CAPITOLO

14

La luce e la riflessione

«Veramente non l'ho sperimentata salvo che in lontananza piccola [...]; mà ben, se non instantanea, velocissima.» Galileo Galilei, Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, Giornata prima (1638)

OBIETTIVI

1. Confrontare le teorie antiche della visione con quella di Ibn al-Haytham e usare il modello dei raggi dell'ottica geometrica.
2. Spiegare con la propagazione rettilinea le ombre, le penombre, le eclissi e la camera oscura, e calcolare la grandezza di un'immagine con i triangoli simili.
3. Ricostruire come si è passati dalla luce «istantanea» alla misura della sua velocità, e usare c e l'anno-luce.
4. Applicare la legge della riflessione, dimostrare il principio del cammino minimo di Erone e descrivere l'immagine di uno specchio piano.
5. Costruire le immagini degli specchi sferici con i raggi principali e calcolarle con l'equazione dei punti coniugati e l'ingrandimento, rispettando la convenzione dei segni.

INDICE DEL CAPITOLO

14.1 Che cos'è la luce 2
14.2 La propagazione rettilinea 3
14.3 La velocità della luce 6
14.4 La riflessione e lo specchio piano 8
14.5 Gli specchi sferici 12

Fisica 4 · Parte VI · La luce · versione 1.0
Capitolo 14: La luce e la riflessione · pagine 387–412 del volume completo · estratto per lo studio

Entra in una stanza buia in una giornata di sole, con le imposte chiuse e un solo forellino in una persiana. Sulla parete di fronte compare, a poco a poco, un quadro tenue e capovolto della strada: le case con il tetto in basso, le automobili che scorrono, le chiome degli alberi mosse dal vento. Nessuna lente, nessuno schermo: solo un buco e la luce. Il fenomeno era noto già nell'antichità, e per capirlo basta un'idea semplicissima, che è il punto di partenza di questo capitolo: la luce viaggia in linea retta.

Con la luce si apre l'ultima parte del volume. Il suono del capitolo precedente ha bisogno di un mezzo; la luce del Sole invece ci raggiunge attraverso lo spazio vuoto, e la sua natura sarà l'argomento del capitolo 16. Qui useremo il modello più semplice, quello dei raggi, per capire le ombre e le eclissi, la velocità della luce, la riflessione e gli specchi. È una delle scienze più antiche: i Greci la studiavano con la geometria di Euclide, la stessa che userai tu.

14.1 Che cos'è la luce

14.1.1 Dall'occhio all'oggetto, o dall'oggetto all'occhio?

Che cosa accade quando vediamo? La domanda divise i filosofi greci. Secondo la teoria dell'**estromissione**, esposta nell'*Ottica* di Euclide, il geometra degli *Elementi*, «raggi visivi» escono dall'occhio in linea retta, formando un cono con il vertice nell'occhio, e si vede ciò che essi raggiungono. Gli atomisti sostenevano invece l'**intromissione**: dai corpi si staccano sottilissime pellicole di atomi che ne conservano la forma e, entrando nell'occhio, producono la visione; Lucrezio le chiama *simulacra* nel IV libro del *De rerum natura*.

La questione fu risolta nell'XI secolo da Ibn al-Haytham, noto in Occidente come Alhazen. Nel suo *Libro dell'ottica*, tradotto in latino e studiato in Europa per secoli, mostrò con esperimenti e argomenti geometrici che vediamo perché la luce, partita da una sorgente e rinviata dagli oggetti, entra nell'occhio da ogni punto di ciò che guardiamo. È l'idea moderna.

Oggi distinguiamo le **sorgenti luminose**, che emettono luce propria (il Sole, una fiamma, lo schermo di un telefono), dai corpi *illuminati*, che rinviano in tutte le direzioni una parte della luce che ricevono: la Luna, questa pagina, il tuo viso. Un corpo che la luce attraversa è un **mezzo trasparente** (l'aria, l'acqua, il vetro); uno che la lascia passare sparpagliandola, come il vetro smerigliato, è *traslucido*; uno che non la lascia passare è un **corpo opaco**.

14.1.2 Il modello dei raggi

Nei mezzi trasparenti e omogenei la luce si propaga in linea retta: lo mostrano i fasci di sole che filtrano tra le nuvole o attraversano una stanza polverosa, dove polvere e goccioline ne rivelano il cammino. Chiamiamo **raggio luminoso** una linea orientata che indica la direzione in cui la

luce si propaga. Non è un oggetto fisico, ma un modello, come il punto materiale della meccanica; il fascio sottile di un puntatore laser gli somiglia molto.

La parte dell'ottica che usa il modello dei raggi e la geometria si chiama **ottica geometrica**. Funziona finché gli oggetti e le aperture che la luce incontra sono molto più grandi di una grandezza caratteristica della luce, minore di un millesimo di millimetro, che conoscerai nel capitolo 16: per gli specchi, le finestre e le ombre di questo capitolo è sempre così.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Ottica viene dal greco ὀπτικός, «che riguarda la vista»: per i Greci era la scienza del vedere, prima ancora che della luce. La stessa radice è nell'*ottico* che vende occhiali e nella *sinottica*, la tabella che fa vedere tutto «insieme».

Eclissi (o eclisse) viene dal greco ἔκλειψις, «abbandono, venir meno», dal verbo ἐκλείπω, «lasciare, venire a mancare»: nell'eclissi la luce del Sole o della Luna sembra venire meno.

Riflessione viene dal latino *reflectere*, «piegare indietro»: la luce che incontra uno specchio è rimandata indietro. La parentela con la riflessione del pensiero è una metafora antica, quella della mente che si volge su se stessa.

Specchio viene dal latino *speculum*, dal verbo *specere*, «guardare» (da cui anche *spettacolo* e *speculare*). Il greco diceva κάτοπτρον, e la scienza degli specchi si chiama ancora *catottrica*.

14.2 La propagazione rettilinea

14.2.1 Ombre e penombre

La propagazione rettilinea della luce spiega le ombre. Un corpo opaco illuminato da una sorgente quasi puntiforme getta su uno schermo un'ombra dai contorni netti: l'**ombra** è la zona che nessun raggio della sorgente può raggiungere, e il suo bordo si trova con le rette che partono dalla sorgente e sfiorano il contorno del corpo.

Se la sorgente è estesa, come una lampada con il paralume o il Sole, intorno all'ombra compare una fascia sfumata, la **penombra**, che riceve luce soltanto da una parte della sorgente (Figura 14.1a). L'ombra è delimitata dalle rette che uniscono i bordi della sorgente e del corpo dalla stessa parte; la penombra da quelle che si incrociano tra la sorgente e il corpo.

14.2.2 Le eclissi

Le **eclissi** sono ombre su scala astronomica. Nell'*eclissi di Sole* la Luna, passando tra il Sole e la Terra, proietta su di essa la sua ombra (Figura 14.1b): chi si trova nella zona d'ombra, larga al massimo qualche centinaio di kilometri, vede il Sole scomparire; chi è nella penombra lo vede coperto solo in parte. Nell'*eclissi di Luna* è la Terra a trovarsi tra il Sole e la Luna piena, che entra

nel cono d'ombra terrestre: nel capitolo 3 hai visto come Aristotele usasse la forma circolare di quell'ombra per provare che la Terra è sferica.

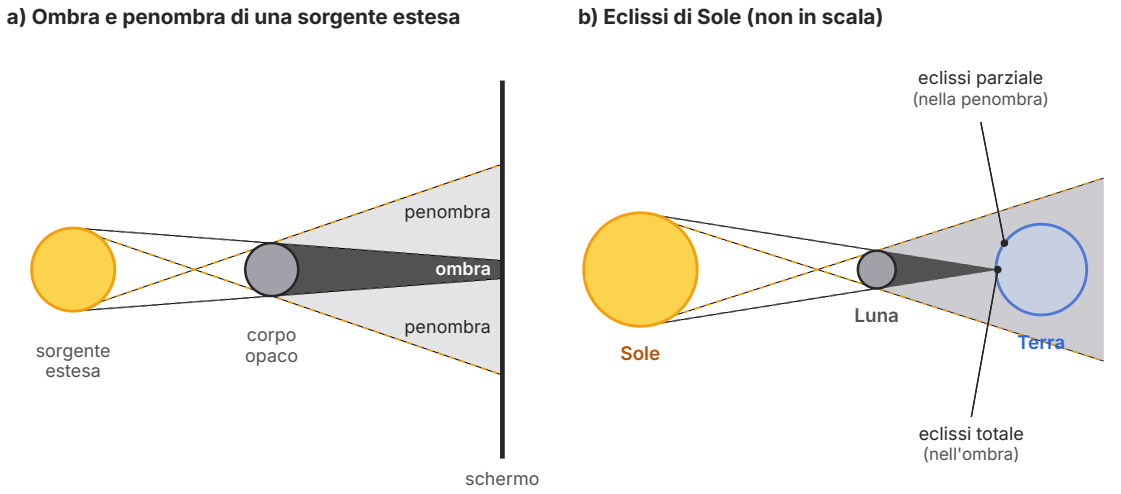


Figura 14.1 a) Una sorgente estesa e un corpo opaco: le rette che uniscono i bordi della sorgente e del corpo dalla stessa parte delimitano l'ombra, che non riceve luce da nessun punto della sorgente; quelle che si incrociano delimitano la penombra, che ne riceve solo da una parte. b) Nell'eclissi di Sole il cono d'ombra della Luna raggiunge appena la superficie terrestre: dove arriva l'ombra l'eclissi è totale, nella penombra è parziale. Le dimensioni e le distanze non sono in scala.

Le eclissi totali di Sole dipendono da una coincidenza. Il Sole ha un diametro circa 400 volte quello della Luna (Tabella A.2) ed è circa 390 volte più lontano: per i triangoli simili i due dischi appaiono quasi della stessa grandezza, e la Luna riesce, di poco, a coprire il Sole. Quando la Luna è più lontana del solito il suo disco lascia scoperto un anello di Sole: è l'eclissi *anulare*.

14.2.3 La camera oscura

Torniamo alla stanza buia dell'inizio. Una **camera oscura** è una scatola chiusa con un piccolo foro su una parete: la luce che parte da ogni punto di un oggetto attraversa il foro in linea retta e raggiunge la parete opposta in un solo punto. I raggi che partono dalla cima dell'oggetto arrivano in basso, quelli dalla base in alto: l'immagine è *capovolta* (Figura 14.2).

