CAPITOLO

14

La luce e la riflessione

Vediamo il mondo solo perché la luce rimbalza sulle cose: ogni specchio rende soltanto più ordinato un rimbalzo che avviene ovunque.

OBIETTIVI

1. Distinguere sorgenti primarie e secondarie e mezzi trasparenti, traslucidi e opachi, e usare il modello del raggio luminoso.
2. Spiegare ombre, penombre, eclissi e camera oscura con la propagazione rettilinea della luce e i triangoli simili.
3. Conoscere il valore della velocità della luce e calcolare tempi di percorrenza e distanze in anni luce.
4. Enunciare e applicare le leggi della riflessione, distinguendo riflessione speculare e diffusa.
5. Costruire le immagini date da specchi piani e sferici con i raggi principali e classificarle come reali o virtuali, diritte o capovolte, ingrandite o rimpicciolite.
6. Usare l'equazione dei punti coniugati e l'ingrandimento con la convenzione dei segni, e misurare in laboratorio la distanza focale di uno specchio concavo.

INDICE DEL CAPITOLO

14.1 La luce e la sua propagazione 2
14.2 La velocità della luce 5
14.3 La riflessione della luce 7
14.4 Lo specchio piano 9
14.5 Gli specchi sferici 11
14.6 L'equazione dei punti coniugati 16

Fisica 2 · Parte V · L'ottica geometrica · versione 1.0
Capitolo 14: La luce e la riflessione · pagine 347–372 del volume completo · estratto per lo studio

In una stanza buia non vedi nulla; accendi una lampada e compaiono il tavolo, i libri, il tuo riflesso nel vetro della finestra. Tutto ciò che vedi arriva sotto forma di luce: emessa da qualcosa, rimbalzata su qualcos'altro e infine entrata nei tuoi occhi.

Con questo capitolo inizia l'ultima parte del libro, dedicata all'**ottica geometrica**. Qui studiamo la propagazione della luce e la **riflessione**: ombre, camera oscura, velocità della luce, specchi piani e curvi; la rifrazione verrà nel capitolo 15, le lenti e gli strumenti ottici nel capitolo 16. La matematica che serve la conosci già: rette, angoli e triangoli simili.

14.1 La luce e la sua propagazione

14.1.1 Sorgenti e mezzi

Il Sole, una candela, lo schermo di un telefono emettono luce propria: sono **sorgenti primarie**. La Luna, un muro, questa pagina rinviano in tutte le direzioni una parte della luce che ricevono: sono **sorgenti secondarie**, o corpi illuminati, e sono quasi tutto ciò che vedi intorno a te.

Un **mezzo trasparente** (aria, acqua, vetro) si lascia attraversare dalla luce e permette di vedere nitidamente ciò che sta dietro. Un **mezzo traslucido** (vetro smerigliato, carta da forno, nebbia) lascia passare la luce ma la sparpaglia: dietro si intravedono solo forme confuse. Un **mezzo opaco** (legno, metallo, il tuo corpo) non si lascia attraversare: la luce viene in parte riflessa e in parte assorbita.

14.1.2 Il modello del raggio luminoso

Useremo un modello semplice: il **raggio luminoso**, una linea orientata che indica la direzione in cui la luce si propaga. Il sottile pennello di un puntatore laser ne è l'immagine concreta; un insieme di raggi forma un **fascio**, parallelo, divergente (come quello che esce da una lampadina) o convergente verso un punto.

Lo studio della luce per mezzo dei raggi si chiama **ottica geometrica**. Come ogni modello ha un dominio di validità: funziona quando gli oggetti, i fori e gli ostacoli sono molto più grandi della lunghezza d'onda della luce, inferiore a un millesimo di millimetro. La luce ha anche una natura ondulatoria, che studierai negli anni successivi; per specchi, lenti e strumenti ottici il modello dei raggi basta.

14.1.3 Ombra e penombra

In un mezzo trasparente e omogeneo, con le stesse proprietà in ogni punto, la luce si propaga in linea retta: è la **propagazione rettilinea**, che vedi quando il fascio di una torcia attraversa la polvere e che spiega la forma delle ombre.

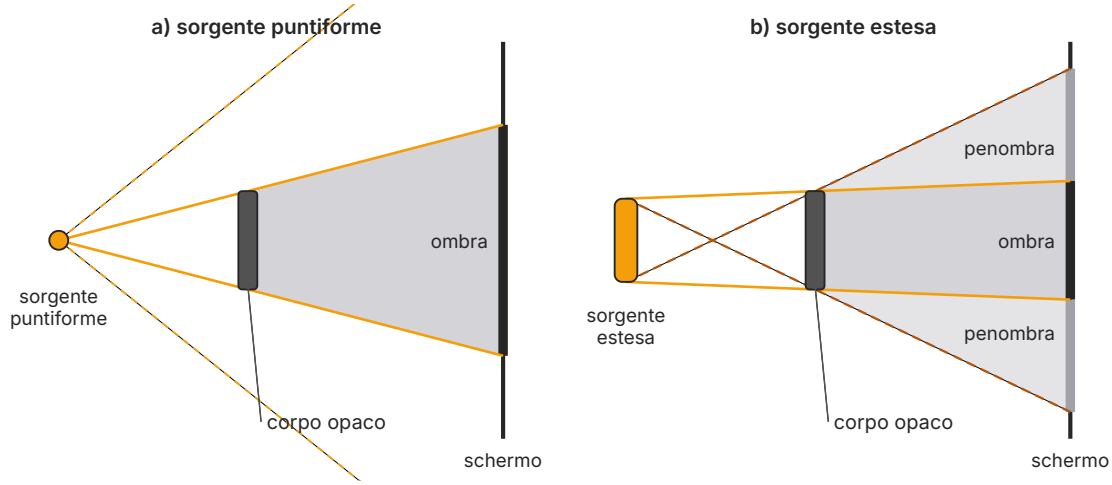


Figura 14.1 Ombra prodotta da un corpo opaco su uno schermo. a) Con una sorgente puntiforme i raggi che sfiorano i bordi del corpo delimitano un'ombra netta. b) Con una sorgente estesa le rette che congiungono i bordi corrispondenti della sorgente e del corpo (linee continue) delimitano l'ombra; le rette che congiungono i bordi opposti (tratteggiate) delimitano la penombra, illuminata solo da una parte della sorgente.

Una sorgente molto piccola rispetto alle distanze in gioco si tratta come un punto: una **sorgente puntiforme**. I raggi che sfiorano il contorno di un corpo opaco delimitano dietro di esso una regione senza luce, l'**ombra**, dal bordo netto (Figura 14.1, parte a). Con una **sorgente estesa**, come una lampada con un grande paralume o il Sole, le cose cambiano (Figura 14.1, parte b). Fra la zona buia e quella illuminata compare una fascia di transizione, la **penombra**, dai cui punti si vede solo una parte della sorgente. Le rette che uniscono i bordi della sorgente ai bordi del corpo **dalla stessa parte** delimitano l'ombra, quelle che li uniscono **incrociandosi** delimitano la penombra.

Le eclissi sono ombre su scala astronomica. In un'**eclissi di Sole** la Luna passa fra il Sole e la Terra: chi si trova nella sua ombra vede un'eclissi totale, chi si trova nella penombra, molto più estesa, un'eclissi parziale. In un'**eclissi di Luna** è la Luna a entrare nel cono d'ombra della Terra. Le eclissi totali di Sole sono possibili per una coincidenza: il Sole ha un diametro circa 400 volte maggiore di quello della Luna, ma è anche circa 400 volte più lontano, e i due dischi ci appaiono quasi della stessa grandezza.

14.1.4 La camera oscura

Una scatola chiusa con un piccolo foro su una parete e un foglio di carta da lucido sulla parete opposta è una **camera oscura** (Figura 14.2). Da ogni punto di un oggetto illuminato solo un sottile pennello di raggi passa dal foro e arriva in un punto preciso del fondo. I raggi si incrociano nel foro: quelli dalla cima dell'oggetto arrivano in basso, quelli dalla base in alto, e sul fondo si forma un'**immagine capovolta**.

