cm. L'immagine finale è capovolta, e chi usa il microscopio impara presto a spostare il vetrino nel verso opposto a quello che sembrerebbe giusto.

16.5.3 Il cannocchiale

Per osservare oggetti lontani si usa il **cannocchiale**, o telescopio a lenti. Nel **cannocchiale kepleriano**, detto anche astronomico, l'obiettivo è una lente convergente con una grande distanza

focale f_{ob}: di una stella o di un pianeta forma un'immagine reale e capovolta nel suo fuoco (Figura 16.8). L'oculare, una lente convergente con distanza focale piccola f_{oc}, è posto in modo che il suo fuoco coincida con quello dell'obiettivo: la lunghezza dello strumento è $f_{ob} + f_{oc}$, e i raggi escono paralleli, così che l'occhio osserva rilassato. L'ingrandimento angolare è

$$G_a = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

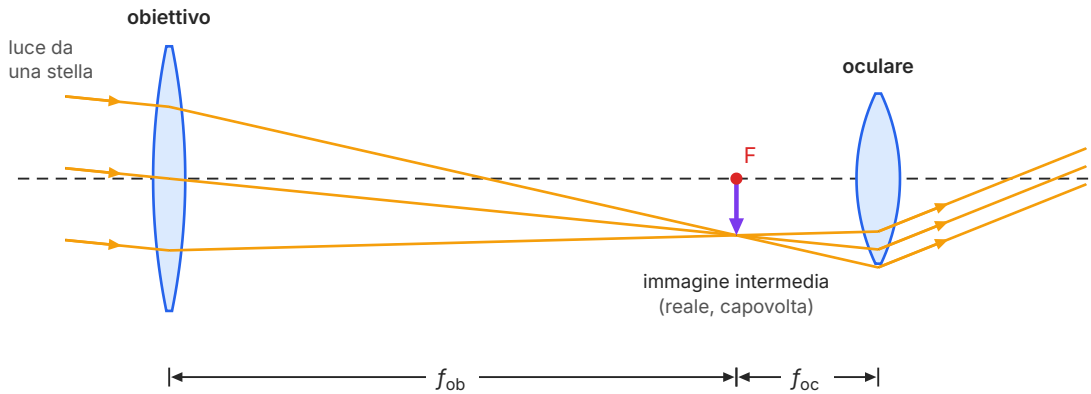


Figura 16.8 Schema del cannocchiale kepleriano. I raggi paralleli provenienti da una stella lontana, un po' inclinati sull'asse, convergono nel piano focale comune delle due lenti, dove l'obiettivo forma un'immagine reale e capovolta; l'oculare li fa uscire di nuovo paralleli, ma inclinati di un angolo maggiore. Nel disegno $f_{ob} = 4f_{oc}$: l'ingrandimento angolare è 4.

Un obiettivo con $f_{ob} = 90$ cm e un oculare con $f_{oc} = 2{,}0$ cm danno un ingrandimento di 45 in uno strumento lungo 92 cm. L'immagine è capovolta, cosa che in astronomia non dà fastidio. Per osservare oggetti sulla Terra si usa invece il **cannocchiale galileiano**, con un oculare **divergente** posto prima del fuoco dell'obiettivo, a distanza $f_{ob} - |f_{oc}|$ dall'obiettivo: l'immagine è diritta e lo strumento più corto. Il binocolo da escursione è invece formato da due cannocchiali kepleriani in cui i prismi a riflessione totale del capitolo 15 raddrizzano l'immagine e ripiegano il percorso della luce.

I grandi strumenti astronomici non usano lenti ma specchi concavi come obiettivo. Il primo **telescopio a riflessione** funzionante fu costruito da Isaac Newton, che voleva evitare l'aberrazione cromatica delle lenti: uno specchio riflette tutti i colori allo stesso modo. Uno specchio, inoltre, si può sostenere da dietro, e si possono costruire specchi di diversi metri di diametro, impossibili da realizzare come lenti.

APPROFONDIMENTO

Il cannocchiale di Galileo

Il cannocchiale non fu inventato da Galileo: comparve nei Paesi Bassi pochi anni prima, come oggetto curioso fatto con lenti da occhiali. Nel 1609 Galileo, a Padova, ne sentì parlare e ne costruì uno lui stesso, lavorando le lenti e migliorandole fino a uno strumento che ingrandiva circa venti volte: un obiettivo convergente e un oculare divergente, cioè lo schema che oggi chiamiamo galileiano.