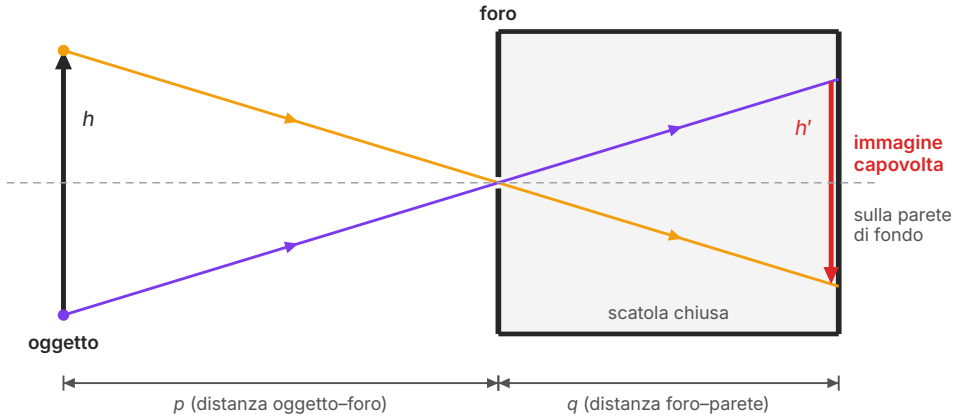


Figura 14.2 La camera oscura. I raggi che partono dalla cima e dalla base dell'oggetto si incrociano nel foro: l'immagine sulla parete di fondo è capovolta. I due triangoli che hanno il vertice nel foro sono simili, e quindi $h'/h = q/p$.

I due triangoli con il vertice nel foro, che hanno per base l'oggetto e l'immagine, sono simili: hanno gli angoli al vertice opposti, quindi uguali, e le basi parallele. Se h è l'altezza dell'oggetto, h' quella dell'immagine, p la distanza dell'oggetto dal foro e q quella della parete:

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

L'immagine è tanto più grande quanto più la parete è lontana e l'oggetto vicino. Un foro più largo dà un'immagine più luminosa ma meno nitida, perché da ogni punto dell'oggetto passa un pennellino di raggi, che illumina una macchiolina invece di un punto. Lo sperimenti ogni estate: all'ombra di un albero le chiazze di luce sul terreno sono rotonde, qualunque sia la forma dei varchi tra le foglie, perché ogni varco funziona da foro e disegna l'immagine del disco solare. Durante un'eclissi parziale diventano piccole falci, come notava già un'opera antica attribuita ad Aristotele, i *Problemi*.

ESEMPIO SVOLTO

Misurare il Sole con un foro

Problema. In una stanza buia la luce del Sole entra da un foro di pochi millimetri praticato in un cartoncino nero e illumina uno schermo bianco, perpendicolare ai raggi, posto a 2,00 m dal foro. Sullo schermo l'immagine del disco solare ha un diametro di 1,86 cm. Sapendo che il Sole dista $1{,}496 \times 10^{11}$ m (1 UA), quanto vale il suo diametro?

Il modello. Il foro è il vertice comune di due triangoli simili: uno ha per base il diametro D del Sole e altezza la distanza Terra–Sole $p = 1{,}496 \times 10^{11}$ m, l'altro ha per base il diametro dell'immagine $d = 1{,}86 \times 10^{-2}$ m e altezza $q = 2{,}00$ m.

Calcolo. Dalla proporzione $D/d = p/q$:

$$D = d \cdot \frac{p}{q} = 1{,}86 \times 10^{-2}\ \text{m} \cdot \frac{1{,}496 \times 10^{11}\ \text{m}}{2{,}00\ \text{m}} \approx 1{,}39 \times 10^{9}\ \text{m}$$

Controllo. Il risultato è circa 109 volte il diametro della Terra ($1{,}27 \times 10^{7}$ m) e concorda con il valore della Tabella A.2 ($2 \cdot 6{,}96 \times 10^{8}$ m $= 1{,}39 \times 10^{9}$ m). Nota il rapporto $d/q \approx 1/108$: il disco del Sole appare sotto lo stesso angolo di una moneta di 1 cm vista da poco più di un metro.

Attenzione. Per questa misura il Sole non va mai guardato direttamente, nemmeno attraverso il foro: si osserva soltanto la sua immagine sullo schermo.

COLLEGAMENTI

Storia dell'arte · La camera oscura e i pittori

Leonardo da Vinci descrive nei suoi manoscritti l'immagine capovolta che si forma in una stanza buia attraverso un piccolo foro, e la paragona a ciò che accade nell'occhio. Nel Cinquecento il napoletano Giovan Battista Della Porta, nella *Magia naturalis*, ne suggerisce l'uso ai pittori: con una lente al posto del foro l'immagine diventa più luminosa e nitida, e la camera oscura diventa uno strumento per ricalcarne i contorni.

Al Museo Correr di Venezia è conservata una camera ottica portatile attribuita al Canaletto; se e come l'abbiano usata altri pittori, come l'olandese Vermeer, è invece discusso tra gli storici dell'arte. Dalla camera oscura discende la macchina fotografica, che studierai nel prossimo capitolo.

14.3 La velocità della luce

14.3.1 Istantanea o velocissima?

Per Aristotele e per molti dopo di lui la luce non viaggiava: si diffondeva istantaneamente. Galileo non ne era convinto. Nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*

(1638) l'aristotelico Simplicio porta l'esempio dell'artiglieria: il lampo di un cannone lontano si vede subito, il colpo si sente dopo. Sagredo obietta che così si prova solo che il suono è più lento della luce. Salviati, il portavoce di Galileo, propone allora un esperimento: due persone con una lanterna ciascuna, che si possa coprire e scoprire con la mano, si esercitano da vicino a scoprire la propria appena vedono quella dell'altra; poi si allontanano di qualche miglio. Se la luce impiega tempo a viaggiare, la risposta dovrebbe arrivare in ritardo.

Salviati conclude: «Veramente non l'ho sperimentata salvo che in lontananza piccola, cioè manco d'un miglio, dal che non hò potuto assicurarmi se veramente la comparsa del lume opposto sia instantanea; mà ben, se non instantanea, velocissima» (*Discorsi*, Giornata prima, edizione di Leida del 1638). L'esperimento non poteva riuscire: su un miglio, andata e ritorno, la luce impiega un centomillesimo di secondo, molto meno del tempo di reazione umano. Ma l'idea di misurare un tempo di volo era giusta.

14.3.2 Rømer, le lune di Giove e Fizeau

La prima prova venne dal cielo. Nel 1676 il danese Ole Rømer, all'Osservatorio di Parigi, studiava le eclissi di Io, il satellite di Giove che ogni 42,5 ore circa entra nell'ombra del pianeta. Quando la Terra, nel suo moto intorno al Sole, si allontanava da Giove, le eclissi si presentavano sempre più in ritardo rispetto alle previsioni; quando si avvicinava, in anticipo. Rømer interpretò il ritardo come il tempo che la luce impiega a percorrere la distanza in più. Il valore numerico che ne dedusse è discusso dagli storici; conta il metodo: un ritardo misurato e una distanza nota danno una velocità. Con i valori di oggi la luce impiega circa 1000 s ad attraversare l'orbita della Terra.

La prima misura sulla Terra si deve al francese Hippolyte Fizeau, nel 1849. Un fascio di luce passava tra due denti di una ruota dentata, raggiungeva uno specchio lontano più di 8 km e tornava attraverso la ruota. Facendola girare sempre più in fretta, a una certa velocità la luce di ritorno trovava il dente successivo, e spariva. Dal tempo di rotazione e dalla lunghezza del percorso Fizeau ottenne poco più di 3×10^8 m/s, entro pochi per cento dal valore di oggi (ne farai il conto negli esercizi).

14.3.3 Il valore di oggi

Misure sempre più precise hanno dato per la velocità della luce nel vuoto il valore

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

che è *esatto*, perché è il metro a essere definito a partire da c. Nell'aria la luce è più lenta solo di tre parti su diecimila, e negli esercizi useremo anche lì $3{,}00 \times 10^8$ m/s; nell'acqua e nel vetro è più lenta in modo apprezzabile, e questo, come vedrai nel prossimo capitolo, causa la rifrazione.

Le distanze astronomiche si misurano comodamente con il tempo che la luce impiega a percorrerle: dalla Luna 1,3 s, dal Sole circa 500 s, poco più di otto minuti. L'anno-luce (a.l.), che hai

incontrato nel capitolo 3, è la distanza che la luce percorre nel vuoto in un anno:

$$1\ \text{a.l.} = c \cdot (1\ \text{anno}) = 2{,}998 \times 10^{8}\ \text{m/s} \cdot 3{,}156 \times 10^{7}\ \text{s} \approx 9{,}46 \times 10^{15}\ \text{m}$$

È un'unità di *lunghezza*, non di tempo. La stella più vicina dopo il Sole, Proxima Centauri, dista circa 4,2 anni-luce (capitolo 3): guardare lontano nello spazio è guardare indietro nel tempo.

DA RICORDARE

Dal volume del terzo anno: la luce e il metro

Nel Sistema Internazionale il metro è definito come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in 1/299 792 458 di secondo (Fisica 3, capitolo 2). Per questo la velocità della luce nel vuoto non si «misura» più: vale per definizione 299 792 458 m/s esatti, e le misure di precisione servono ormai a realizzare il metro.

14.4 La riflessione e lo specchio piano

14.4.1 La legge della riflessione

Quando la luce incontra la superficie di separazione tra due mezzi, una parte torna nel mezzo da cui proveniva: è la riflessione, che conosci già per le onde (capitolo 12). Su una superficie liscia e lucida segue una legge precisa. Il raggio che arriva, detto raggio *incidente*, colpisce la superficie nel punto O; la retta perpendicolare alla superficie in O è la **normale**. L'**angolo di incidenza** θ_i è l'angolo tra il raggio incidente e la normale, l'**angolo di riflessione** θ_r quello tra la normale e il raggio *riflesso* (Figura 14.3a). La **legge della riflessione** dice che:

1. il raggio incidente, la normale e il raggio riflesso giacciono nello stesso piano;
2. l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza: $\theta_r = \theta_i$.

Gli angoli si misurano dalla *normale*, non dalla superficie: un raggio perpendicolare allo specchio ha $\theta_i = 0°$ e torna su se stesso. Verificherai la legge con un puntatore laser nel laboratorio di fine capitolo.