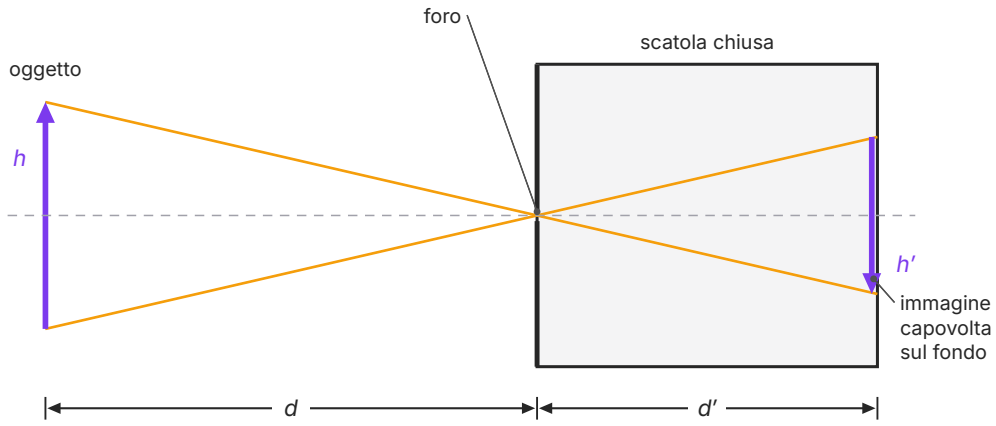


Figura 14.2 La camera oscura. I raggi che passano dal foro si incrociano e formano sul fondo un'immagine capovolta. I due triangoli che hanno il vertice nel foro sono simili, perciò $h'/h = d'/d$. Nel disegno $d'/d \approx 0{,}69$.

La grandezza dell'immagine si ricava con i triangoli simili. Detti h l'altezza dell'oggetto, d la sua distanza dal foro, h' l'altezza dell'immagine e d' la profondità della scatola, i due triangoli con il vertice nel foro hanno gli angoli uguali (sono opposti al vertice gli angoli nel foro e retti gli angoli alla base), quindi

$$\frac{h'}{h} = \frac{d'}{d}$$

Un albero alto 6,0 m a 15 m dal foro, in una scatola profonda 20 cm, dà un'immagine alta $h' = 6{,}0\ \text{m} \times 0{,}20\ \text{m} / 15\ \text{m} = 0{,}080\ \text{m} = 8{,}0\ \text{cm}$. Allargando il foro l'immagine diventa più luminosa ma meno nitida, perché ogni punto dell'oggetto illumina sul fondo una macchiolina più grande. La macchina fotografica nasce dalla camera oscura: al posto del foro c'è una lente, che raccoglie molta luce senza perdere nitidezza.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere i dati di una camera oscura

Problema. Una camera oscura a fondo scorrevole è puntata verso una lampada posta a $d = (1{,}20 \pm 0{,}01)$ m dal foro. Per cinque profondità d' si misura l'altezza h' dell'immagine, con un'incertezza di 0,1 cm. a) Verifica che h' è direttamente proporzionale a d'. b) Ricava l'altezza della lampada.

Tabella 14.1 Altezza dell'immagine al variare della profondità della scatola (dati tipici).

d' (cm)	h' (cm)	h'/d'
10,0	2,6	0,26
15,0	3,7	0,25
20,0	5,1	0,26
25,0	6,2	0,25
30,0	7,6	0,25

Lettura. a) Il rapporto h'/d' è costante entro le incertezze (per $d' = 10{,}0$ cm, 0,1 cm su 2,6 cm è circa il 4%, cioè 0,01 sul rapporto). In un grafico con d' in ascissa e h' in ordinata i punti stanno su una retta passante per l'origine (proporzionalità diretta, Fisica 1, capitolo 5), con pendenza circa 0,25.

Calcolo. b) La pendenza della retta è h/d. La retta per l'origine che si accorda meglio ai dati ha pendenza 0,252, quindi $h = 0{,}252 \times 1{,}20\ \text{m} \approx 0{,}30$ m: la lampada è alta circa 30 cm.

14.2 La velocità della luce

Quando accendi la luce, la stanza sembra illuminarsi tutta nello stesso istante: la luce impiega un tempo per arrivare alle pareti, ma piccolissimo. Nel vuoto viaggia alla velocità

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

Il valore è **esatto**, senza incertezza, perché dal 1983 è il metro a essere definito a partire dalla velocità della luce: come hai visto nel capitolo 2 di Fisica 1, il metro è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in 1/299 792 458 di secondo. Nell'aria la luce è più lenta di circa tre parti su diecimila; nell'acqua e nel vetro rallenta di più, e questo è all'origine della rifrazione (capitolo 15). Negli esercizi useremo $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m/s.

In un mezzo omogeneo la luce si muove di moto rettilineo uniforme, quindi il tempo che impiega a percorrere una distanza s è $\Delta t = s/c$. Sulla Terra questo tempo è quasi sempre trascurabile: 100 m si percorrono in circa 3×10^{-7} s. In astronomia, invece, le distanze si misurano spesso

in tempi di viaggio della luce. Un **anno luce** è la distanza che la luce percorre nel vuoto in un anno: circa $9{,}46 \times 10^{15}$ m. Attenzione: nonostante il nome, l'anno luce è una lunghezza, non un tempo.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto è vecchia la luce del Sole

Problema. La distanza media fra la Terra e il Sole è $1{,}496 \times 10^{11}$ m, quella fra la Terra e la Luna $3{,}84 \times 10^{8}$ m. Quanto tempo impiega la luce a percorrerle? Usa per c il valore esatto.

Calcolo. Sole: $\Delta t = s/c = 1{,}496 \times 10^{11}$ m / $(2{,}998 \times 10^{8}$ m/s) ≈ 499 s, cioè 8 min 19 s. Luna: $\Delta t = 3{,}84 \times 10^{8}$ m / $(3{,}00 \times 10^{8}$ m/s) ≈ 1,28 s.

Interpretazione. Il Sole che vedi è il Sole di oltre otto minuti fa: se si spegnesse all'improvviso, per otto minuti non ce ne accorgeremmo. Un segnale radio, che viaggia alla stessa velocità, raggiunge un astronauta sulla Luna in poco più di un secondo.

APPROFONDIMENTO

Come si è misurata la velocità della luce

Nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) Galileo descrive un esperimento per decidere se la luce si propaghi istantaneamente. Due persone con una lanterna si mettono a grande distanza; la prima scopre la sua lanterna, la seconda scopre la propria appena vede la luce dell'altra, e la prima misura il ritardo con cui vede tornare la luce. Galileo riferisce di averlo tentato a distanza di meno di un miglio senza osservare un ritardo, e conclude che la luce, se non istantanea, è velocissima. Il ritardo, su quella distanza, era infatti di circa dieci milionesimi di secondo, molto meno del tempo di reazione umano.

La prima prova che la velocità della luce è finita venne dall'astronomia. Nel 1676 il danese Ole Rømer, all'osservatorio di Parigi, notò che le eclissi di Io, il satellite di Giove che entra a intervalli regolari nell'ombra del pianeta, arrivavano in ritardo rispetto alle previsioni quando la Terra era più lontana da Giove, e in anticipo quando era più vicina: il ritardo era il tempo impiegato dalla luce a percorrere la distanza in più.

La prima misura sulla Terra fu realizzata nel 1849 dal francese Hippolyte Fizeau. Un fascio di luce passava fra due denti di una ruota dentata in rotazione, percorreva alcuni chilometri fino a uno specchio e tornava indietro: se nel frattempo la ruota aveva girato quanto basta perché al posto del varco ci fosse il dente successivo, la luce trovava la strada chiusa e veniva bloccata. Dalla velocità di rotazione, dal numero di denti e dalla distanza Fizeau ricavò un valore superiore di qualche punto percentuale a quello oggi accettato. L'esercizio 26 ti fa ricostruire il ragionamento.

14.3 La riflessione della luce

14.3.1 Le leggi della riflessione

Quando un raggio di luce incontra la superficie che separa due mezzi, una parte della luce torna indietro nel mezzo da cui proveniva: è la **riflessione**. Uno specchio, una superficie metallica molto levigata, riflette quasi tutta la luce che riceve; una lastra di vetro ne riflette una piccola parte, e di sera nella finestra vedi la tua immagine.