Fra il 1609 e il 1610 Galileo lo puntò verso il cielo. Vide che la Luna ha montagne e valli, di cui stimò l'altezza dalla lunghezza delle ombre; che la Via Lattea è formata da una moltitudine di stelle invisibili a occhio nudo; e che Giove è accompagnato da quattro satelliti che gli girano intorno. Pubblicò queste scoperte nel 1610 nel *Sidereus Nuncius*, un breve libro in latino. Le lune di Giove mostravano che non tutto nel cielo gira intorno alla Terra: per Galileo furono un argomento a favore del sistema copernicano, che avrebbe difeso nel *Dialogo* del 1632.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la distanza focale di una lente convergente

Materiali. Un banco ottico con scala graduata (sensibilità 1 mm); una lente convergente su supporto; una sorgente luminosa con una figura forata, per esempio una «F» ritagliata davanti a un LED; uno schermo bianco.

Procedimento. 1) *Oggetto lontano.* Si punta la lente verso una finestra a circa 8 m e si sposta lo schermo finché l'immagine è nitida: $f_{\text{fin}} = (10{,}1 \pm 0{,}2)$ cm, dove l'incertezza è la semiampiezza dell'intervallo in cui l'immagine sembra nitida. 2) *Punti coniugati.* Si pone l'oggetto a sette distanze p dalla lente, tutte maggiori della distanza focale, e si cerca ogni volta la posizione q dello schermo con l'immagine più nitida. Si osserva anche che l'immagine è sempre capovolta, ingrandita per $p < 20$ cm e rimpicciolita per $p > 20$ cm.

Tabella 16.3 Distanze dell'oggetto e dell'immagine per una lente convergente; incertezza ±0,2 cm su p, ±0,5 cm su q (dati tipici).

p (cm)	q (cm)	$1/p$ (cm^{-1})	$1/q$ (cm^{-1})	$f = pq/(p+q)$ (cm)
14,0	36,0	0,0714	0,0278	10,1
16,0	26,3	0,0625	0,0380	9,9
18,0	22,9	0,0556	0,0437	10,1
20,0	19,6	0,0500	0,0510	9,9
25,0	16,9	0,0400	0,0592	10,1
30,0	14,8	0,0333	0,0676	9,9
40,0	13,5	0,0250	0,0741	10,1

Che cosa concludere. In un grafico con $1/p$ in ascissa e $1/q$ in ordinata i punti stanno su una retta di pendenza −1, come prevede l'equazione delle lenti scritta nella forma $1/q = -1/p + 1/f$; la retta che si accorda meglio ai dati ha pendenza −1,00 e intercetta 0,0999 cm^{-1}, da cui $f \approx 10{,}0$ cm. Dalla tabella, la media dei sette valori di f è 10,01 cm, con semidispersione 0,10 cm: $f = (10{,}0 \pm 0{,}1)$ cm. Il valore ottenuto con la finestra, $(10{,}1 \pm 0{,}2)$ cm, è compatibile: la differenza, 0,1 cm, è minore della somma delle incertezze, 0,3 cm. Come per lo specchio del capitolo 14, il metodo della finestra tende a sovrastimare f, perché la finestra non è all'infinito: con un oggetto a 8 m l'equazione dà $q = 10{,}13$ cm.

Sicurezza. Non guardare mai il Sole attraverso una lente e non lasciare una lente esposta al Sole vicino a carta o tessuti: nel fuoco la luce concentrata può bruciare la retina o incendiare un foglio. Il LED non va guardato da vicino in modo diretto.

Per la relazione. Secondo lo schema di Fisica 1, capitolo 5, riporta: la tabella di p e q con le incertezze; il grafico di $1/q$ in funzione di $1/p$ con la retta che meglio si accorda ai punti, e il valo-

re di f ricavato dall'intercetta; il valore di f con la sua incertezza ricavato dalla tabella; il potere diottrico della lente in diottrie; il confronto con f_{fin} e la discussione della compatibilità. Discuti gli errori sistematici: distanza finita della finestra, scelta del punto di massima nitidezza, spessore della lente e posizione del suo centro rispetto all'indice del supporto.