14.4.2 Riflessione speculare e diffusa

Su una superficie liscia un fascio di raggi paralleli resta parallelo dopo la riflessione: è la **riflessione speculare**, che dà le immagini. Una superficie ruvida, come la carta o un muro, è fatta di piccole facce orientate a caso: su ciascuna la legge vale, ma i raggi riflessi partono in tutte le direzioni (Figura 14.3b e c). È la **riflessione diffusa**, ed è grazie a essa che vediamo gli oggetti illuminati da qualunque punto della stanza.

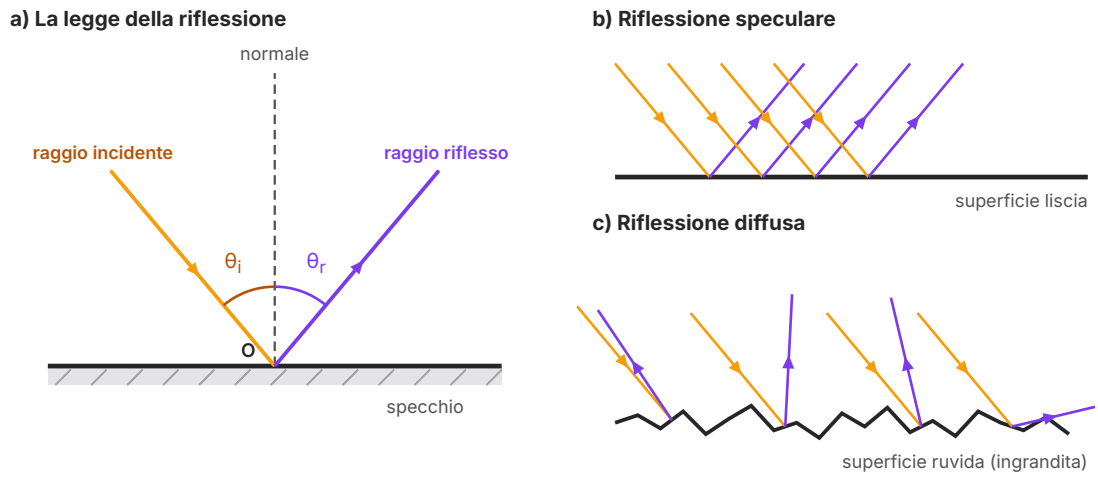


Figura 14.3 a) La legge della riflessione: il raggio incidente, la normale nel punto O e il raggio riflesso sono nello stesso piano, e l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza (qui 40°). b) Su una superficie liscia un fascio di raggi paralleli resta parallelo dopo la riflessione. c) Su una superficie ruvida ogni raggio obbedisce alla legge della riflessione, ma le normali hanno direzioni diverse, e i raggi riflessi si sparpagliano.

14.4.3 Il cammino più breve

Erone di Alessandria, nel I secolo d.C., scoprì nella legge della riflessione una proprietà sorprendente. Nella *Catottrica*, giunta a noi in una traduzione latina medievale, dimostrò che *fra tutti i cammini che vanno da un punto A a un punto B toccando lo specchio, la luce segue il più breve*: è il **principio del cammino minimo**. La dimostrazione usa soltanto la geometria che conosci (Figura 14.4).

Sia A′ il simmetrico di A rispetto allo specchio. Per qualunque punto Q dello specchio AQ = A′Q, perché lo specchio è l'asse del segmento AA′; il cammino A–Q–B è quindi lungo quanto la spezzata A′–Q–B. La più corta di queste spezzate è quella rettilinea, A′–P–B, con P sul segmento A′B: in un triangolo un lato è minore della somma degli altri due. In P gli angoli che AP e PB formano con lo specchio sono uguali (quello di AP è uguale a quello di A′P per simmetria, e questo è opposto al vertice a quello di PB), e quindi sono uguali anche gli angoli con la normale: il cammino più breve è proprio quello della legge della riflessione.

Nel Seicento Pierre de Fermat generalizzò l'idea: la luce segue il cammino che richiede il *tempo* minimo. Nella riflessione, nello stesso mezzo, tempo minimo e cammino minimo coincidono; nel prossimo capitolo vedrai che il principio di Fermat spiega anche la rifrazione.

14.4.4 L'immagine in uno specchio piano

Uno **specchio piano** è una superficie piana che riflette in modo speculare. I raggi che partono dalla cima di un oggetto, dopo la riflessione, arrivano all'occhio divergendo come se provenis-

sero da un punto *dietro* lo specchio (Figura 14.5a); l'occhio, abituato alla propagazione rettilinea, prolunga i raggi all'indietro e «vede» lì la cima dell'oggetto. Per la legge della riflessione quel punto, l'immagine, è il simmetrico dell'oggetto rispetto al piano dello specchio.

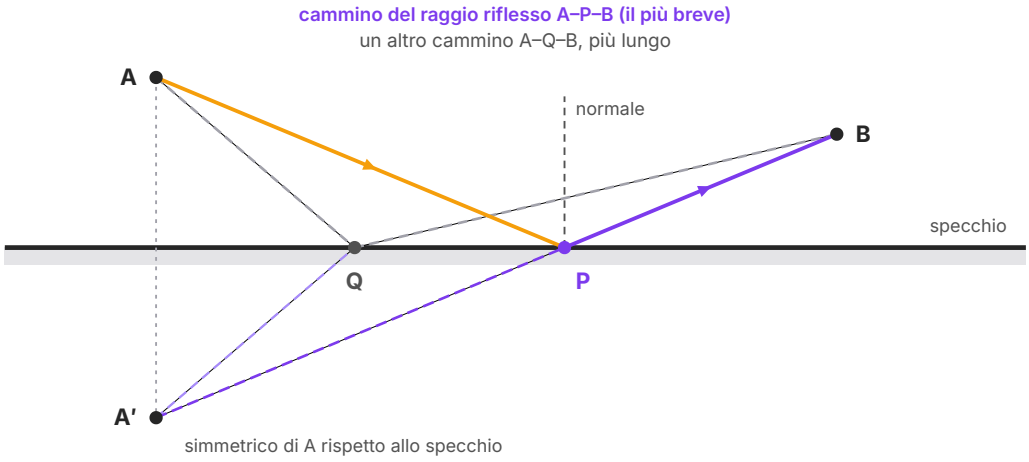


Figura 14.4 Il principio del cammino minimo di Erone. A′ è il simmetrico di A rispetto allo specchio, e per ogni punto Q dello specchio AQ = A′Q. Il cammino A–Q–B è lungo quanto la spezzata A′–Q–B, che è più lunga del segmento A′B: il cammino più breve passa per il punto P allineato con A′ e B, ed è quello in cui l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.

Dietro lo specchio però la luce non arriva: lì si incontrano solo i *prolungamenti* dei raggi. Un'immagine così è un'**immagine virtuale**, e non si può raccogliere su uno schermo. Un'**immagine reale**, come quella della camera oscura, si forma dove i raggi si incontrano davvero, e su uno schermo si vede. L'immagine di uno specchio piano è virtuale, diritta, grande quanto l'oggetto e alla stessa distanza dallo specchio.

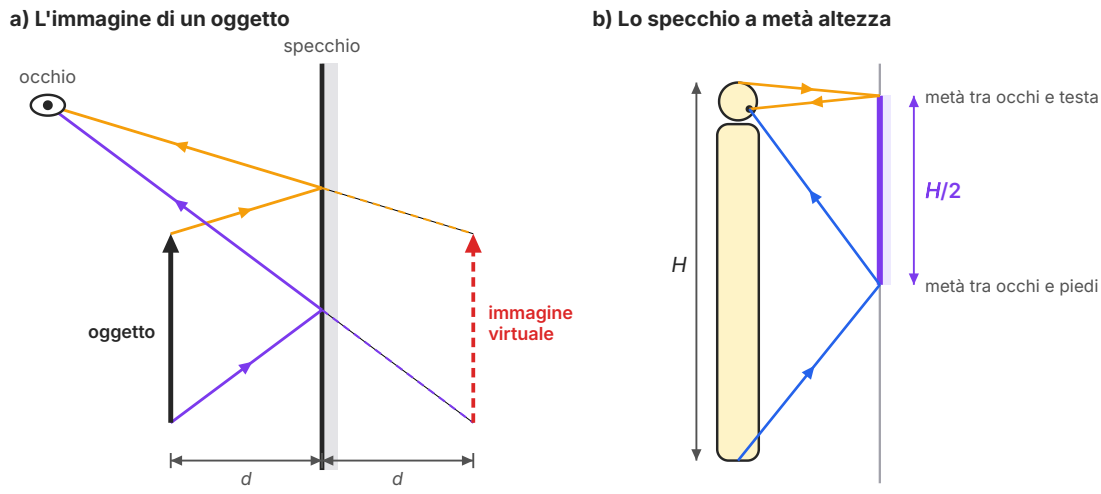


Figura 14.5 a) I raggi che partono dalla cima e dalla base dell'oggetto arrivano all'occhio dopo la riflessione come se provenissero da punti dietro lo specchio (prolungamenti tratteggiati): l'immagine è virtuale, diritta, grande quanto l'oggetto e alla stessa distanza *d* dallo specchio. b) Per vedersi per intero basta uno specchio alto metà della propria statura: i raggi che dalla testa e dai piedi arrivano agli occhi si riflettono in punti che stanno a metà altezza tra gli occhi e la testa e tra gli occhi e i piedi.

ERRORE FREQUENTE

Lo specchio scambia la destra con la sinistra?

Alza la mano destra davanti a uno specchio: la tua immagine alza la mano che sta dalla stessa parte, ma che, se fosse una persona di fronte a te, chiameresti sinistra. Lo specchio, però, non scambia la destra con la sinistra, né l'alto con il basso: la testa resta in alto e la mano destra resta dalla parte della tua mano destra. Scambia il *davanti* con il *dietro*, cioè le distanze lungo la perpendicolare allo specchio: il tuo naso, che è più vicino allo specchio della nuca, nell'immagine è più vicino della nuca. L'impressione dello scambio destra–sinistra nasce perché, per confrontarci con l'immagine, immaginiamo di girarci su noi stessi, come una persona vera che ci guarda.

Per lo stesso motivo la scritta AMBULANZA è stampata a rovescio sul cofano dei mezzi di soccorso: nello specchietto retrovisore di chi precede, che inverte il davanti e il dietro, si legge diritta.