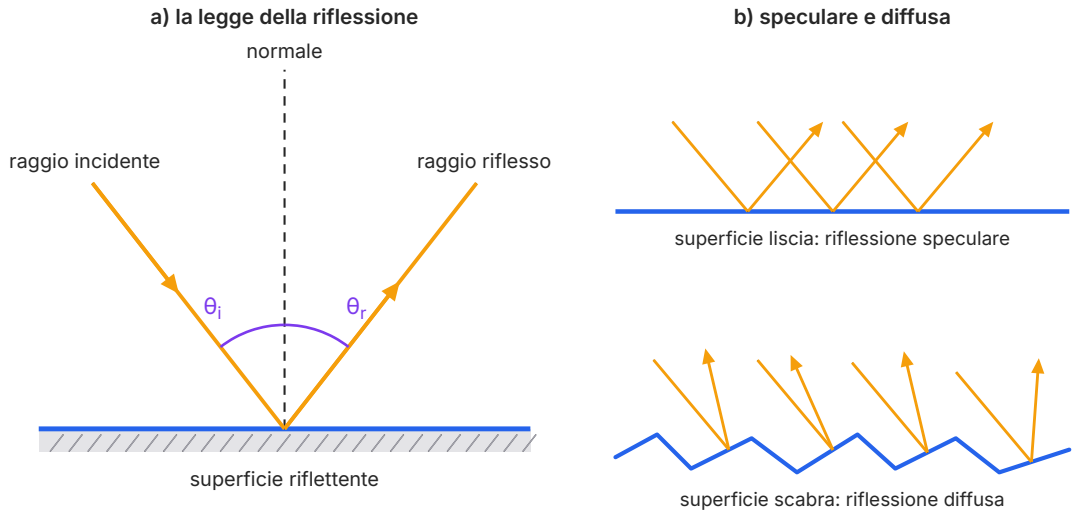


Figura 14.3 a) La legge della riflessione: il raggio incidente, la normale alla superficie nel punto di incidenza e il raggio riflesso stanno nello stesso piano, e l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza (nel disegno 38°). b) Su una superficie liscia raggi paralleli restano paralleli dopo la riflessione; su una superficie scabra ogni raggio rispetta la legge della riflessione rispetto alla normale locale, ma le normali hanno direzioni diverse e i raggi riflessi si sparpagliano.

Per descrivere la riflessione si traccia, nel punto in cui il raggio colpisce la superficie, la **normale**: la retta perpendicolare alla superficie in quel punto (Figura 14.3, parte a). L'**angolo di incidenza** θ_i è l'angolo fra il raggio incidente e la normale; l'**angolo di riflessione** θ_r è l'angolo fra il raggio riflesso e la normale. L'esperienza mostra che valgono due leggi.

1. **Prima legge.** Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie nel punto di incidenza stanno nello stesso piano.
2. **Seconda legge.** L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza: $\theta_r = \theta_i$.

Ne segue che il percorso della luce è **reversibile**: un raggio mandato all'indietro lungo il raggio riflesso torna lungo il raggio incidente. Per questo, se in uno specchio vedi gli occhi di un'altra

persona, anche lei vede i tuoi. Un raggio che incide lungo la normale ($\theta_i = 0$) viene riflesso su se stesso.

ERRORE FREQUENTE

Gli angoli di incidenza e di riflessione si misurano dalla **normale**, non dalla superficie. Se un raggio forma un angolo di 30° con la superficie di uno specchio, l'angolo di incidenza è 90° − 30° = 60°, non 30°. Per evitare l'errore, traccia sempre la normale prima di misurare qualunque angolo. La stessa regola varrà per la rifrazione, nel capitolo 15.

14.3.2 Riflessione speculare e diffusa

Su una superficie molto liscia, come uno specchio o l'acqua ferma di un lago, un fascio di raggi paralleli viene riflesso in un fascio ancora parallelo: è la **riflessione speculare**, che produce immagini nitide. La maggior parte delle superfici, però, è scabra su scala microscopica: un foglio di carta è un intreccio di fibre. Ogni raggio rispetta la legge della riflessione rispetto alla normale **nel punto in cui colpisce**, ma le normali hanno direzioni diverse da punto a punto, e i raggi riflessi partono in tutte le direzioni (Figura 14.3, parte b). È la **riflessione diffusa**.

Un oggetto non luminoso è visibile da qualunque posizione proprio perché ogni suo punto rinvia luce in tutte le direzioni. Una superficie perfettamente speculare, al contrario, non si vede: si vedono solo le immagini che riflette. Per questo una strada bagnata di notte è insidiosa: l'acqua rende l'asfalto speculare, la luce dei fari viene riflessa in avanti invece che verso il guidatore e la segnaletica quasi sparisce.

COLLEGAMENTI

Rimandare la luce da dove arriva

Specchi ad angolo retto. Un raggio che si riflette su due specchi perpendicolari, in un piano perpendicolare alla loro linea di contatto, torna indietro parallelo a se stesso qualunque sia l'angolo di arrivo. Con tre specchi perpendicolari, come l'angolo interno di un cubo, l'effetto vale per raggi da qualunque direzione.

Catarifrangenti. I catarifrangenti delle biciclette e le pellicole dei cartelli stradali usano minuscoli angoli di cubo o sferette di vetro per rimandare la luce dei fari verso l'auto da cui proviene: per il guidatore appaiono molto luminosi.

La distanza della Luna. Le missioni Apollo hanno lasciato sulla Luna pannelli di riflettori ad angolo di cubo. Alcuni osservatori vi puntano impulsi laser e misurano il tempo di andata e ritorno, circa 2,6 s, da cui ricavano la distanza Terra–Luna con una precisione che oggi arriva a pochi millimetri.

14.4 Lo specchio piano

14.4.1 L'immagine di un punto

In uno **specchio piano** vedi una persona identica a te che sembra stare dietro il vetro. Consideriamo un punto P di un oggetto davanti allo specchio (Figura 14.4). I raggi che partono da P vengono riflessi e divergono, ma i loro prolungamenti all'indietro, oltre lo specchio, si incontrano tutti in uno stesso punto P′. L'occhio non può sapere che i raggi hanno cambiato direzione: li interpreta come provenienti da P′, e vede lì il punto P.

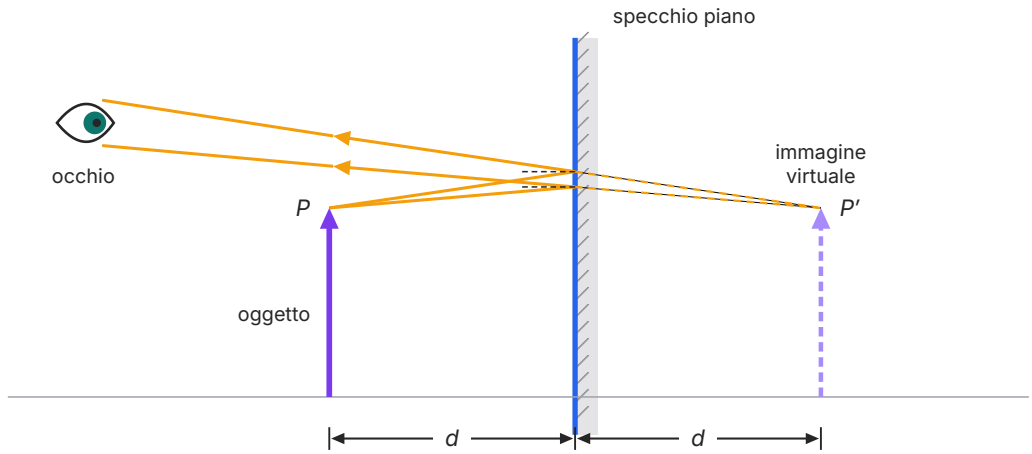


Figura 14.4 Costruzione dell'immagine in uno specchio piano. Due raggi partono dalla cima P dell'oggetto e, dopo la riflessione, entrano nell'occhio; i loro prolungamenti dietro lo specchio (tratteggiati) si incontrano in P′. L'immagine è virtuale, diritta, della stessa grandezza dell'oggetto e alla stessa distanza *d* dallo specchio.

Per costruire l'immagine bastano due raggi; il più comodo incide perpendicolarmente allo specchio e torna su se stesso. Con due triangoli rettangoli che hanno un cateto in comune e gli angoli uguali si dimostra che P′ è il **simmetrico** di P rispetto al piano dello specchio: sulla perpendicolare allo specchio per P, dall'altra parte, alla stessa distanza.

Nel punto P′ la luce non arriva: dietro lo specchio c'è il muro. Un'immagine formata dai **prolungamenti** dei raggi si chiama **immagine virtuale**: nessuno schermo la può raccogliere, ma la si può vedere o fotografare, perché l'occhio e l'obiettivo fanno convergere al loro interno i raggi divergenti. Quando invece i raggi si incontrano davvero in un punto si ha un'**immagine reale**, che uno schermo posto lì mostra. Lo specchio piano dà sempre immagini virtuali; gli specchi curvi possono darle anche reali.

DA RICORDARE

L'immagine di un oggetto in uno specchio piano è virtuale, diritta, della stessa grandezza dell'oggetto e simmetrica rispetto al piano dello specchio: si trova dietro lo specchio, alla stessa distanza a cui l'oggetto si trova davanti.

14.4.2 Destra e sinistra

Alza la mano destra davanti allo specchio: la persona riflessa alza la mano dalla stessa parte, che per una persona reale rivolta verso di te sarebbe la sinistra. Lo specchio sembra scambiare destra e sinistra, ma non alto e basso. Perché?