IN SINTESI

Le formule delle lenti e degli strumenti ottici

$1/p + 1/q = 1/f$ — equazione delle lenti sottili: p distanza dell'oggetto, q distanza dell'immagine dal centro ottico, f distanza focale, nella stessa unità; $f > 0$ lente convergente, $f < 0$ divergente; $q > 0$ immagine reale (dalla parte opposta), $q < 0$ immagine virtuale (dalla parte dell'oggetto).

$G = h'/h = -q/p$ — ingrandimento lineare, numero puro: $G < 0$ immagine capovolta, $G > 0$ diritta; $|G| > 1$ ingrandita.

$D = 1/f$ — potere diottrico, in diottrie ($\text{D} = \text{m}^{-1}$) con f in metri; positivo per lenti convergenti, negativo per divergenti. Lenti sottili a contatto: i poteri si sommano.

Lente correttiva di un miope: divergente, con $f = -$(distanza del punto remoto). Ipermetrope e presbite: lenti convergenti.

$G_a = 25\ \text{cm} / f$ — ingrandimento angolare della lente d'ingrandimento, con l'immagine all'infinito e il punto prossimo a 25 cm.

Microscopio: ingrandimento ≈ (ingrandimento dell'obiettivo) × (ingrandimento dell'oculare).

$G_a = f_{\text{ob}}/f_{\text{oc}}$ — ingrandimento angolare del cannocchiale kepleriano, lungo $f_{\text{ob}} + f_{\text{oc}}$; immagine capovolta.

SINTESI

- Una lente di vetro in aria è convergente se è più spessa al centro che ai bordi, divergente se è più sottile al centro. Funziona come una pila di prismi che deviano i raggi verso la loro base.
- Una lente sottile ha un centro ottico O e due fuochi, alla stessa distanza f da O, uno per parte. I raggi paralleli all'asse convergono nel fuoco (lente convergente) o divergono come se provenissero dal fuoco (lente divergente).
- Raggi principali: il raggio parallelo all'asse passa per il fuoco (o vi sembra provenire); il raggio per il centro ottico non è deviato; il raggio per il fuoco esce parallelo all'asse.
- Una lente convergente dà immagini reali e capovolte se l'oggetto è oltre il fuoco (rimpicciolite oltre 2F, ingrandite fra F e 2F), virtuali, diritte e ingrandite se l'oggetto è fra il fuoco e la lente. Una lente divergente dà sempre immagini virtuali, diritte e rimpicciolite.
- Equazione delle lenti sottili $1/p + 1/q = 1/f$ e ingrandimento $G = -q/p$, con $f > 0$ per le lenti convergenti e $q < 0$ per le immagini virtuali.
- Il potere diottrico $D = 1/f$ si misura in diottrie (m^{-1}); è positivo per le lenti convergenti, negativo per le divergenti; per lenti sottili a contatto i poteri si sommano.
- Nell'occhio cornea e cristallino formano sulla retina un'immagine reale, capovolta e rimpicciolita. L'accomodamento cambia la curvatura del cristallino; per un occhio normale il punto remoto è all'infinito e il punto prossimo, per convenzione, a 25 cm.
- La miopia (immagine davanti alla retina) si corregge con lenti divergenti, l'ipermetropia (immagine dietro la retina) e la presbiopia con lenti convergenti; l'astigmatismo con lenti cilindriche.
- La lente d'ingrandimento è una lente convergente con l'oggetto entro il fuoco; con l'immagine all'infinito ingrandisce 25 cm/f.
- Nel microscopio composto l'obiettivo forma un'immagine reale ingrandita che l'oculare ingrandisce ancora; l'ingrandimento totale è circa il prodotto dei due.
- Il cannocchiale kepleriano (due lenti convergenti, lungo $f_{ob} + f_{oc}$) ingrandisce f_{ob}/f_{oc} e capovolge l'immagine; quello galileiano ha un oculare divergente e dà immagini diritte. I grandi telescopi usano specchi concavi.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Una lente di vetro in aria, più spessa al centro che ai bordi, è:

   A. divergente

   B. convergente

   C. convergente solo se è biconvessa

   D. priva di fuochi

2. ● Un raggio che passa per il centro ottico di una lente sottile:

   A. esce parallelo all'asse

   B. passa per il fuoco dalla parte opposta

   C. prosegue senza essere deviato

   D. viene riflesso all'indietro

3. ● Una lente ha distanza focale +25 cm. Il suo potere diottrico è:

   A. +4,0 D

   B. +0,25 D

   C. +25 D

   D. −4,0 D

4. ● Una lente divergente, di un oggetto reale, dà sempre un'immagine:

   A. reale e capovolta

   B. virtuale e capovolta

   C. reale e diritta

   D. virtuale, diritta e rimpicciolita

5. ●● Un oggetto è posto a distanza $2f$ da una lente convergente. La sua immagine è:

   A. nel fuoco dalla parte opposta, puntiforme

   B. dalla stessa parte dell'oggetto, virtuale

   C. a distanza $2f$ dalla parte opposta, reale, capovolta e della stessa grandezza

   D. all'infinito: i raggi escono paralleli

6. ● In un occhio miope l'immagine di un oggetto lontano si forma:

   A. davanti alla retina

   B. dietro la retina

   C. sulla retina, ma diritta

   D. sulla cornea

7. ●● L'accomodamento dell'occhio consiste:

   A. nel cambiare il diametro della pupilla

   B. nel cambiare la curvatura del cristallino, e quindi la sua distanza focale

   C. nello spostare la retina avanti e indietro

   D. nello spostare il cristallino, come l'obiettivo di una macchina fotografica

8. ●● Un cannocchiale kepleriano ha un obiettivo con distanza focale 90 cm e un oculare con distanza focale 3,0 cm. Il suo ingrandimento angolare e la sua lunghezza sono:

   A. 270 e 87 cm

   B. 3 e 93 cm

   C. 30 e 87 cm

   D. 30 e 93 cm

9. ●●● Una lente d'ingrandimento ha un potere di +20 D. Con l'immagine all'infinito ingrandisce:
   A. 2,5 volte
   B. 20 volte
   C. 5 volte
   D. 0,8 volte

Vero o falso

10. ● Una lente divergente può formare un'immagine reale di un oggetto reale. V / F

11. ● Il potere diottrico di una lente divergente è negativo. V / F

12. ●● Se copri con un cartoncino la metà superiore di una lente convergente, sullo schermo scompare la metà corrispondente dell'immagine. V / F

13. ●● Una persona presbite vede nitidamente gli oggetti lontani ma ha difficoltà a leggere da vicino. V / F

14. ●● Nel cannocchiale kepleriano l'immagine finale è capovolta. V / F

Applicare

15. ● Calcola il potere diottrico di una lente divergente con distanza focale −50 cm. Qual è la distanza focale di una lente da +2,5 D?

16. ● Un oggetto si trova a 30 cm da una lente convergente con distanza focale 10 cm. Calcola la posizione dell'immagine e l'ingrandimento, e descrivi l'immagine.

17. ● Completa: in una lente convergente, se l'oggetto è fra il fuoco e la lente, l'immagine è _____, _____ e _____, e si trova dalla _____ parte dell'oggetto.

18. ●● Un oggetto alto 4,0 cm si trova a 30 cm da una lente divergente con distanza focale −20 cm. Calcola la posizione dell'immagine, l'ingrandimento e l'altezza dell'immagine.

19. ●● Usa il grafico della Figura 16.4. a) A che distanza dalla lente si forma l'immagine di un oggetto posto a 12 cm? E a 30 cm? b) Verifica le due letture con l'equazione delle lenti. c) Quanto vale q per $p = 5$ cm, e che cosa significa il segno?

20. ● Una lente da +3,0 D e una da −1,0 D sono poste a contatto. Calcola il potere e la distanza focale del sistema. È convergente o divergente?

21. ●● Una lente d'ingrandimento ha distanza focale 8,0 cm. Calcola il suo potere diottrico e il suo ingrandimento angolare con l'immagine all'infinito.

22. ● Un microscopio ha un obiettivo «40×» e un oculare «15×». Qual è l'ingrandimento totale? Quanto appare grande un globulo rosso di 7,5 µm, confrontato con un oggetto visto a 25 cm?

Problemi

23. ●● Una fotocamera ha un obiettivo con distanza focale 50 mm. a) Fotografi una persona alta 1,80 m a 4,0 m di distanza: a che distanza dall'obiettivo deve trovarsi il sensore, e quanto è alta l'immagine? Entra in un sensore alto 24 mm? b) Se la persona si avvicina a 1,0 m, di quanto e in che verso deve spostarsi l'obiettivo per rimettere a fuoco?