Quanto deve essere alto uno specchio per vederci per intero? I raggi che vanno dalla testa e dai piedi agli occhi si riflettono in due punti (Figura 14.5b): per la legge della riflessione il triangolo che ha i vertici nella testa, negli occhi e nel primo punto di riflessione è isoscele, e la normale orizzontale in quel punto ne è l'altezza; così il primo punto sta a metà altezza tra la cima della

testa e gli occhi, il secondo a metà tra gli occhi e i piedi. La loro distanza è la metà della statura H, *qualunque sia la distanza dallo specchio*: allontanarsi non serve.

Due specchi piani ad angolo retto danno tre immagini: una per specchio e una, nell'angolo, formata da raggi riflessi da entrambi. In questa lo scambio davanti–dietro avviene due volte, e ti vedi come ti vedono gli altri: se alzi la mano destra, l'immagine alza quella che sta dalla parte della tua sinistra, come una persona di fronte a te che alza la sua destra. Su specchi inclinati si basano il caleidoscopio e il periscopio.

COLLEGAMENTI

Italiano · L'esperimento dei tre specchi di Beatrice

Nel capitolo 3 hai visto Dante salire nel *Paradiso* attraverso i cieli tolemaici. Nel canto II, giunto nel cielo della Luna, chiede a Beatrice che cosa siano le macchie lunari; lui le attribuisce a parti più rade e più dense del corpo lunare, e Beatrice, per confutarlo, propone un esperimento con tre specchi: due posti alla stessa distanza dall'osservatore, il terzo più lontano, in mezzo a loro, e un lume alle spalle, «che i tre specchi accenda / e torni a te da tutti ripercosso» (*Par.* II 101–102). È un esperimento di ottica in versi.

Nella lingua di Dante «ripercosso» vale «riflesso», e lo stesso significato ha, al verso 93, «refratto»: la distinzione moderna tra riflessione e rifrazione (capitolo 15) non era ancora fissata. Che cosa preveda Beatrice, e se abbia ragione, lo discuterai negli esercizi.

14.5 Gli specchi sferici

14.5.1 Concavi e convessi

Uno **specchio sferico** è una calotta sferica che riflette in modo speculare: è concavo se riflette dalla parte interna, che guarda verso il centro della sfera, come l'interno di un cucchiaio o lo specchio per il trucco; convesso se riflette dalla parte esterna, come il dorso del cucchiaio. I suoi elementi sono (Figura 14.6):

- il **centro di curvatura** C, centro della sfera, e il *raggio di curvatura* R;
- il vertice V, il centro della calotta;
- l'asse ottico, la retta che passa per C e V.

In ogni punto la normale è il raggio della sfera, la retta che unisce quel punto a C: un raggio diretto verso C incide perpendicolarmente e torna su se stesso.

14.5.2 Il fuoco

Su uno specchio concavo mandiamo un fascio di raggi paralleli all'asse ottico, come quelli che arrivano dal Sole. I raggi vicini all'asse, detti **raggi parassiali**, dopo la riflessione passano tutti

per uno stesso punto dell'asse, il **fuoco** F (Figura 14.6a). La sua distanza dal vertice è la **distanza focale***f*, e vale la metà del raggio di curvatura:

$$f = \frac{R}{2}$$

La dimostrazione è un piccolo gioiello di geometria. Un raggio parallelo all'asse colpisce lo specchio in P, dove la normale è PC. L'angolo di incidenza, tra il raggio e PC, è uguale all'angolo che PC forma con l'asse, perché sono alterni interni tra due parallele. Il raggio riflesso forma con PC lo stesso angolo e taglia l'asse in F: il triangolo CFP ha due angoli uguali, ed è isoscele, con FC = FP. Se P è vicino al vertice, FP è quasi uguale a FV, e F cade a metà tra C e V.

Il ragionamento mostra anche il limite della regola: per un raggio lontano dall'asse FP è sensibilmente più lungo di FV, e il raggio riflesso taglia l'asse più vicino allo specchio. I raggi di un fascio largo non si riuniscono in un punto, e l'immagine è sfocata: è l'**aberrazione sferica** (Figura 14.6a). La elimina uno specchio a forma di paraboloide: la parabola, come hai visto in *Matematica 3*, riflette nel suo fuoco tutti i raggi paralleli al suo asse. Sono parabolici gli specchi di molti telescopi, le antenne satellitari e i fari tradizionali delle auto, dove una lampadina nel fuoco produce un fascio parallelo.

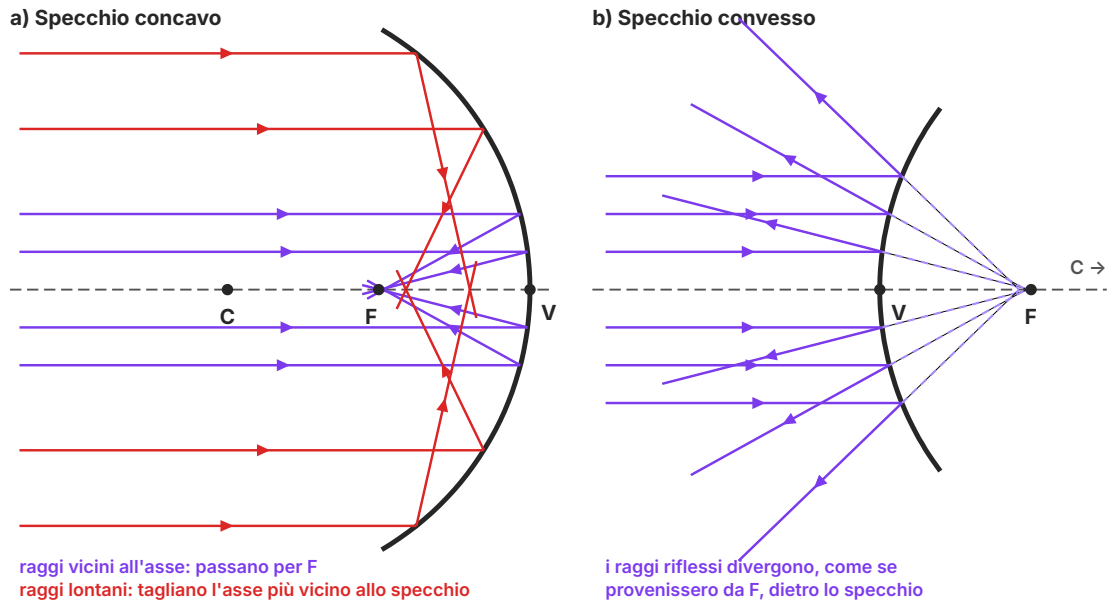


Figura 14.6 Fasci di raggi paralleli all'asse ottico su specchi sferici di raggio di curvatura *R* (percorsi calcolati con la legge della riflessione). a) In uno specchio concavo i raggi parassiali (viola) si riuniscono nel fuoco F, a metà tra il centro di curvatura C e il vertice V; i raggi lontani dall'asse (rossi) tagliano l'asse più vicino allo specchio: è l'aberrazione sferica. b) In uno specchio convesso i raggi riflessi divergono, e i loro prolungamenti (tratteggiati) passano per il fuoco F, dietro lo specchio; il centro di curvatura C è più a destra, fuori dalla figura.

In uno specchio convesso i raggi paralleli all'asse, dopo la riflessione, divergono come se provenissero da un punto dietro lo specchio, a metà tra V e C (Figura 14.6b): è un fuoco *virtuale*, e la distanza focale, di valore assoluto $R/2$, sarà negativa.

14.5.3 Costruire l'immagine: i tre raggi principali

Per trovare l'immagine di un punto dell'oggetto bastano due raggi di cui si conosce il percorso. Ce ne sono tre, detti raggi principali; per uno specchio concavo:

1. un raggio parallelo all'asse ottico si riflette passando per il fuoco;
2. un raggio che passa per il fuoco si riflette parallelo all'asse (è il primo, percorso al contrario);
3. un raggio che passa per il centro di curvatura torna indietro su se stesso.

Dove i raggi riflessi si incontrano c'è l'immagine della cima dell'oggetto; se divergono, l'immagine è virtuale, dove si incontrano i loro prolungamenti. Nella Figura 14.7, come d'uso, i raggi si riflettono sul piano perpendicolare all'asse nel vertice: è l'approssimazione dei raggi parassiali.

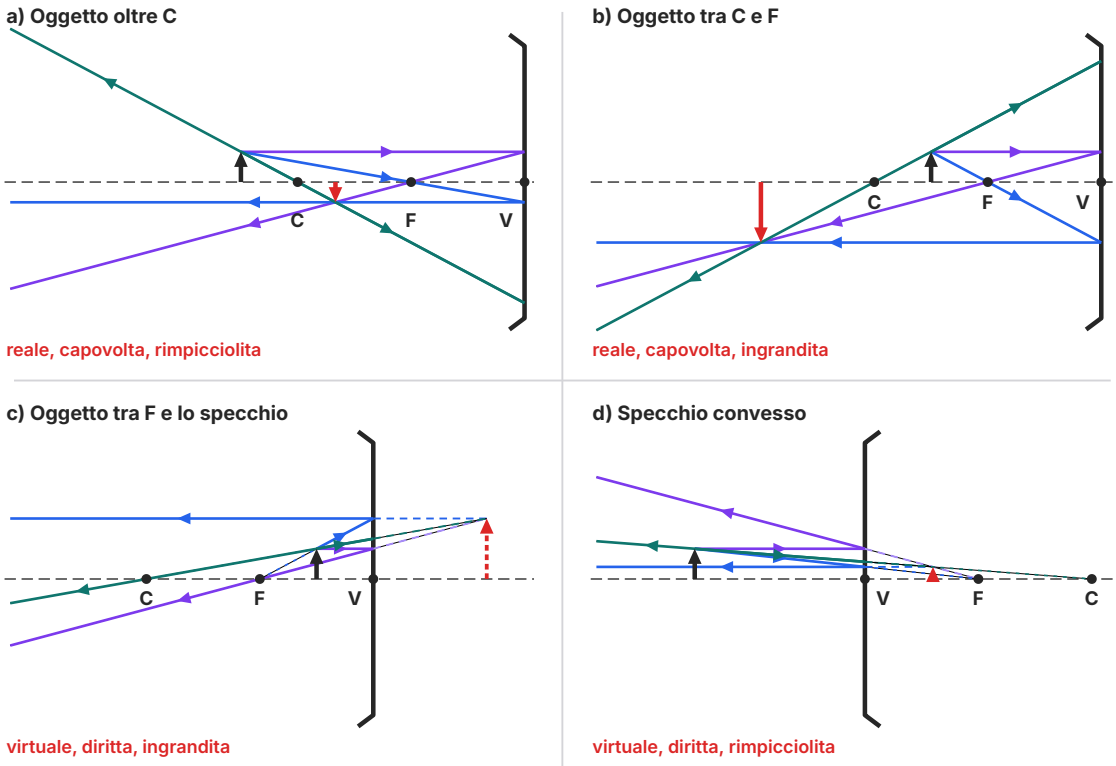


Figura 14.7 Costruzione dell'immagine con i tre raggi principali: parallelo all'asse (viola), passante per il fuoco (blu), passante per il centro di curvatura (verde). Le posizioni sono calcolate con l'equazione dei punti coniugati per $|f| = 60$ unità e un oggetto alto 16: a) $p = 2{,}5f$, $q = 1{,}67f$, $G = -0{,}67$; b) $p = 1{,}5f$, $q = 3f$, $G = -2$; c) $p = 0{,}5f$, $q = -f$, $G = 2$; d) specchio convesso, $p = 1{,}5|f|$, $q = -0{,}6|f|$, $G = 0{,}4$. Le immagini virtuali e i prolungamenti dei raggi sono tratteggiati; i raggi si riflettono sul piano del vertice (approssimazione dei raggi parassiali).