ERRORE FREQUENTE

«Lo specchio scambia la destra con la sinistra.» In realtà lo specchio piano non distingue fra le direzioni parallele alla sua superficie: un punto che sta a destra ha l'immagine a destra, un punto in alto ha l'immagine in alto. Ciò che viene invertito è soltanto la direzione **perpendicolare** allo specchio: la punta del tuo naso, che sta più vicino allo specchio della tua nuca, ha l'immagine più vicina allo specchio dell'immagine della nuca. L'immagine è quindi rovesciata «avanti–dietro». L'impressione dello scambio destra–sinistra nasce perché, per confrontarci con l'immagine, immaginiamo di girarci attorno a un asse verticale per metterci al suo posto. Per lo stesso motivo la scritta AMBULANZA è dipinta rovesciata sul cofano: chi la vede nello specchietto retrovisore la legge diritta.

14.4.3 Quanto deve essere alto uno specchio

ESEMPIO SVOLTO

Lo specchio a figura intera

Problema. Marta è alta 1,70 m e i suoi occhi sono a 1,58 m dal pavimento. Qual è l'altezza minima di uno specchio verticale in cui può vedersi per intero, e a che altezza deve trovarsi il suo bordo inferiore? La risposta dipende dalla distanza fra Marta e lo specchio?

Ragionamento. Il raggio che va dai piedi agli occhi si riflette a metà altezza fra piedi e occhi: i due triangoli rettangoli che hanno per ipotenusa il raggio incidente e quello riflesso hanno un cateto in comune (la distanza dallo specchio) e gli angoli uguali, quindi sono congruenti. Allo stesso modo il raggio che parte dalla cima della testa si riflette a metà fra la testa e gli occhi.

Calcolo. Bordo inferiore: 1,58 m / 2 = 0,79 m dal pavimento. Bordo superiore: a metà fra 1,58 m e 1,70 m, cioè a 1,64 m. Altezza dello specchio: 1,64 m − 0,79 m = 0,85 m, la metà esatta dell'altezza di Marta.

Controllo. Nel ragionamento la distanza fra Marta e lo specchio non compare mai: avvicinandosi o allontanandosi, Marta continua a vedersi per intero né più né meno.

14.4.4 Due specchi ad angolo

Due specchi che formano un angolo α danno più immagini di uno stesso oggetto, perché l'immagine data da uno specchio fa da oggetto per l'altro. Quando $360°/\alpha$ è un numero intero, le immagini sono $360°/\alpha - 1$: 3 con $\alpha = 90°$, 5 con $\alpha = 60°$. Con due specchi paralleli affacciati le immagini sono in teoria infinite: è l'effetto «corridoio» di certi ascensori.

14.5 Gli specchi sferici

14.5.1 Specchi concavi e convessi

In un cucchiaio lucido ti vedi capovolto nella parte interna, diritto e rimpicciolito in quella esterna. Gli specchi curvi più semplici sono gli **specchi sferici**, la cui superficie riflettente è una piccola calotta di una sfera. Se la superficie riflettente è quella interna della sfera, lo specchio è **concavo**; se è quella esterna, è **convesso**.

Gli elementi di uno specchio sferico sono quattro (Figura 14.5). Il **centro di curvatura** C è il centro della sfera di cui lo specchio fa parte, e il **raggio di curvatura** R è il raggio di quella sfera. Il **vertice** V è il punto centrale della calotta. La retta che passa per C e V è l'**asse ottico** dello specchio. Ogni retta per C è un raggio della sfera, perpendicolare alla superficie: in ogni punto dello specchio **la normale è la retta che congiunge quel punto con il centro C**, e le leggi della riflessione si applicano punto per punto.

14.5.2 Il fuoco

Un fascio di raggi paralleli all'asse ottico, per esempio la luce del Sole, dopo la riflessione su uno specchio concavo converge verso un punto dell'asse (Figura 14.5, parte a). Questo punto è il **fuoco** F dello specchio, e la sua distanza dal vertice è la **distanza focale** f. Il fuoco sta a metà strada fra il centro e il vertice:

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

La relazione vale per i **raggi parassiali**, cioè i raggi vicini all'asse e poco inclinati rispetto a esso. I raggi lontani dall'asse, dopo la riflessione, lo attraversano un po' più vicino allo specchio: nella Figura 14.5, parte a, il raggio più esterno incontra l'asse a circa il 9% della distanza focale prima di F. Un fascio largo non converge quindi in un solo punto e le immagini risultano un po' sfocate: è l'**aberrazione sferica**. Si riduce usando solo la parte centrale dello specchio, oppure con uno **specchio parabolico**, la cui superficie si ottiene facendo ruotare una parabola attorno al suo asse: fa convergere esattamente nel fuoco tutti i raggi paralleli all'asse. D'ora in poi supporremo i raggi parassiali.

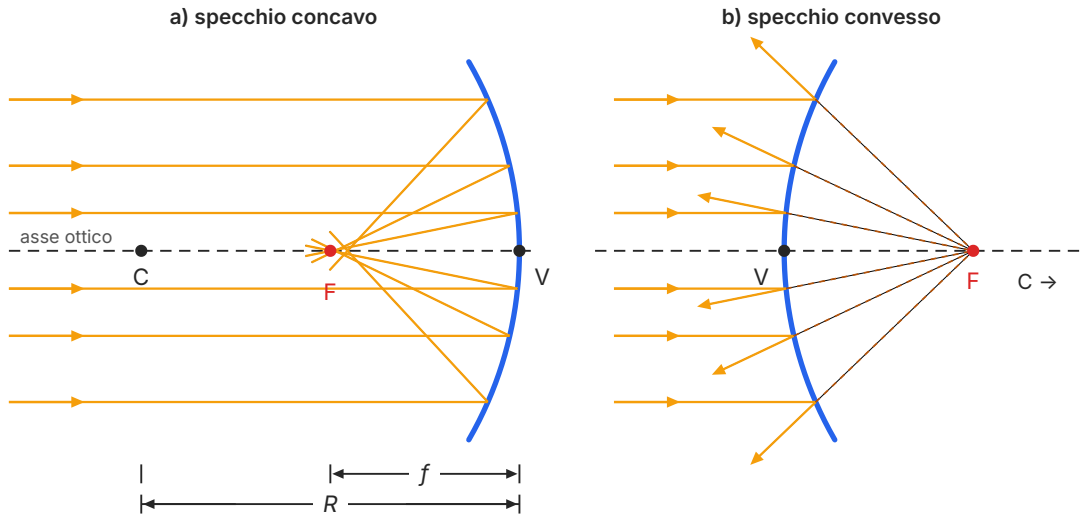


Figura 14.5 a) In uno specchio concavo i raggi paralleli all'asse ottico, dopo la riflessione, convergono nel fuoco F, a metà fra il centro C e il vertice V. Le traiettorie sono calcolate con la legge della riflessione: i raggi più lontani dall'asse lo attraversano un po' prima di F (aberrazione sferica). b) In uno specchio convesso i raggi paralleli all'asse divergono dopo la riflessione, come se provenissero dal fuoco F, che si trova dietro lo specchio (prolungamenti tratteggiati, approssimazione dei raggi parassiali).

In uno specchio convesso i raggi paralleli all'asse divergono dopo la riflessione (Figura 14.5, parte b), ma i loro prolungamenti passano per un punto dietro lo specchio, a metà fra vertice e centro: è un **fuoco virtuale**, e anche qui $|f| = |R|/2$.

Per la reversibilità, una sorgente posta nel fuoco di uno specchio concavo produce un fascio di raggi paralleli all'asse.

COLLEGAMENTI

Specchi curvi intorno a noi

Fari e torce. In molti fari la sorgente è nel fuoco di uno specchio parabolico, che ne trasforma la luce in un fascio quasi parallelo.

Telescopi e antenne. I grandi telescopi usano specchi concavi per raccogliere la luce debolissima delle stelle e concentrarla nel fuoco; le antenne paraboliche fanno lo stesso con le onde radio dei satelliti.

Specchi da trucco e da dentista. Uno specchio concavo con il viso più vicino del fuoco dà un'immagine diritta e ingrandita: è il principio degli specchi per il trucco e di quello del dentista.

Specchi di sorveglianza. Gli specchi convessi agli incroci e nei negozi mostrano una zona molto ampia, con immagini rimpicciolite; per lo stesso motivo molti retrovisori esterni delle auto sono leggermente curvi.

14.5.3 I tre raggi principali

Per trovare l'immagine di un punto bastano due raggi, e conviene usare quelli il cui percorso si conosce senza misurare angoli, i tre **raggi principali**:

1. il raggio **parallelo all'asse** viene riflesso passando per il fuoco F (in uno specchio convesso, il suo prolungamento passa per F);
2. il raggio che **passa per il fuoco** (o, nello specchio convesso, che è diretto verso il fuoco) viene riflesso parallelo all'asse;
3. il raggio che **passa per il centro** C (o è diretto verso C) colpisce lo specchio lungo la normale e torna indietro su se stesso.