24. ●●● Luca è miope: il suo punto remoto è a 40 cm e il suo punto prossimo a 12 cm. a) Quale lente correttiva gli serve (tipo, distanza focale, potere diottrico)? b) Con gli occhiali, qual è il suo nuovo punto prossimo? Trascura la distanza fra le lenti e gli occhi.

25. ●● Il nonno di Marta è ipermetrope: il suo punto prossimo è a 1,0 m. Quale lente gli serve per leggere un libro tenuto a 25 cm dagli occhi? Indica tipo e potere diottrico.

26. ●●● Un proiettore deve formare l'immagine di una diapositiva alta 24 mm su uno schermo a 5,0 m dalla lente, alta 1,20 m. a) Quanto vale l'ingrandimento, con il suo segno? b) A che distanza dalla lente va messa la diapositiva? c) Quale distanza focale deve avere la lente? d) Perché le diapositive si inseriscono capovolte?

27. ●● Un cannocchiale kepleriano ha un obiettivo con distanza focale 1,20 m e un oculare con distanza focale 4,0 cm. a) Calcola l'ingrandimento angolare e la lunghezza dello strumento. b) Sostituendo l'oculare con una lente divergente da −4,0 cm si ottiene un cannocchiale galileiano: quanto è lungo, e com'è l'immagine?

28. ●●● Una lente convergente di diametro 8,0 cm e distanza focale 20 cm è esposta al Sole, che fornisce $1{,}0 \times 10^3$ W per ogni metro quadrato perpendicolare ai raggi. a) Quanta potenza raccoglie la lente? b) Nel fuoco si forma un'immagine del Sole: usando il raggio per il centro ottico e i triangoli simili, come nella camera oscura del capitolo 14, calcola il diametro di quest'immagine (diametro del Sole $1{,}39 \times 10^9$ m, distanza $1{,}496 \times 10^{11}$ m). c) Se tutta la potenza raccolta fosse assorbita da 1,0 g di acqua (capitolo 12), in quanto tempo la sua temperatura aumenterebbe di 10 °C?

29. ●● Una lente convergente forma su uno schermo un'immagine nitida di una candela. La distanza fra candela e schermo è 90 cm e l'immagine è alta il doppio della fiamma. Trova la distanza della candela dalla lente, quella dello schermo e la distanza focale.

Ragionare e argomentare

30. ●● Sott'acqua, senza maschera, vediamo tutto sfocato; con la maschera, che lascia uno strato d'aria davanti agli occhi, vediamo bene. Spiega perché, sapendo che la cornea ha un indice di rifrazione vicino a quello dell'acqua. A quale difetto della vista somiglia l'occhio immerso?

31. ●●● Trova l'errore. «Una lente divergente ha distanza focale 20 cm e l'oggetto è a 10 cm. Allora $1/q = 1/20 - 1/10 = -1/20$, $q = -20$ cm e $G = +2$: l'immagine è virtuale, diritta e ingrandita.» Correggi il procedimento e descrivi l'immagine corretta.

32. ● Hai un paio di occhiali e vuoi capire, senza strumenti, se le lenti sono convergenti o divergenti e quanto valgono. Progetta una prova con una finestra luminosa, un foglio bianco e un metro. Che cosa osservi nei due casi?

PER APPROFONDIRE

- [GAL] G. Galilei, *Sidereus Nuncius* (1610): il racconto delle prime osservazioni del cielo con il cannocchiale, la Luna, la Via Lattea e i satelliti di Giove.
- [NEW] I. Newton, *Opticks* (1704): le esperienze sui colori, all'origine della scelta di costruire un telescopio a specchio.
- [HEC] E. Hecht, *Optics*: i capitoli sulle lenti sottili, sull'occhio e sugli strumenti ottici, con una trattazione completa delle aberrazioni.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo sulle lenti, con molti esempi quotidiani e pochissime formule.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle immagini, con problemi su lenti, occhio, microscopio e telescopio.

Glossario del capitolo

Accomodamento
Capacità dell'occhio di cambiare la distanza focale del cristallino per mettere a fuoco oggetti vicini e lontani.

Cannocchiale
Strumento per osservare oggetti lontani, formato da un obiettivo convergente di grande distanza focale e da un oculare convergente (kepleriano) o divergente (galileiano).

Centro ottico
Punto in cui l'asse ottico attraversa una lente sottile; un raggio che vi passa non viene deviato.

Cornea
Membrana trasparente e curva sulla parte anteriore dell'occhio, dove avviene la maggior parte della rifrazione della luce.