14.5.4 L'equazione dei punti coniugati

Con p distanza dell'oggetto dal vertice e q distanza dell'immagine, dai triangoli simili della costruzione si ricava l'**equazione dei punti coniugati**, valida per i raggi parassiali:

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

Il rapporto tra l'altezza dell'immagine h' e quella dell'oggetto h è l'**ingrandimento** G:

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

Le formule valgono in tutti i casi con una **convenzione dei segni**, che useremo anche per le lenti: **le distanze reali sono positive, quelle virtuali negative.** Dunque $p > 0$ per un oggetto da-

vanti allo specchio; $q > 0$ per un'immagine reale, davanti allo specchio, $q < 0$ per una virtuale, dietro; $f > 0$ per uno specchio concavo, $f < 0$ per uno convesso. Il segno di G dice l'orientamento ($G > 0$ diritta, $G < 0$ capovolta), il valore assoluto se l'immagine è ingrandita ($|G| > 1$) o rimpicciolita.

Lo specchio piano è un caso limite: una sfera di raggio infinito ha f infinita, $1/f = 0$, e la formula dà $q = -p$ e $G = 1$, l'immagine virtuale, diritta e uguale che conosci.

ESEMPIO SVOLTO

Lo specchio per il trucco

Problema. Uno specchio concavo per il trucco ha raggio di curvatura 60 cm. a) Dove si forma, e com'è, l'immagine di un viso posto a 20 cm dal vertice? b) E se il viso si allontana a 45 cm?

Dati. $f = R/2 = +30$ cm (specchio concavo, fuoco reale). Le distanze si possono lasciare in centimetri, purché tutte nella stessa unità.

a) Dall'equazione dei punti coniugati, $1/q = 1/f - 1/p = 1/30 - 1/20 = (2 - 3)/60 = -1/60\ \text{cm}^{-1}$, quindi $q = -60$ cm. L'ingrandimento è $G = -q/p = -(-60\ \text{cm})/(20\ \text{cm}) = +3{,}0$. Il segno meno di q dice che l'immagine è virtuale, a 60 cm dietro lo specchio; $G > 0$ che è diritta; $|G| = 3$ che è ingrandita tre volte. Il viso, più vicino del fuoco, è nel caso c della Figura 14.7.

b) $1/q = 1/30 - 1/45 = (3 - 2)/90 = 1/90\ \text{cm}^{-1}$, $q = +90$ cm; $G = -90/45 = -2{,}0$. Ora il viso è tra F e C (caso b): l'immagine è reale, davanti allo specchio a 90 cm, capovolta e ingrandita due volte. Chi si guarda da 45 cm non la vede a fuoco, perché si forma *dietro* i suoi occhi; si potrebbe però raccoglierla su un foglio posto a 90 cm dallo specchio.

Controllo. Una costruzione con i raggi principali in scala conferma entrambe le posizioni; il risultato «viso ingrandito solo se vicino» è quello che chiunque osserva in uno specchio da trucco.

14.5.5 I casi dello specchio concavo

Avvicinando un oggetto a uno specchio concavo l'immagine cambia in modo spettacolare (Figura 14.7 e Tabella 14.1): finché l'oggetto è oltre il fuoco è reale e capovolta, rimpicciolita se l'oggetto è oltre C (il tuo viso a testa in giù nel cucchiaio), ingrandita se è tra C e F; più vicino del fuoco l'immagine è virtuale, diritta e ingrandita, come nello specchio per il trucco.

Tabella 14.1 Le immagini date da uno specchio concavo (distanza focale f) e da uno specchio convesso, al variare della distanza p dell'oggetto.

Posizione dell'oggetto	Posizione dell'immagine	Caratteristiche dell'immagine
concavo, $p > 2f$ (oltre C)	tra C e F: $f < q < 2f$	reale, capovolta, rimpicciolita
concavo, $p = 2f$ (in C)	in C: $q = 2f$	reale, capovolta, grande quanto l'oggetto
concavo, $f < p < 2f$ (tra C e F)	oltre C: $q > 2f$	reale, capovolta, ingrandita
concavo, $p = f$ (nel fuoco)	all'infinito	nessuna immagine: i raggi riflessi sono paralleli
concavo, $p < f$ (tra F e V)	dietro lo specchio: $q < 0$	virtuale, diritta, ingrandita
convesso, qualunque p	dietro lo specchio, tra V e F	virtuale, diritta, rimpicciolita

14.5.6 Lo specchio convesso

Per uno specchio convesso i tre raggi principali diventano: parallelo all'asse, riflesso come se venisse dal fuoco virtuale; diretto verso il fuoco, riflesso parallelo; diretto verso C, rimandato indietro. I raggi riflessi divergono sempre, e l'immagine è sempre virtuale, diritta e rimpicciolita, tra V e F (Figura 14.7d): con $f < 0$ l'equazione dà per ogni p un q negativo, con $|q| < |f|$.

Il vantaggio è il *campo visivo*, molto più ampio che in uno specchio piano della stessa grandezza. Per questo sono convessi gli specchi agli incroci ciechi, nei supermercati e molti retrovisori esterni delle auto; ma le immagini rimpicciolite fanno sembrare gli oggetti più lontani di quanto siano.

APPROFONDIMENTO

Gli specchi ustori di Archimede: storia di una leggenda

Archimede (circa 287–212 a.C.) difese Siracusa dall'assedio romano con macchine che Polibio, Livio e Plutarco descrivono: catapulte e gru che afferravano le navi. Nessuno di loro parla di specchi. La storia delle navi incendiate compare secoli dopo: un accenno in Luciano (II secolo d.C.), poi Antemio di Tralle, uno degli architetti di Santa Sofia (VI secolo), e il bizantino Giovanni Tzetzes (XII secolo), che descrive uno specchio composto da molti specchi più piccoli. Una notizia così tarda è considerata dagli storici molto dubbia.

La fisica, invece, è solida: uno specchio concavo concentra nel fuoco la luce del Sole, e poco dopo Archimede il matematico Diocle dimostrò nel trattato *Sugli specchi ustori* la proprietà del fuoco della parabola. Ma per una nave a decine di metri servirebbero una distanza focale di decine di metri, o molti specchi piani puntati sullo stesso punto, e un bersaglio fermo per minuti. Nel Settecento il naturalista Buffon incendiò del legno a distanza con molti specchi piani: è possibile, ma che sia accaduto a Siracusa resta una leggenda.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la legge della riflessione e il fuoco di uno specchio concavo

Materiali. Un puntatore laser di bassa potenza (classe 2), un piccolo specchio piano, un goniometro stampato; uno specchio concavo da trucco, una candela o un piccolo LED, uno schermo di cartoncino bianco, un metro a nastro; un ambiente in penombra.

Procedimento. 1) Metti lo specchio piano in verticale sulla retta 0°–180° del goniometro e manda il fascio laser, radente al foglio, verso il centro con angoli di incidenza di 20°, 30°, 45°, 60°: troverai $\theta_r = \theta_i$ entro l'incertezza di lettura, circa ± 1°. 2) Metti la fiammella sull'asse dello specchio concavo, a distanza p dal vertice, e sposta lo schermo, un po' di lato, finché l'immagine capovolta è nitida: misura q. Ripeti per sei valori di p tra 20 cm e 60 cm (Tabella 14.2).

Tabella 14.2 Posizioni dell'oggetto (la fiammella) e dell'immagine nitida per uno specchio concavo (dati tipici). Incertezze: ± 0,2 cm su p, ± 0,5 cm su q; l'incertezza di f è stimata calcolandola con i valori estremi delle misure.

p (cm)	q (cm)	$1/p$ (m^{-1})	$1/q$ (m^{-1})	$1/p + 1/q$ (m^{-1})	f (cm)
20,0	60,5	5,00	1,65	6,65	15,0 ± 0,1
25,0	37,2	4,00	2,69	6,69	15,0 ± 0,2
30,0	30,3	3,33	3,30	6,63	15,1 ± 0,2
40,0	23,8	2,50	4,20	6,70	14,9 ± 0,2
50,0	21,6	2,00	4,63	6,63	15,1 ± 0,3
60,0	19,9	1,67	5,03	6,69	14,9 ± 0,3

Che cosa concludere. Per ogni coppia di misure $1/p + 1/q$ è costante entro le incertezze, come vuole l'equazione dei punti coniugati, e la distanza focale vale in media $f = 15{,}0 \pm 0{,}1$ cm (media e semidispersione). Il grafico di $1/q$ in funzione di $1/p$ è una retta (Figura 14.8), analizzata nell'esempio svolto che segue. Un controllo indipendente: l'immagine nitida di un oggetto molto lontano si forma quasi esattamente nel fuoco.

Sicurezza. Non puntare mai il laser verso gli occhi, né direttamente né dopo una riflessione: tieni il fascio radente al tavolo e togli gli oggetti lucidi. Non rivolgere lo specchio concavo verso il Sole: nel fuoco la luce concentrata brucia la pelle e incendia la carta.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4: tabelle con le incertezze, f per ogni coppia e la media, il grafico di $1/q$ in funzione di $1/p$, le fonti di errore (quando l'immagine è «più nitida», la posizione del vertice, l'aberrazione sferica).