Il secondo è il primo percorso al contrario; il terzo segue dal fatto che le rette per C sono normali allo specchio. Utile è anche il raggio che colpisce il vertice V, dove la normale è l'asse: il raggio riflesso è simmetrico di quello incidente rispetto all'asse.

14.5.4 Le immagini di uno specchio concavo

Come oggetto usiamo una freccia verticale appoggiata sull'asse: la base ha l'immagine sull'asse, e basta trovare l'immagine della punta con due raggi principali (il terzo fa da controllo). Nella Figura 14.6, parte a l'oggetto è più lontano dallo specchio del centro C: i raggi riflessi si incon-

trano davvero fra C e F, in un'immagine **reale**, **capovolta** e **rimpicciolita**. Avvicinando l'oggetto, l'immagine si allontana dallo specchio e si ingrandisce: quando l'oggetto è in C l'immagine coincide con esso, capovolta e della stessa grandezza; quando l'oggetto sta fra C e F l'immagine reale si forma oltre C ed è ingrandita.

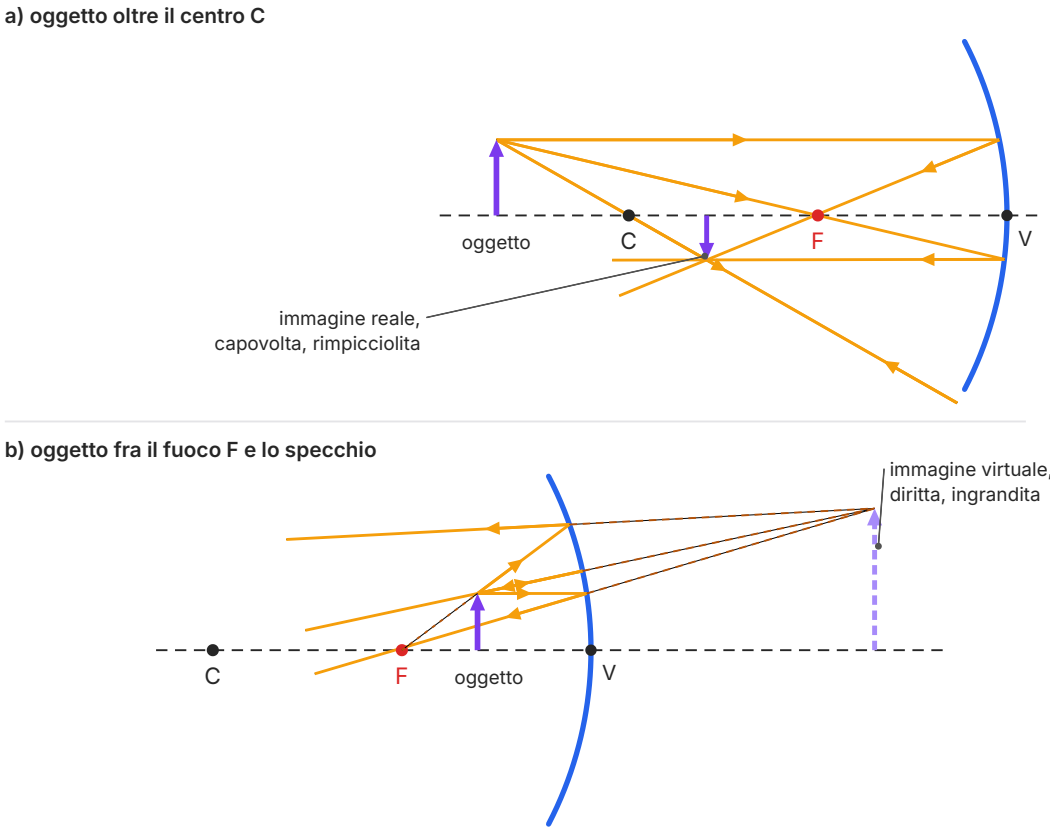


Figura 14.6 Costruzione delle immagini di uno specchio concavo con i tre raggi principali; posizioni calcolate con f = 100 unità del disegno. a) Oggetto a 270 unità dal vertice, oltre C: l'immagine è reale, capovolta e rimpicciolita, a 159 unità dal vertice (ingrandimento −0,59). b) Oggetto a 60 unità, fra F e lo specchio: i raggi riflessi divergono e i loro prolungamenti (tratteggiati) formano dietro lo specchio un'immagine virtuale, diritta e ingrandita 2,5 volte, a 150 unità dal vertice.

Con l'oggetto nel fuoco i raggi riflessi escono paralleli e non si forma alcuna immagine. Se infine l'oggetto è fra il fuoco e lo specchio (Figura 14.6, parte b), i raggi riflessi divergono: un osservatore che li riceve vede, dietro lo specchio, un'immagine **virtuale**, **diritta** e **ingrandita**. È il caso dello specchio da trucco. La Tabella 14.2 riassume tutti i casi.

Tabella 14.2 Immagini date da uno specchio sferico di un oggetto reale (distanze dal vertice; $f = |R|/2$).

Specchio e posizione dell'oggetto	Posizione dell'immagine	Caratteristiche
concavo, oggetto oltre C ($p > 2f$)	fra F e C	reale, capovolta, rimpicciolita
concavo, oggetto in C ($p = 2f$)	in C	reale, capovolta, stessa grandezza
concavo, oggetto fra C e F ($f < p < 2f$)	oltre C	reale, capovolta, ingrandita
concavo, oggetto in F ($p = f$)	nessuna immagine (raggi riflessi paralleli)	—
concavo, oggetto fra F e V ($p < f$)	dietro lo specchio	virtuale, diritta, ingrandita
convesso, qualunque posizione	dietro lo specchio, fra V e F	virtuale, diritta, rimpicciolita

14.5.5 Le immagini di uno specchio convesso

Con uno specchio convesso i raggi riflessi divergono sempre e si usano i loro prolungamenti, che si incontrano dietro lo specchio, fra il vertice e il fuoco (Figura 14.7). Per qualunque posizione di un oggetto reale l'immagine è **virtuale, diritta e rimpicciolita**, tanto più piccola quanto più l'oggetto è lontano; in compenso lo specchio raccoglie raggi da un angolo molto ampio.

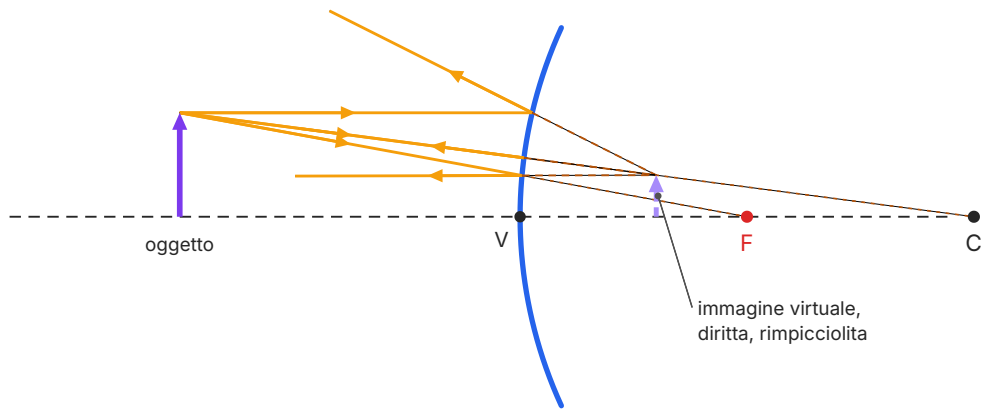


Figura 14.7 Costruzione dell'immagine in uno specchio convesso ($f = -120$ unità del disegno, oggetto a 180 unità dal vertice). I prolungamenti dei raggi riflessi (tratteggiati) si incontrano dietro lo specchio, a 72 unità dal vertice: l'immagine è virtuale, diritta e rimpicciolita (ingrandimento 0,40).

14.6 L'equazione dei punti coniugati

14.6.1 Dalla geometria a una formula

Per calcolare dove si forma l'immagine si usa una relazione fra tre distanze misurate dal vertice: la distanza p dell'oggetto, la distanza q dell'immagine e la distanza focale f. Un punto e la sua immagine si dicono **punti coniugati**. Con raggi parassiali lo specchio, vicino all'asse, si confonde con il piano perpendicolare all'asse nel vertice, e i raggi si possono considerare riflessi su quel piano.