Cristallino
Lente convergente ed elastica dell'occhio, la cui curvatura può cambiare per mettere a fuoco oggetti a distanze diverse.

Diottria
Unità di misura del potere diottrico, pari a $1\ \mathrm{m}^{-1}$: una lente con distanza focale 0,50 m ha un potere di 2 diottrie.

Equazione delle lenti sottili
Relazione $1/p + 1/q = 1/f$ fra la distanza dell'oggetto, quella dell'immagine e la distanza focale di una lente sottile.

Ingrandimento angolare
Rapporto fra l'angolo sotto cui si vede un oggetto con uno strumento ottico e quello sotto cui lo si vede a occhio nudo nelle condizioni migliori.

Ipermetropia
Difetto della vista per cui l'immagine degli oggetti vicini si forma dietro la retina; si corregge con lenti convergenti.

Lente convergente
Lente che fa convergere in un punto, il fuoco, i raggi paralleli all'asse; in aria è più spessa al centro che ai bordi e ha distanza focale positiva.

Lente d'ingrandimento
Lente convergente usata con l'oggetto fra il fuoco e la lente, che ne dà un'immagine virtuale, diritta e ingrandita.

Lente divergente
Lente che fa divergere i raggi paralleli all'asse, come se provenissero da un fuoco virtuale; in aria è più sottile al centro che ai bordi e ha distanza focale negativa.

Lente sottile
Lente il cui spessore è trascurabile rispetto alla distanza focale; ha due fuochi alla stessa distanza dal centro ottico.

Microscopio composto
Strumento formato da un obiettivo e da un oculare convergenti; l'ingrandimento totale è circa il prodotto dei due ingrandimenti.

Miopia
Difetto della vista per cui l'immagine degli oggetti lontani si forma davanti alla retina; si corregge con lenti divergenti.

Potere diottrico
Inverso della distanza focale espressa in metri, $D = 1/f$; si misura in diottrie ed è positivo per le lenti convergenti.

Presbiopia
Riduzione dell'accomodamento dovuta all'età, che allontana il punto prossimo; si corregge con lenti convergenti per vedere da vicino.

Punto prossimo
Punto più vicino che l'occhio vede nitidamente accomodando al massimo; per convenzione, 25 cm per un adulto normale.

Punto remoto
Punto più lontano che l'occhio vede nitidamente senza accomodare; per un occhio normale è all'infinito.

Retina
Strato di cellule sensibili alla luce sul fondo dell'occhio, su cui si forma l'immagine reale e capovolta degli oggetti.

Soluzioni

1. B. Una lente di vetro più spessa al centro, in aria, devia i raggi verso l'asse; anche la piano-convessa e il menisco convergente sono convergenti.

2. C. Al centro la lente equivale a una lastra sottile a facce parallele: il raggio non cambia direzione.

3. A. $D = 1/f = 1/(0{,}25\ \text{m}) = +4{,}0$ D.

4. D. È l'ultima riga della tabella che riassume le immagini delle lenti sottili.

5. C. Con $p = 2f$: $1/q = 1/f - 1/(2f) = 1/(2f)$, $q = 2f$, $G = -1$.

6. A. L'occhio miope è troppo convergente: i raggi si incontrano prima della retina.

7. B. I muscoli attorno al cristallino ne cambiano la curvatura; nella macchina fotografica, invece, si sposta l'obiettivo.

8. D. $G_a = f_{ob}/f_{oc} = 90/3{,}0 = 30$; lunghezza $f_{ob} + f_{oc} = 93$ cm.

9. C. $f = 1/D = 1/(20\ \text{m}^{-1}) = 0{,}050$ m $= 5{,}0$ cm; $G_a = 25$ cm $/ 5{,}0$ cm $= 5{,}0$.

10. F. I raggi uscenti da una lente divergente divergono sempre: per un oggetto reale l'immagine è sempre virtuale.

11. V. $D = 1/f$ e per una lente divergente $f < 0$.

12. F. Ogni punto dell'oggetto manda raggi su tutta la lente: la metà libera forma ancora l'immagine intera, solo meno luminosa.

13. V. Nella presbiopia l'accomodamento è ridotto e il punto prossimo si allontana, mentre il punto remoto resta lontano.