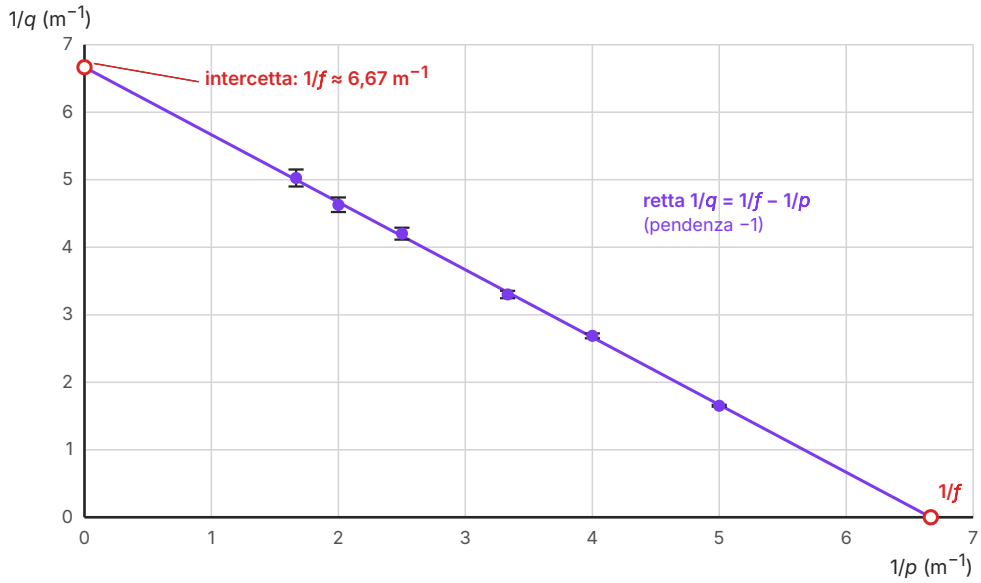


Figura 14.8 Il grafico di $1/q$ in funzione di $1/p$ per i dati della Tabella 14.2, con le barre d'errore su $1/q$ (quelle su $1/p$, al massimo 0,05 m^{-1}, hanno la grandezza dei punti). La retta ha pendenza −1 e taglia entrambi gli assi in $1/f \approx 6{,}67\ m^{-1}$: $f \approx 15{,}0$ cm.

ESEMPIO SVOLTO

Dai dati al fuoco: il grafico di 1/q in funzione di 1/p

Problema. Riporta in un grafico i dati della Tabella 14.2, con $1/p$ in ascissa e $1/q$ in ordinata. Che forma ha il grafico? Come si ricava la distanza focale?

La legge da verificare. Riscritta come $1/q = 1/f - 1/p$, l'equazione dei punti coniugati dice che $1/q$ è una funzione lineare di $1/p$ (Fisica 3, capitolo 4): il grafico è una retta di pendenza −1, che taglia l'asse verticale in $1/f$. Il cambio di variabili trasforma un'iperbole, q in funzione di p, in una retta, molto più facile da controllare.

Il grafico. I sei punti (Figura 14.8) sono allineati entro le barre d'errore su una retta di pendenza −1. Le barre su $1/q$ sono diverse da punto a punto: un'incertezza di 0,5 cm pesa poco su $q = 60{,}5$ cm e molto di più su $q = 19{,}9$ cm, perché $\delta(1/q) \approx \delta q/q^2$. La retta disegnata ha pendenza −1 e passa per il valore medio di $1/p + 1/q$ (ultima colonna della tabella).

Il fuoco. L'intercetta con l'asse verticale vale $6{,}67\ m^{-1}$; la retta taglia l'asse orizzontale nello stesso punto, perché la pendenza è −1. Dunque $1/f = 6{,}67\ m^{-1}$ e $f = 1/(6{,}67\ m^{-1}) \approx 0{,}150$ m = 15,0 cm, in accordo con la media della tabella. Il raggio di curvatura dello specchio è $R = 2f \approx 30$ cm.

Osservazione. Il punto con $p = 30{,}0$ cm ha $q \approx p$: l'oggetto è nel centro di curvatura, e l'immagine si forma nello stesso punto, grande quanto l'oggetto. È un modo rapido di trovare C, e quindi f, con una sola misura.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Velocità della luce nel vuoto: c = 299 792 458 m/s (esatta) ≈ $3{,}00 \times 10^8$ m/s; nell'aria è praticamente la stessa. Un anno-luce è una lunghezza: 1 a.l. ≈ $9{,}46 \times 10^{15}$ m.

Camera oscura: $h'/h = q/p$: l'immagine, capovolta, sta all'oggetto come la distanza foro–schermo sta alla distanza oggetto–foro (triangoli simili).

Legge della riflessione: raggio incidente, normale e raggio riflesso sono complanari, e $\theta_r = \theta_i$, con gli angoli misurati dalla normale. È il cammino più breve tra due punti che tocca lo specchio (Erone).

Specchio piano: immagine virtuale, diritta, grande quanto l'oggetto, simmetrica rispetto allo specchio; per vedersi per intero basta uno specchio alto metà della propria statura.

Specchio sferico: $f = R/2$ per i raggi parassiali; $1/p + 1/q = 1/f$ e $G = h'/h = -q/p$ (distanze in metri o tutte in centimetri; G è un numero puro).

Convenzione dei segni: distanze reali positive, virtuali negative; $f > 0$ concavo, $f < 0$ convesso; $q < 0$ immagine virtuale; $G > 0$ diritta, $G < 0$ capovolta.

Nel prossimo capitolo la luce attraverserà la superficie che qui l'ha respinta: passando dall'aria all'acqua o al vetro cambia direzione, si scompone nei colori dell'arcobaleno e, attraverso le lenti, forma le immagini dell'occhio, della macchina fotografica e del cannocchiale di Galileo.

SINTESI

- Per Euclide la visione nasceva da raggi visivi uscenti dall'occhio, per gli atomisti da pellicole emesse dagli oggetti; Ibn al-Haytham (XI secolo) mostrò che la luce va dagli oggetti illuminati all'occhio.
- Le sorgenti emettono luce propria, i corpi illuminati rinviano una parte della luce che ricevono; i mezzi possono essere trasparenti, traslucidi od opachi.
- Nei mezzi omogenei la luce si propaga in linea retta: l'ottica geometrica la descrive con i raggi, finché gli oggetti sono molto più grandi di una grandezza caratteristica della luce.
- La propagazione rettilinea spiega le ombre e, con una sorgente estesa, le penombre, le eclissi di Sole e di Luna e la camera oscura, che dà un'immagine capovolta con $h'/h = q/p$.
- La luce ha velocità finita: Galileo propose di misurarla con le lanterne, Rømer (1676) la dedusse dai ritardi delle eclissi di Io, Fizeau (1849) la misurò sulla Terra con una ruota dentata.
- Nel vuoto $c = 299\,792\,458$ m/s, valore esatto perché definisce il metro; un anno-luce, circa $9{,}46 \times 10^{15}$ m, è la distanza percorsa dalla luce in un anno.
- Nella riflessione il raggio incidente, la normale e il raggio riflesso sono complanari, e l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza; le superfici ruvide danno riflessione diffusa.
- Erone dimostrò che il raggio riflesso segue il cammino più breve tra due punti che tocca lo specchio; Fermat generalizzò l'idea al principio del tempo minimo.
- Lo specchio piano dà un'immagine virtuale, diritta, grande quanto l'oggetto e simmetrica rispetto allo specchio: scambia il davanti con il dietro, non la destra con la sinistra.
- In uno specchio sferico il fuoco è a metà tra il centro di curvatura e il vertice, $f = R/2$, solo per i raggi parassiali; i raggi lontani dall'asse danno l'aberrazione sferica, che lo specchio parabolico elimina.
- L'immagine si costruisce con i tre raggi principali e si calcola con $1/p + 1/q = 1/f$ e $G = -q/p$, con distanze reali positive e virtuali negative.
- Uno specchio concavo dà immagini reali e capovolte di oggetti oltre il fuoco e virtuali, diritte e ingrandite di oggetti più vicini; uno specchio convesso dà sempre immagini virtuali, diritte e rimpicciolite, con un ampio campo visivo.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Secondo la teoria dei raggi visivi esposta nell'*Ottica* di Euclide, vediamo un oggetto perché:
   A. la luce diffusa dall'oggetto entra nell'occhio
   B. raggi che escono dall'occhio in linea retta raggiungono l'oggetto
   C. l'oggetto emette sottili pellicole di atomi che ne conservano la forma
   D. la luce si propaga istantaneamente dall'oggetto all'occhio

2. ● Un'eclissi di Sole avviene quando:
   A. la Terra si trova tra il Sole e la Luna
   B. la Luna entra nel cono d'ombra della Terra
   C. il Sole si trova tra la Terra e la Luna
   D. la Luna si trova tra il Sole e la Terra, e la sua ombra raggiunge la Terra

3. ● In una camera oscura l'immagine di un oggetto lontano è:
   A. capovolta, e tanto più grande quanto più lo schermo è lontano dal foro
   B. diritta e sempre più piccola dell'oggetto
   C. diritta e grande quanto l'oggetto
   D. capovolta, di grandezza indipendente dalla distanza dello schermo

4. ● L'anno-luce è:
   A. l'unità di tempo usata in astronomia, pari a un anno
   B. la distanza percorsa dalla luce in un giorno
   C. la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno, circa $9{,}46 \times 10^{15}$ m
   D. il tempo che la luce del Sole impiega a raggiungere la Terra

5. ● Un raggio colpisce uno specchio piano formando un angolo di 35° con la *superficie* dello specchio. L'angolo di riflessione vale:
   A. 35°
   B. 55°
   C. 70°
   D. 110°

6. ● L'immagine di un oggetto in uno specchio piano è:
   A. virtuale, diritta, grande quanto l'oggetto
   B. reale, diritta, grande quanto l'oggetto
   C. virtuale, capovolta, grande quanto l'oggetto
   D. reale, capovolta, rimpicciolita

7. ● Uno specchio concavo ha un raggio di curvatura di 40 cm. La sua distanza focale vale:
   A. 80 cm
   B. 40 cm
   C. −20 cm
   D. 20 cm

8. ●● Molti specchietti retrovisori esterni delle automobili sono convessi perché:
   A. danno immagini reali, che si vedono meglio
   B. ingrandiscono gli oggetti
   C. offrono un campo visivo più ampio, con immagini rimpicciolite
   D. hanno il fuoco davanti allo specchio

Vero o falso

9. ● La luce ha bisogno di un mezzo materiale per propagarsi. V / F

10. ● La velocità della luce nel vuoto vale esattamente 299 792 458 m/s. V / F

11. ● Un foglio di carta bianca non obbedisce alla legge della riflessione. V / F

12. ●● Un'immagine virtuale non può essere raccolta su uno schermo. V / F

13. ●● Per vedersi per intero in uno specchio piano verticale alto metà della propria statura bisogna mettersi abbastanza lontano. V / F

Applicare

14. ● Quanto tempo impiega la luce a percorrere la distanza media Terra–Luna, $3{,}84 \times 10^8$ m?