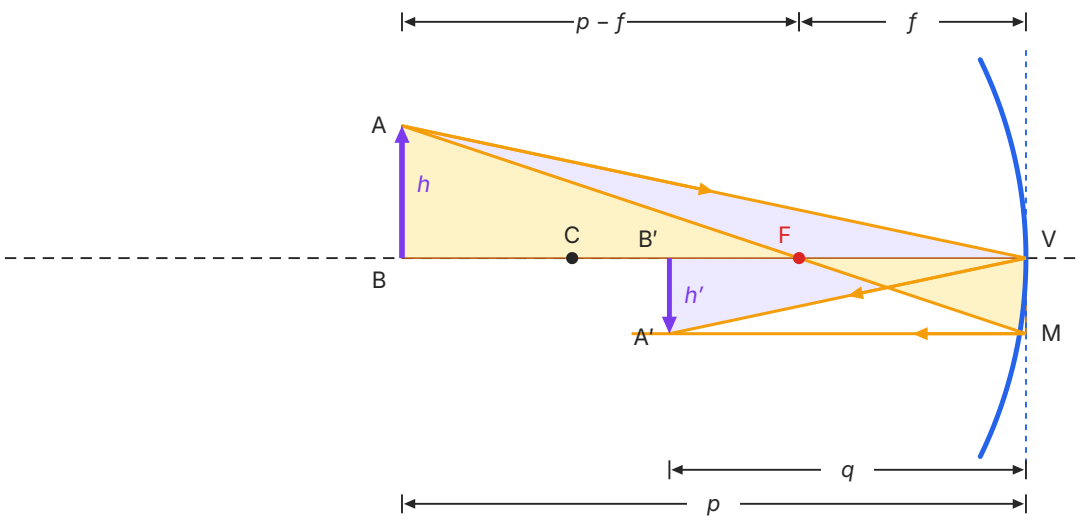


Figura 14.8 Dimostrazione dell'equazione dei punti coniugati per uno specchio concavo con l'oggetto oltre C (f = 120, p = 330 unità del disegno). I triangoli violetti, con il vertice in V, sono simili e danno $h'/h = q/p$; i triangoli arancioni, con il vertice in F, sono simili e danno $h'/h = f/(p - f)$. Nell'approssimazione dei raggi parassiali lo specchio è sostituito dal piano tangente in V (tratteggiato).

Riprendiamo il caso dell'oggetto AB oltre il centro, alto h, e della sua immagine reale A′B′, alta h' (Figura 14.8). Usiamo due raggi che partono da A.

1. Il raggio che colpisce lo specchio nel vertice V viene riflesso simmetricamente rispetto all'asse. I triangoli rettangoli ABV e A′B′V hanno quindi gli angoli in V uguali, e sono simili: $\frac{h'}{h} = \frac{q}{p}$.
2. Il raggio che passa per F incontra lo specchio (cioè il piano tangente in V) nel punto M e viene riflesso parallelo all'asse: M si trova quindi alla stessa distanza h' dall'asse dell'imma-

gine A′. I triangoli rettangoli ABF e MVF hanno gli angoli in F opposti al vertice, quindi uguali, e sono simili: $\frac{h'}{h} = \frac{f}{p-f}$.

Uguagliando i due rapporti si ottiene $q/p = f/(p-f)$, cioè $q(p-f) = pf$, e quindi $pq = pf + qf$. Dividendo entrambi i membri per il prodotto pqf si arriva all'**equazione dei punti coniugati**, o equazione degli specchi:

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

Ricavata per un caso particolare, con una opportuna convenzione sui segni vale in tutti i casi, per specchi concavi e convessi. Scambiando p e q non cambia nulla: per la reversibilità, un oggetto in A′ ha l'immagine in A.

14.6.2 Segni e ingrandimento

Useremo questa convenzione, che varrà anche per le lenti (capitolo 16):

- $p > 0$ per un oggetto reale, davanti allo specchio (è sempre il nostro caso);
- $q > 0$ se l'immagine è reale, davanti allo specchio; $q < 0$ se l'immagine è virtuale, dietro lo specchio;
- $f > 0$ per uno specchio concavo, $f < 0$ per uno specchio convesso, con $|f| = |R|/2$.

Il rapporto fra l'altezza dell'immagine e quella dell'oggetto è l'**ingrandimento lineare** G. Contando come positive le altezze sopra l'asse e negative quelle sotto, dal primo paio di triangoli simili si ottiene, con il segno giusto,

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

Il segno di G dice se l'immagine è diritta ($G > 0$) o capovolta ($G < 0$); il valore assoluto dice se è ingrandita ($|G| > 1$) o rimpicciolita ($|G| < 1$). Poiché $p > 0$, le immagini reali ($q > 0$) di uno specchio sono sempre capovolte, quelle virtuali sempre diritte. Lo specchio piano rientra nella formula come specchio con raggio di curvatura infinito: $1/f = 0$, quindi $q = -p$ e $G = 1$.

ESEMPIO SVOLTO

Uno specchio concavo, due posizioni

Problema. Uno specchio concavo ha raggio di curvatura $R = 40$ cm. Trova posizione, ingrandimento e caratteristiche dell'immagine di un oggetto alto 3,0 cm posto a) a 60 cm dal vertice; b) a 10 cm dal vertice.

Dati e convenzione. Specchio concavo: $f = R/2 = +20$ cm. Oggetto reale: $p > 0$.

Calcolo. a) $1/q = 1/f - 1/p = 1/(20\text{ cm}) - 1/(60\text{ cm}) = 2/(60\text{ cm})$, quindi $q = +30$ cm. $G = -q/p = -30/60 = -0{,}50$; $h' = Gh = -1{,}5$ cm. Immagine reale (davanti allo specchio, a 30 cm), capovolta, rimpicciolita, alta 1,5 cm. b) $1/q = 1/(20\text{ cm}) - 1/(10\text{ cm}) = -1/(20\text{ cm})$, quindi $q = -20$ cm. $G = -(-20)/10 = +2{,}0$; $h' = +6{,}0$ cm. Immagine virtuale (20 cm dietro lo specchio), diritta, ingrandita, alta 6,0 cm.

Controllo. In a) l'oggetto è oltre C e l'immagine cade fra F e C: è la prima riga della Tabella 14.2. In b) l'oggetto è fra F e il vertice: è la quinta riga.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la riflessione e la distanza focale di uno specchio concavo

Materiali. Uno specchio piano; un goniometro stampato su un foglio (risoluzione 1°); un puntatore laser di classe 2; uno specchio concavo, uno schermo di cartoncino e un LED o una candela su supporti; un metro a nastro (sensibilità 1 mm).

Procedimento. 1) *Legge della riflessione.* Si appoggia lo specchio sul diametro del goniometro, perpendicolare al foglio, e si invia il laser radente al foglio verso il centro con angoli di incidenza da 10° a 70°: in tutte le prove l'angolo di riflessione coincide con quello di incidenza entro ±1°, l'incertezza di lettura. 2) *Distanza focale da un oggetto lontano.* Si punta lo specchio concavo verso una finestra a circa 8 m e si sposta lo schermo finché l'immagine della finestra è nitida: f_{fin} = (15,3 ± 0,3) cm, dove l'incertezza è la semiampiezza dell'intervallo di nitidezza. 3) *Punti coniugati.* Si pone il LED a sei distanze p oltre il fuoco e si cerca ogni volta la posizione q dello schermo con l'immagine nitida.

Tabella 14.3 Distanze dell'oggetto e dell'immagine per uno specchio concavo; incertezza ±0,2 cm su p, ±0,5 cm su q (dati tipici).

p (cm)	q (cm)	$1/p + 1/q$ (cm^{-1})	$f = pq/(p+q)$ (cm)
20,0	61,0	0,0664	15,1
25,0	37,0	0,0670	14,9
30,0	30,8	0,0658	15,2
40,0	23,5	0,0676	14,8
50,0	21,8	0,0659	15,2
70,0	18,7	0,0678	14,8

Che cosa concludere. La somma $1/p + 1/q$ resta costante entro circa l'1,5%, come prevede l'equazione dei punti coniugati. La media dei sei valori di f è 14,99 cm, con semidispersione massima 0,22 cm: f = (15,0 ± 0,2) cm. Il valore ottenuto con la finestra, (15,3 ± 0,3) cm, è compatibile, perché la differenza, 0,3 cm, è minore della somma delle incertezze, 0,5 cm. È però un po' più grande per un motivo sistematico: la finestra non è all'infinito, e con un oggetto a 8 m l'equazione dà q = 15,3 cm. Il metodo della finestra sovrastima sempre f.

Sicurezza. Non puntare mai il laser verso gli occhi, neppure dopo una riflessione: controlla dove va il fascio riflesso. Usa solo puntatori di classe 2. Tieni capelli e fogli lontani dalla fiamma.

Per la relazione. Secondo lo schema di Fisica 1, capitolo 5, riporta: la tabella degli angoli di incidenza e di riflessione con le incertezze; la tabella di p e q; il grafico di $1/q$ in funzione di $1/p$,

che deve essere una retta di pendenza −1 con intercetta $1/f$; il valore di f con la sua incertezza ricavato dalla tabella e quello ricavato dal grafico; il confronto con f_{fin} e la discussione della sua compatibilità. Discuti gli errori sistematici: distanza finita della finestra, scelta del punto di massima nitidezza, posizione del vertice rispetto al supporto.