14. V. L'obiettivo forma un'immagine reale e capovolta che l'oculare, come una lente d'ingrandimento, non raddrizza.

15. $D = 1/f = 1/(-0{,}50\ \text{m}) = -2{,}0$ D. $f = 1/D = 1/(2{,}5\ \text{m}^{-1}) = 0{,}40$ m $= 40$ cm.

16. $1/q = 1/f - 1/p = 1/(10\ \text{cm}) - 1/(30\ \text{cm}) = 2/(30\ \text{cm})$, $q = +15$ cm. $G = -15/30 = -0{,}50$. Immagine reale (dalla parte opposta all'oggetto, a 15 cm), capovolta, rimpicciolita, alta metà dell'oggetto.

17. Virtuale, diritta, ingrandita; stessa.

18. Lente divergente: $f = -20$ cm. $1/q = -1/(20\ \text{cm}) - 1/(30\ \text{cm}) = -5/(60\ \text{cm})$, $q = -12$ cm (immagine virtuale, dalla parte dell'oggetto). $G = -(-12)/30 = +0{,}40$; $h' = 0{,}40 \times 4{,}0$ cm $= 1{,}6$ cm. Immagine virtuale, diritta, rimpicciolita.

19. a) Dal grafico: per $p = 12$ cm, $q \approx 60$ cm; per $p = 30$ cm, $q \approx 15$ cm. b) $1/q = 1/(10\ \text{cm}) - 1/(12\ \text{cm}) = 1/(60\ \text{cm})$, $q = 60$ cm; $1/q = 1/(10\ \text{cm}) - 1/(30\ \text{cm}) = 1/(15\ \text{cm})$, $q = 15$ cm. c) $1/q = 1/(10\ \text{cm}) - 1/(5\ \text{cm}) = -1/(10\ \text{cm})$, $q = -10$ cm: il segno negativo indica un'immagine virtuale, dalla stessa parte dell'oggetto (l'oggetto è entro il fuoco).

20. $D = D_1 + D_2 = +3{,}0$ D $- 1{,}0$ D $= +2{,}0$ D; $f = 1/D = 0{,}50$ m. Il potere è positivo: il sistema è convergente.

21. $D = 1/(0{,}080\ \text{m}) = 12{,}5$ D $\approx +13$ D. $G_a = 25$ cm $/ 8{,}0$ cm $\approx 3{,}1$.

22. Ingrandimento totale $\approx 40 \times 15 = 600$. Il globulo rosso appare grande come un oggetto di 7,5 µm $\times$ $600 = 4{,}5 \times 10^3$ µm $= 4{,}5$ mm visto a 25 cm.

23. a) $f = 50$ mm, $p = 4000$ mm: $1/q = 1/(50\ \text{mm}) - 1/(4000\ \text{mm})$, $q \approx 50{,}6$ mm. $G = -q/p \approx -0{,}0127$; $|h'| = 0{,}0127 \times 1800$ mm $\approx 22{,}8$ mm: l'immagine, capovolta, entra (di poco) nei 24 mm del sensore. b) Con $p = 1000$ mm: $1/q = 1/(50\ \text{mm}) - 1/(1000\ \text{mm})$, $q \approx 52{,}6$ mm. L'obiettivo va allontanato dal sensore di 52,6 mm $- 50{,}6$ mm $\approx 2{,}0$ mm.

24. a) La lente deve dare di un oggetto all'infinito un'immagine virtuale nel punto remoto: $q = -0{,}40$ m, quindi $1/f = 0 + 1/(-0{,}40\ \text{m}) = -2{,}5\ \text{m}^{-1}$. Lente divergente, $f = -40$ cm, $D = -2{,}5$ D. b) Il nuovo punto prossimo è l'oggetto la cui immagine virtuale cade a 12 cm: $1/p = 1/f - 1/q = -2{,}5\ \text{m}^{-1} + 1/(0{,}12\ \text{m}) = -2{,}5 + 8{,}33 = 5{,}83\ \text{m}^{-1}$, $p \approx 0{,}17$ m $= 17$ cm.

25. La lente deve dare del libro, a $p = 0{,}25$ m, un'immagine virtuale nel punto prossimo: $q = -1{,}0$ m. $D = 1/f = 1/p + 1/q = 4{,}0\ \text{m}^{-1} - 1{,}0\ \text{m}^{-1} = +3{,}0$ D: lente convergente, $f \approx 0{,}33$ m.