15. ● La stella Proxima Centauri dista circa 4,2 anni-luce dal Sole. Esprimi questa distanza in metri.

16. ● In una camera oscura lo schermo è a 15 cm dal foro. Quanto è alta l'immagine di una persona alta 1,8 m che si trova a 6,0 m dal foro?

17. ● Completa: in uno specchio piano l'immagine si trova _____ lo specchio, alla stessa _____ dell'oggetto; è _____, e per questo non si può raccogliere su uno schermo.

18. ●● Un oggetto si trova a 36 cm da uno specchio concavo con distanza focale 12 cm. Dove si forma l'immagine? Quanto vale l'ingrandimento? Descrivi l'immagine.

19. ●● Uno specchio convesso ha distanza focale −50 cm. Dove si forma l'immagine di un'automobile che si trova a 10 m dallo specchio, e quanto vale l'ingrandimento?

20. ●● Nella Figura 14.8 leggi il valore di $1/q$ sulla retta per $1/p = 2{,}5\ \text{m}^{-1}$. A quali distanze p e q (in centimetri) corrisponde questo punto? Controlla con l'equazione dei punti coniugati, usando $f = 15{,}0$ cm.

Problemi

21. ●● Usa i valori di oggi (1 UA = $1{,}496 \times 10^{11}$ m, $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m/s). a) Quanto tempo impiega la luce ad attraversare l'orbita della Terra, cioè a percorrere 2 UA? È il ritardo massimo che le eclissi di Io possono accumulare tra il momento in cui la Terra è più vicina a Giove e quello in cui ne è più lontana (supponi l'orbita circolare e Giove fermo). b) Quanto tempo impiega la luce del Sole a raggiungerci?

22. ●●● Una ruota dentata con 720 denti, e altrettanti varchi tutti della stessa larghezza, come quella di Fizeau, gira davanti a una sorgente; la luce che passa per un varco va a uno specchio distante 8,63 km e torna indietro. a) Quanto tempo impiega la luce per andare e tornare? b) La luce di ritorno è bloccata per la prima volta quando, in quel tempo, la ruota gira di mezzo «passo» (un varco al posto di un dente), cioè di 1/1440 di giro. Con quale frequenza, in giri al secondo, deve girare la ruota? c) Se si osserva l'oscuramento a 12,6 giri al secondo, quale valore di c si ricava?

23. ●●● Uno specchio concavo forma sopra uno schermo, a 1,20 m dal vertice, l'immagine nitida di una lampadina, capovolta e alta il doppio della lampadina. a) A che distanza dallo specchio è la lampadina? b) Quanto valgono la distanza focale e il raggio di curvatura dello specchio?

24. ●●● Si vuole costruire uno specchio da barba che dia un'immagine diritta e ingrandita due volte di un viso posto a 15 cm dal vertice. a) Lo specchio deve essere concavo o convesso? b) Quanto devono valere la distanza focale e il raggio di curvatura? c) A che distanza si deve porre il viso per vederlo ingrandito tre volte?

25. ●●● Combina con il capitolo 4. Con un foro e uno schermo a 3,00 m si proietta l'immagine del Sole (diametro $1{,}39 \times 10^{9}$ m). L'orbita della Terra è un'ellisse di semiasse maggiore $1{,}496 \times 10^{11}$ m ed eccentricità 0,017. a) Calcola il diametro dell'immagine quando la Terra è al perielio e quando è all'afelio. b) Di quanti millimetri differiscono? c) In quale mese dell'anno l'immagine è più grande? (Ricorda in che periodo la Terra passa al perielio.)

26. ●● Combina con Fisica 3, capitolo 13. Cammini verso uno specchio piano verticale a 1,2 m/s. a) Con quale velocità si muove la tua immagine rispetto allo specchio? b) E rispetto a te? c) Se parti da 6,0 m dallo specchio, quanto vale dopo 2,0 s la distanza tra te e la tua immagine?

Ragionare e argomentare

27. ●● Commenta la fonte. Nei *Discorsi* di Galileo (1638, Giornata prima) Simplicio afferma: «Mostra l'esperienza quotidiana, l'espansion del lume esser instantanea; mentre che vedendo in gran lontananza sparar un'Artiglieria, lo splendor della fiamma senza interposizion di tempo si conduce à gli occhi nostri, mà non già il suono all'orecchie, se non dopo notabile intervallo di tempo». Che cosa dimostra davvero questa osservazione, e che cosa no? Come si potrebbe decidere la questione?

28. ●● Commenta la fonte. Nell'esperimento dei tre specchi (Dante, *Paradiso* II 103–105) Beatrice conclude che l'immagine del lume nello specchio più lontano «Ben che nel quanto tanto non si stenda / la vista più lontana, lì vedrai / come convien ch'igualmente risplenda». Che cosa prevede per le dimensioni e per la luminosità dell'immagine nello specchio lontano? Ha ragione? Come potresti verificarlo con tre specchi e una lampadina?

29. ●● Trova l'errore. «Uno specchio convesso ha distanza focale 20 cm e un oggetto è a 30 cm dal vertice. Allora $1/q = 1/20 - 1/30 = 1/60$, e l'immagine è reale, a 60 cm davanti allo specchio, capovolta e ingrandita due volte.» Correggi il ragionamento e trova la posizione e le caratteristiche giuste dell'immagine.

30. ●●● Stima. Nell'esperimento delle lanterne di Galileo ogni osservatore scopre la sua lanterna dopo un tempo di reazione di circa 0,2 s. a) Quanto vale il tempo di andata e ritorno della luce per due osservatori a 1 miglio (circa 1,6 km)? b) A quale distanza dovrebbero trovarsi perché quel tempo fosse uguale al tempo di reazione? Confronta il risultato con il diametro della Terra e spiega perché l'esperimento, così com'era pensato, non poteva riuscire, anche con i telescopi suggeriti da Galileo.

PER APPROFONDIRE

- [GAL] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*: nella Giornata prima la discussione sulla velocità della luce e l'esperimento delle lanterne, che si leggono in poche pagine.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: i capitoli sull'ottica partono dal principio del tempo minimo di Fermat e ne ricavano la riflessione e gli specchi.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle immagini tratta gli specchi piani e sferici con molti esempi ed esercizi.
- [HUY] Christiaan Huygens, *Traité de la lumière*: il primo capitolo discute la velocità finita della luce e riferisce la dimostrazione di Rømer con le eclissi dei satelliti di Giove.

Glossario del capitolo

Aberrazione sferica
Difetto degli specchi sferici: i raggi lontani dall'asse non passano per il fuoco, e l'immagine è sfocata.

Camera oscura
Scatola buia con un piccolo foro, nella quale si forma un'immagine reale e capovolta degli oggetti esterni, con $h'/h = q/p$.

Centro di curvatura
Centro della sfera di cui uno specchio sferico è una calotta; la retta che lo unisce a un punto dello specchio è la normale in quel punto.

Corpo opaco
Corpo che non si lascia attraversare dalla luce; un mezzo trasparente la lascia passare, uno traslucido la lascia passare sparpagliandola.

Distanza focale
Distanza del fuoco dal vertice; in uno specchio sferico $f = R/2$, positiva per lo specchio concavo e negativa per quello convesso.

Equazione dei punti coniugati
$1/p + 1/q = 1/f$: lega la distanza dell'oggetto e quella dell'immagine alla distanza focale.

Fuoco
Punto dell'asse ottico in cui passano, dopo la riflessione, i raggi parassiali paralleli all'asse (o i loro prolungamenti, in uno specchio convesso).

Immagine reale
Immagine formata dall'incontro effettivo dei raggi luminosi; si può raccogliere su uno schermo.

Immagine virtuale
Immagine formata dall'incontro dei prolungamenti dei raggi; non si può raccogliere su uno schermo.

Ingrandimento
Rapporto tra l'altezza dell'immagine e quella dell'oggetto: $G = h'/h = -q/p$; positivo per un'immagine diritta, negativo per una capovolta.

Legge della riflessione
Raggio incidente, normale e raggio riflesso sono complanari, e l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza.

Normale
Retta perpendicolare alla superficie nel punto di incidenza; da essa si misurano gli angoli di incidenza e di riflessione.

Ombra e penombra
Zona che non riceve luce da nessun punto della sorgente (ombra) o solo da una parte di essa (penombra).

Ottica geometrica
Parte dell'ottica che descrive la propagazione della luce con il modello dei raggi e con la geometria; vale quando gli oggetti sono molto più grandi di una grandezza caratteristica della luce.

Principio del cammino minimo
Fra tutti i cammini che vanno da un punto a un altro toccando uno specchio, la luce segue il più breve (Erone di Alessandria).

Raggi parassiali
Raggi vicini all'asse ottico e poco inclinati su di esso; per essi valgono $f = R/2$ e l'equazione dei punti coniugati.

Raggio luminoso
Linea orientata che indica la direzione di propagazione della luce; è un modello.

Riflessione diffusa
Riflessione su una superficie ruvida, che rinvia in tutte le direzioni la luce di un fascio parallelo; quella su una superficie liscia è speculare.

Specchio sferico
Calotta sferica riflettente: concavo se riflette dalla parte interna, convesso se dalla parte esterna.

Soluzioni

1. B. Per Euclide i raggi visivi partono dall'occhio e formano un cono con il vertice nell'occhio (estromissione); A è la teoria moderna, C quella degli atomisti.