IN SINTESI

Le formule della riflessione

$c = 299\,792\,458$ m/s (esatto) $\approx 3{,}00 \times 10^8$ m/s — velocità della luce nel vuoto; il tempo di percorrenza di una distanza s è $\Delta t = s/c$.

$h'/h = d'/d$ — camera oscura: l'immagine, capovolta, sta all'oggetto come la profondità della scatola sta alla distanza dell'oggetto dal foro.

$\theta_r = \theta_i$ — legge della riflessione: angoli (in gradi) misurati dalla normale; raggio incidente, raggio riflesso e normale stanno nello stesso piano.

Specchio piano: immagine virtuale, diritta, della stessa grandezza dell'oggetto, simmetrica rispetto allo specchio.

$f = R/2$ — distanza focale (m o cm) di uno specchio sferico di raggio di curvatura R, per raggi parassiali; $f > 0$ concavo, $f < 0$ convesso.

$1/p + 1/q = 1/f$ — equazione dei punti coniugati: p distanza dell'oggetto, q distanza dell'immagine dal vertice, nella stessa unità; $q > 0$ immagine reale, $q < 0$ immagine virtuale.

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

SINTESI

- Le sorgenti primarie emettono luce propria; le sorgenti secondarie rinviano la luce che ricevono. I mezzi possono essere trasparenti, traslucidi od opachi.
- L'ottica geometrica descrive la luce con i raggi; è valida quando gli oggetti e le aperture sono molto più grandi della lunghezza d'onda della luce.
- In un mezzo omogeneo la luce si propaga in linea retta: lo dimostrano le ombre, nette con una sorgente puntiforme e circondate dalla penombra con una sorgente estesa, e le eclissi.
- La camera oscura forma un'immagine capovolta; per i triangoli simili $h'/h = d'/d$.
- Nel vuoto la luce viaggia a $c = 299\,792\,458$ m/s, valore esatto che definisce il metro; la luce del Sole impiega circa 8 min 19 s per arrivare sulla Terra. L'anno luce è una distanza.
- Leggi della riflessione: raggio incidente, raggio riflesso e normale stanno nello stesso piano, e $\theta_r = \theta_i$, con gli angoli misurati dalla normale. Il cammino della luce è reversibile.
- Le superfici lisce danno riflessione speculare; quelle scabre riflessione diffusa, grazie alla quale vediamo gli oggetti non luminosi.
- Lo specchio piano dà un'immagine virtuale, diritta, della stessa grandezza, simmetrica dell'oggetto rispetto allo specchio; non scambia destra e sinistra, ma avanti e dietro. Per vedersi per intero basta uno specchio alto metà della propria altezza.
- Un'immagine reale è formata dai raggi e si può raccogliere su uno schermo; un'immagine virtuale è formata dai prolungamenti dei raggi e non si può proiettare.
- In uno specchio sferico la normale in ogni punto passa per il centro C; i raggi parassiali paralleli all'asse convergono (concavo) o sembrano divergere (convesso) dal fuoco F, con $f = R/2$. Lontano dall'asse compare l'aberrazione sferica, eliminata dagli specchi parabolici.
- Le immagini si costruiscono con i raggi principali (parallelo all'asse, per il fuoco, per il centro). Lo specchio concavo dà immagini reali e capovolte se l'oggetto è oltre F, virtuali, diritte e ingrandite se è fra F e lo specchio; lo specchio convesso dà sempre immagini virtuali, diritte e rimpicciolite.
- Equazione dei punti coniugati $1/p + 1/q = 1/f$ e ingrandimento $G = -q/p$, con $f > 0$ per lo specchio concavo, $f < 0$ per il convesso, $q < 0$ per le immagini virtuali.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale di questi corpi è una sorgente di luce secondaria?
   - **A.** il Sole
   - **B.** una lampadina accesa
   - **C.** la Luna
   - **D.** la fiamma di una candela

2. ● L'angolo di riflessione è l'angolo fra il raggio riflesso e:
   - **A.** la superficie riflettente
   - **B.** la normale alla superficie nel punto di incidenza
   - **C.** il raggio incidente
   - **D.** l'asse ottico

3. ● Un vetro smerigliato, che lascia passare la luce ma non permette di vedere nitidamente gli oggetti che stanno dietro, è un mezzo:
   - **A.** trasparente
   - **B.** opaco
   - **C.** traslucido
   - **D.** speculare

4. ● L'immagine di un oggetto data da uno specchio piano è:
   - **A.** virtuale, diritta e della stessa grandezza dell'oggetto
   - **B.** reale, capovolta e della stessa grandezza
   - **C.** virtuale, capovolta e rimpicciolita
   - **D.** reale, diritta e ingrandita

5. ●● Sei davanti a uno specchio piano e ti allontani di 1 m. La distanza fra te e la tua immagine aumenta di:
   - **A.** 0,5 m
   - **B.** 1 m
   - **C.** 2 m
   - **D.** 4 m

6. ● Uno specchio concavo ha raggio di curvatura 30 cm. La sua distanza focale è:
   - **A.** 7,5 cm
   - **B.** 15 cm
   - **C.** 30 cm
   - **D.** 60 cm

7. ●● Uno specchio convesso, di un oggetto reale, dà sempre un'immagine:
   - **A.** reale e capovolta
   - **B.** reale e diritta
   - **C.** virtuale e capovolta
   - **D.** virtuale, diritta e rimpicciolita

8. ●● Un oggetto è posto nel centro di curvatura C di uno specchio concavo. La sua immagine è:
   A. in C, reale, capovolta, della stessa grandezza
   B. nel fuoco, reale e rimpicciolita
   C. dietro lo specchio, virtuale e diritta
   D. all'infinito: non si forma nessuna immagine

9. ●●● Un corpo opaco è illuminato da una sorgente estesa. Se avvicini lo schermo al corpo, la fascia di penombra sullo schermo:
   A. si allarga
   B. resta della stessa larghezza
   C. scompare del tutto, a qualunque distanza dal corpo
   D. si restringe

Vero o falso

10. ● La luce del Sole impiega circa 8 minuti per arrivare sulla Terra. V / F

11. ● In una riflessione diffusa i raggi non rispettano la legge della riflessione. V / F

12. ●● Un'immagine virtuale si può raccogliere su uno schermo posto nel punto in cui si forma. V / F

13. ●● Uno specchio piano scambia la destra con la sinistra, ma non l'alto con il basso. V / F

14. ●● Per vederti per intero in uno specchio piano verticale ti basta uno specchio alto metà della tua altezza, a qualunque distanza tu ti trovi. V / F

Applicare

15. ● La distanza media fra la Terra e la Luna è $3{,}84 \times 10^8$ m. Quanto tempo impiega la luce riflessa dalla Luna per arrivare sulla Terra?

16. ● Un raggio di luce colpisce uno specchio piano con un angolo di incidenza di 35°. Quanto vale l'angolo di riflessione? Quale angolo formano fra loro il raggio incidente e il raggio riflesso? E quale angolo forma il raggio riflesso con la superficie dello specchio?

17. ● Un raggio forma un angolo di 25° con la superficie di uno specchio piano. Quanto valgono l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione?

18. ● Un palazzo alto 24 m si trova a 60 m dal foro di una camera oscura profonda 25 cm. Quanto è alta la sua immagine sul fondo?

19. ●● Uno specchio concavo ha raggio di curvatura 50 cm. Un oggetto è posto a 75 cm dal vertice. Calcola la distanza focale, la posizione dell'immagine e l'ingrandimento, e descrivi l'immagine.

20. ●● Completa: in uno specchio convesso il fuoco si trova _____ lo specchio, e nella convenzione di questo libro la distanza focale è _____ ; le immagini di oggetti reali sono sempre _____ , diritte e _____ .

21. ●● Un oggetto si trova a 30 cm da uno specchio concavo con distanza focale 20 cm. Usando la Tabella 14.2, prevedi senza calcoli dove si forma l'immagine e com'è; poi verifica la previsione con l'equazione dei punti coniugati e calcola l'ingrandimento.

22. ●● La stella più vicina al Sole, Proxima Centauri, dista circa $4{,}0 \times 10^{16}$ m. Esprimi la distanza in anni luce (1 anno luce = $9{,}46 \times 10^{15}$ m). Quando osservi Proxima Centauri, quanto è «vecchia» la luce che vedi?

Problemi

23. ●●● Uno specchio da trucco concavo dà del viso, posto a 15 cm dal vertice, un'immagine diritta e ingrandita 3 volte. Calcola la posizione dell'immagine, la distanza focale e il raggio di curvatura dello specchio. L'immagine è reale o virtuale?