26. a) L'immagine reale è capovolta: $G = -1{,}20\ \text{m} / 0{,}024\ \text{m} = -50$. b) $q = 5{,}0$ m; da $G = -q/p$, $p = q/50 = 0{,}10$ m $= 10$ cm. c) $1/f = 1/(0{,}10\ \text{m}) + 1/(5{,}0\ \text{m}) = 10{,}2\ \text{m}^{-1}$, $f \approx 0{,}098$ m $= 9{,}8$ cm. d) L'immagine reale è capovolta rispetto alla diapositiva: inserendo la diapositiva capovolta, sullo schermo la figura appare diritta.

27. a) $G_a = 120\ \text{cm} / 4{,}0\ \text{cm} = 30$; lunghezza $120\ \text{cm} + 4{,}0\ \text{cm} = 124$ cm. b) Lunghezza $f_{ob} - |f_{oc}| = 120\ \text{cm} - 4{,}0\ \text{cm} = 116$ cm; l'ingrandimento resta 30 e l'immagine è diritta.

28. a) Area della lente $S = \pi(0{,}040\ \text{m})^2 \approx 5{,}03 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$; potenza raccolta $1{,}0 \times 10^3\ \text{W/m}^2 \times 5{,}03 \times 10^{-3}\ \text{m}^2 \approx 5{,}0$ W. b) Il Sole è così lontano che la sua immagine si forma nel fuoco, a $q \approx f = 0{,}20$ m. I raggi che passano per il centro ottico dai due bordi del Sole formano due triangoli simili: $d' = f \times 1{,}39 \times 10^9\ \text{m} / 1{,}496 \times 10^{11}\ \text{m} \approx 0{,}20\ \text{m} \times 9{,}29 \times 10^{-3} \approx 1{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m} \approx 1{,}9$ mm. c) $Q = mc\Delta T = 1{,}0 \times 10^{-3}\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 10\ \text{K} \approx 42$ J; $\Delta t = Q/P = 42\ \text{J} / 5{,}0\ \text{W} \approx 8{,}3$ s. Tutta la potenza si concentra su un dischetto di 2 mm: per questo una lente al Sole può incendiare un foglio.

29. L'immagine reale è capovolta e doppia: $G = -2$, quindi $q = 2p$. Con $p + q = 90$ cm: $3p = 90$ cm, $p = 30$ cm, $q = 60$ cm. $1/f = 1/(30\ \text{cm}) + 1/(60\ \text{cm}) = 3/(60\ \text{cm})$, $f = 20$ cm.

30. Traccia di risposta. La maggior parte della convergenza dell'occhio avviene alla cornea, perché la luce passa dall'aria ($n = 1$) a un mezzo con indice vicino a 1,33. Se davanti alla cornea c'è acqua, gli indici sono quasi uguali e alla cornea la luce quasi non si rifrange: l'occhio diventa molto meno convergente e l'immagine si forma ben dietro la retina, come in un occhio fortemente ipermetrope, che nessun accomodamento riesce a compensare. La maschera ristabilisce l'aria davanti alla cornea e quindi la sua rifrazione.

31. L'errore è nel segno di f: per una lente divergente $f = -20$ cm. Allora $1/q = -1/(20\ \text{cm}) - 1/(10\ \text{cm}) = -3/(20\ \text{cm})$, $q \approx -6{,}7$ cm; $G = -(-6{,}7)/10 \approx +0{,}67$. L'immagine è virtuale, a 6,7 cm dalla lente dalla parte dell'oggetto, diritta e rimpicciolita, come accade sempre con una lente divergente: un'immagine ingrandita avrebbe dovuto insospettire.

32. Traccia di risposta. Si tiene la lente fra la finestra e il foglio, parallela al foglio, e la si allontana lentamente. Se la lente è convergente, a una certa distanza sul foglio compare un'immagine nitida, piccola e capovolta della finestra: la distanza fra lente e foglio è circa la distanza focale (un po' di più, perché la finestra non è all'infinito), e da essa si ricava il potere in diottrie. Se la lente è divergente non si forma alcuna immagine: sul foglio c'è solo una macchia più scura e allargata. Un'altra prova: guardando una scritta attraverso la lente a qualche centimetro dal foglio, una lente convergente la ingrandisce, una divergente la rimpicciolisce. Per stimare f di una lente divergente si può accostarla a una lente convergente nota più forte e misurare la distanza focale della coppia, usando la somma dei poteri.