2. D. La Luna, interposta, proietta la sua ombra sulla Terra; A e B descrivono l'eclissi di Luna.

3. A. I raggi si incrociano nel foro, e per i triangoli simili $h'/h = q/p$: allontanando lo schermo l'immagine cresce.

4. C. È una lunghezza: 1 a.l. = $c \cdot 1$ anno = $2{,}998 \times 10^8$ m/s $\cdot$ $3{,}156 \times 10^7$ s $\approx 9{,}46 \times 10^{15}$ m.

5. B. Gli angoli si misurano dalla normale: $\theta_i = 90° - 35° = 55°$, e $\theta_r = \theta_i = 55°$.

6. A. L'immagine si forma dove si incontrano i prolungamenti dei raggi riflessi, simmetrica dell'oggetto rispetto allo specchio.

7. D. $f = R/2 = 40$ cm$/2 = 20$ cm, positiva perché lo specchio è concavo.

8. C. Lo specchio convesso dà sempre immagini virtuali, diritte e rimpicciolite, ma raccoglie la luce da un angolo molto ampio.

9. F. La luce del Sole e delle stelle ci raggiunge attraverso lo spazio vuoto; a differenza del suono, non ha bisogno di un mezzo.

10. V. Dal 1983 il metro è definito a partire dalla velocità della luce, che vale per definizione 299 792 458 m/s.

11. F. Ogni piccola faccia della superficie ruvida obbedisce alla legge della riflessione; le normali sono orientate in direzioni diverse, e la riflessione è diffusa.

12. V. Nel punto dell'immagine virtuale si incontrano solo i prolungamenti dei raggi riflessi, non la luce: su uno schermo non compare nulla.

13. F. L'altezza necessaria, metà della statura, non dipende dalla distanza dallo specchio: se lo specchio è alto $H/2$ e ben posizionato ci si vede per intero a qualunque distanza.

14. $\Delta t = d/c = 3{,}84 \times 10^8$ m $/ 3{,}00 \times 10^8$ m/s $= 1{,}28$ s.

15. $d = 4{,}2 \cdot 9{,}46 \times 10^{15}$ m $\approx 4{,}0 \times 10^{16}$ m.

16. $h' = h \cdot q/p = 1{,}8$ m $\cdot$ $0{,}15$ m $/ 6{,}0$ m $= 0{,}045$ m $= 4{,}5$ cm (capovolta).

17. dietro; distanza; virtuale.

18. $1/q = 1/12 - 1/36 = (3 - 1)/36 = 1/18$ cm^{-1}, $q = +18$ cm; $G = -18/36 = -0{,}50$. Immagine reale, davanti allo specchio a 18 cm, capovolta e grande metà dell'oggetto (oggetto oltre C, che è a 24 cm).

19. $1/q = 1/f - 1/p = 1/(-0{,}50$ m$) - 1/(10$ m$) = -2{,}0$ m$^{-1} - 0{,}10$ m$^{-1} = -2{,}1$ m^{-1}, $q \approx -0{,}48$ m: immagine virtuale, 48 cm dietro lo specchio. $G = -q/p = 0{,}48$ m $/ 10$ m $\approx 0{,}048$: diritta, rimpicciolita circa 21 volte.

20. Sulla retta $1/q \approx 4{,}2$ m^{-1} (lettura $\pm\, 0{,}1$ m^{-1}). Dunque $p = 1/(2{,}5$ m$^{-1}) = 0{,}40$ m $= 40$ cm e $q = 1/(4{,}2$ m$^{-1}) \approx 0{,}24$ m $= 24$ cm. Controllo: $1/q = 1/15{,}0 - 1/40 = (8 - 3)/120$ cm^{-1}, $q = 24$ cm (il punto misurato della Tabella 14.2 ha $q = 23{,}8$ cm).

21. a) $\Delta t = 2 \cdot 1{,}496 \times 10^{11}$ m $/ 3{,}00 \times 10^8$ m/s ≈ 997 s $\approx 16{,}6$ minuti (circa $1{,}0 \times 10^3$ s). b) $\Delta t = 1{,}496 \times 10^{11}$ m $/ 3{,}00 \times 10^8$ m/s ≈ 499 s $\approx 8{,}3$ minuti.

22. a) $\Delta t = 2d/c = 2 \cdot 8630$ m $/ 3{,}00 \times 10^8$ m/s $\approx 5{,}75 \times 10^{-5}$ s. b) La ruota deve compiere 1/1440 di giro in $5{,}75 \times 10^{-5}$ s, cioè un giro in $1440 \cdot 5{,}75 \times 10^{-5}$ s $\approx 8{,}29 \times 10^{-2}$ s: la frequenza è $1/(8{,}29 \times 10^{-2}$ s$) \approx 12{,}1$ giri al secondo. c) In 1/1440 di giro a 12,6 giri/s passano $\Delta t = 1/(1440 \cdot 12{,}6)$ s $\approx 5{,}51 \times 10^{-5}$ s; $c = 2d/\Delta t = 2 \cdot 8630$ m $\cdot\, 1440 \cdot 12{,}6$ s$^{-1} \approx 3{,}13 \times 10^8$ m/s, circa il 4,5% più del valore attuale.

23. L'immagine è reale (si raccoglie su uno schermo): $q = +1{,}20$ m; capovolta e doppia: $G = -2$. a) Da $G = -q/p$: $p = q/2 = 0{,}60$ m. b) $1/f = 1/0{,}60 + 1/1{,}20 = 2{,}5$ m^{-1}, $f = 0{,}40$ m; $R = 2f = 0{,}80$ m. (La lampadina è tra F e C, come nel caso b della Figura 14.7.)

24. a) Un'immagine diritta e ingrandita si ottiene solo con uno specchio concavo e il viso tra il fuoco e lo specchio (lo specchio convesso rimpicciolisce sempre). b) $G = +2 = -q/p$, quindi $q = -2 \cdot 15$ cm $= -30$ cm (virtuale). $1/f = 1/15 - 1/30 = 1/30$ cm^{-1}: $f = 30$ cm, $R = 60$ cm. c) $G = 3$ significa $q = -3p$: $1/p - 1/(3p) = 2/(3p) = 1/30$ cm^{-1}, da cui $p = 20$ cm (immagine 60 cm dietro lo specchio). Più il viso si avvicina al fuoco, più l'ingrandimento cresce.

25. Sistema e modello: il foro e lo schermo formano una camera oscura, $d = D \cdot q/r$. a) Perielio: $r = a(1 - e) = 1{,}496 \times 10^{11}$ m $\cdot\ 0{,}983 \approx 1{,}471 \times 10^{11}$ m, $d = 1{,}39 \times 10^{9}$ m $\cdot\ 3{,}00$ m $/\ 1{,}471 \times 10^{11}$ m $\approx 2{,}84$ cm. Afelio: $r = a(1 + e) \approx 1{,}521 \times 10^{11}$ m, $d \approx 2{,}74$ cm. b) La differenza è circa 0,95 mm, cioè circa 1 mm: il 3,4% del diametro, misurabile con cura. c) La Terra passa al perielio all'inizio di gennaio: l'immagine è più grande in pieno inverno (per l'emisfero nord), segno che le stagioni non dipendono dalla distanza dal Sole.

26. Sistema di riferimento: lo specchio, fermo; verso positivo verso lo specchio. a) L'immagine resta simmetrica rispetto allo specchio: se tu ti avvicini a 1,2 m/s, anche lei si avvicina allo specchio a 1,2 m/s, in verso opposto al tuo. b) Rispetto a te (composizione galileiana delle velocità) l'immagine si avvicina a $1{,}2 + 1{,}2 = 2{,}4$ m/s. c) Dopo 2,0 s sei a 6,0 m $- 1{,}2$ m/s $\cdot\ 2{,}0$ s $= 3{,}6$ m dallo specchio, e l'immagine a 3,6 m dietro: la distanza tra te e l'immagine è 7,2 m.

27. Traccia di risposta. L'osservazione dimostra solo che la luce è molto più veloce del suono: il lampo arriva «subito» rispetto ai tempi che possiamo percepire, il suono dopo un intervallo notevole. Non dimostra che la luce sia istantanea: un ritardo troppo piccolo per i nostri sensi resterebbe invisibile (è l'obiezione di Sagredo nel dialogo). Per decidere bisogna misurare un tempo di volo con un metodo abbastanza sensibile: su distanze astronomiche (Rømer, le eclissi di Io) o con un dispositivo meccanico molto rapido (Fizeau, la ruota dentata). Oggi sappiamo che su qualche kilometro il ritardo è di qualche milionesimo di secondo.

28. Traccia di risposta. Beatrice prevede che l'immagine nello specchio lontano appaia più piccola («nel quanto», nella grandezza, non si estende tanto), ma ugualmente luminosa. Ha ragione: un'immagine più lontana è vista sotto un angolo minore, ma la sua luminosità per unità di superficie (la brillantezza che percepiamo guardando la superficie dell'immagine) non dipende dalla distanza, perché luce raccolta e area apparente diminuiscono nello stesso rapporto. Verifica: tre specchi uguali, due a 1 m e uno a 2 m, una lampadina alle spalle; si confrontano a occhio, o fotografando con la stessa esposizione, le dimensioni e la luminosità delle tre immagini. L'argomento serviva a Beatrice per dire che la diversa distanza delle parti della Luna non basta a spiegarne le macchie.

29. L'errore è nel segno della distanza focale: per uno specchio convesso $f = -20$ cm. $1/q = -1/20 - 1/30 = -5/60$ cm^{-1}, $q = -12$ cm; $G = -(-12)/30 = +0{,}40$. L'immagine è virtuale, 12 cm dietro lo specchio, diritta e rimpicciolita (a 0,4 volte): come sempre in uno specchio convesso.

30. a) $\Delta t = 2 \cdot 1{,}6 \times 10^{3}$ m $/\ 3{,}00 \times 10^{8}$ m/s $\approx 1 \times 10^{-5}$ s, ventimila volte meno del tempo di reazione. b) $2d/c = 0{,}2$ s, $d = c \cdot 0{,}1$ s $= 3 \times 10^{7}$ m, circa 30 000 km: più del doppio del diametro della Terra ($1{,}27 \times 10^{7}$ m). Due osservatori sulla Terra non possono stare così lontani né vedersi, e anche con i telescopi, che secondo Galileo permetterebbero di vedere le lanterne a otto o dieci miglia (circa 15 km), il ritardo, 10^{-4} s, resta meno di un millesimo del tempo di reazione, che varia da una prova all'altra molto più del ritardo da misurare. L'idea è giusta, ma servono un percorso molto più lungo o un «orologio» molto più rapido dell'uomo.