24. ●● Uno specchio convesso di sorveglianza, a un incrocio, ha raggio di curvatura 1,20 m. Un'auto alta 1,5 m si trova a 10 m dallo specchio. Dove si forma l'immagine, quanto è alta e com'è?

25. ●● Due specchi piani formano un angolo di 90°. Quante immagini di una moneta posta fra i due specchi vedi? E se l'angolo diventa 60°, o 45°? Con quale angolo vedresti 11 immagini?

26. ●●● In un esperimento sul modello di quello di Fizeau, una ruota con 500 denti e 500 vani uguali è attraversata da un fascio di luce, che va fino a uno specchio distante 5,00 km e torna indietro. La luce di ritorno viene bloccata per la prima volta quando, durante il viaggio di andata e ritorno, la ruota gira di metà dell'intervallo fra un dente e il successivo, cioè di 1/1000 di giro. a) Quanto dura il viaggio di andata e ritorno? b) Con quale frequenza, in giri al secondo e in giri al minuto, deve ruotare la ruota? c) Quanto vale la sua velocità angolare (capitolo 3)?

27. ●●● Uno specchio concavo con distanza focale 12 cm forma su uno schermo, a 60 cm dal vertice, l'immagine nitida di un oggetto alto 2,0 cm. a) A che distanza dallo specchio si trova l'oggetto? b) Quanto è alta l'immagine, ed è diritta o capovolta? c) Se l'oggetto viene allontanato di 3,0 cm, di quanto e in che verso bisogna spostare lo schermo per avere di nuovo un'immagine nitida?

28. ●● La Luna ha un diametro di $3{,}47 \times 10^6$ m e dista dalla Terra $3{,}84 \times 10^8$ m; il Sole ha un diametro di $1{,}39 \times 10^9$ m. A che distanza dalla Terra dovrebbe trovarsi il Sole per apparirci esattamente grande quanto la Luna? Confronta il risultato con la distanza reale, $1{,}496 \times 10^{11}$ m, e spiega che cosa c'entra con le eclissi totali di Sole.

29. ●●● Luca cammina verso uno specchio piano verticale a 1,2 m/s, in direzione perpendicolare allo specchio. a) Con quale velocità si muove la sua immagine rispetto allo specchio? b) Con quale velocità si avvicinano Luca e la sua immagine (velocità relativa, capitolo 1)? c) Se all'inizio Luca è a 3,0 m dallo specchio, dopo quanto tempo la distanza fra lui e la sua immagine è 2,4 m?

Ragionare e argomentare

30. ●● Sul cofano delle ambulanze la scritta AMBULANZA è dipinta rovesciata. Spiega perché, usando le proprietà dell'immagine data da uno specchio piano.

31. ●●● Trova l'errore. «Uno specchio convesso ha raggio di curvatura 40 cm e un oggetto è a 30 cm dal vertice. Allora $f = 20$ cm, $1/q = 1/20 - 1/30 = 1/60$ e $q = 60$ cm: l'immagine è reale, 60 cm davanti allo specchio.» Correggi il procedimento e descrivi l'immagine corretta.

32. ● Progetta un esperimento per mostrare che la luce si propaga in linea retta, usando una candela o una piccola lampada, tre cartoncini con un forellino al centro e un filo. Che cosa ti aspetti di osservare se i tre fori sono allineati, e che cosa se ne sposti uno?

PER APPROFONDIRE

- [GAL] G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*: nella Giornata prima, la proposta dell'esperimento delle lanterne per misurare la velocità della luce.
- [HEC] E. Hecht, *Optics*: i capitoli sull'ottica geometrica, con una trattazione completa della riflessione e degli specchi sferici.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo sulle proprietà della luce e sulla riflessione, ricco di esempi quotidiani.
- [QED] R. P. Feynman, *QED. La strana teoria della luce e della materia*: un fisico racconta, senza formule, perché la luce sembra seguire le leggi della riflessione.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle immagini, con molti problemi sugli specchi.

Glossario del capitolo

Aberrazione sferica
Difetto degli specchi sferici per cui i raggi paralleli lontani dall'asse non convergono esattamente nel fuoco; gli specchi parabolici ne sono privi.

Angolo di incidenza
Angolo fra il raggio incidente e la normale alla superficie; per la legge della riflessione è uguale all'angolo di riflessione.

Anno luce
Distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno, circa $9{,}46 \times 10^{15}$ m: è una lunghezza, non un tempo.

Camera oscura
Scatola chiusa con un piccolo foro, che forma sulla parete opposta un'immagine capovolta degli oggetti esterni.

Equazione dei punti coniugati
Relazione $1/p + 1/q = 1/f$ fra le distanze dell'oggetto e dell'immagine dal vertice e la distanza focale di uno specchio.

Fuoco
Punto dell'asse ottico in cui convergono (o da cui sembrano divergere) i raggi parassiali paralleli all'asse dopo la riflessione; per uno specchio sferico dista $f = R/2$ dal vertice.

Immagine reale
Immagine formata dai raggi stessi, che vi convergono davvero; si può raccogliere su uno schermo.

Immagine virtuale
Immagine formata dai prolungamenti dei raggi; non si può raccogliere su uno schermo.

Ingrandimento lineare
Rapporto $G = h'/h = -q/p$ fra l'altezza dell'immagine e quella dell'oggetto; negativo per le immagini capovolte.

Mezzo trasparente
Mezzo che si lascia attraversare dalla luce senza disperderla, permettendo di vedere nitidamente ciò che sta dietro; un mezzo traslucido la lascia passare sparpagliandola, uno opaco non la lascia passare.

Normale
Retta perpendicolare alla superficie nel punto in cui il raggio la colpisce; da essa si misurano gli angoli di incidenza e di riflessione.

Ombra
Regione dietro un corpo opaco in cui non arriva luce da nessun punto della sorgente.

Ottica geometrica
Studio della luce per mezzo dei raggi luminosi; vale quando gli oggetti e le aperture sono molto più grandi della lunghezza d'onda della luce.

Penombra
Regione, ai bordi dell'ombra, illuminata solo da una parte di una sorgente estesa.

Raggio luminoso
Linea orientata che rappresenta la direzione di propagazione della luce nel modello dell'ottica geometrica.

Riflessione
Ritorno della luce nel mezzo da cui proviene quando incontra la superficie di separazione con un altro mezzo.

Riflessione diffusa
Riflessione su una superficie scabra, che rinvia in tutte le direzioni un fascio di raggi paralleli; permette di vedere gli oggetti non luminosi.

Sorgente primaria
Corpo che emette luce propria, come il Sole, una fiamma o una lampadina accesa.

Sorgente secondaria
Corpo che non emette luce propria ma rinvia una parte della luce che riceve, come la Luna o un muro illuminato.

Specchio sferico
Specchio la cui superficie è una calotta sferica; è concavo se riflette dalla parte interna, convesso se dalla parte esterna.

Soluzioni

1. C. La Luna non emette luce propria: rinvia la luce del Sole.

2. B. Gli angoli di incidenza e di riflessione si misurano dalla normale.

3. C. Un mezzo traslucido lascia passare la luce ma la sparpaglia.

4. A. L'immagine è simmetrica dell'oggetto rispetto allo specchio.

5. C. Tu ti allontani di 1 m dallo specchio e la tua immagine, simmetrica, si allontana di 1 m dall'altra parte: la distanza fra voi cresce di 2 m.

6. B. $f = R/2 = 30\text{ cm} / 2 = 15\text{ cm}$.

7. D. È l'ultima riga della tabella che riassume le immagini degli specchi sferici, nel paragrafo sugli specchi sferici.

8. A. Con $p = 2f$: $1/q = 1/f - 1/(2f) = 1/(2f)$, quindi $q = 2f$ e $G = -1$.

9. D. Ogni fascia di penombra è delimitata da due rette che partono dallo stesso bordo del corpo (una tracciata dal bordo della sorgente dalla stessa parte, l'altra da quello opposto) e che si allontanano fra loro allontanandosi dal corpo: più lo schermo è vicino al corpo, più la penombra è stretta.

10. V. $1{,}496 \times 10^{11}\text{ m} / (3{,}00 \times 10^{8}\text{ m/s}) \approx 499\text{ s}$, circa 8 min 19 s.

11. F. Ogni raggio rispetta la legge della riflessione rispetto alla normale nel punto in cui colpisce la superficie; sono le normali ad avere direzioni diverse.

12. F. Nel punto in cui si forma un'immagine virtuale la luce non arriva: si incontrano solo i prolungamenti dei raggi.

13. F. Lo specchio non inverte le direzioni parallele alla sua superficie (né alto–basso né destra–sinistra) ma quella perpendicolare: avanti e dietro.

14. V. Il bordo inferiore deve stare a metà altezza fra piedi e occhi, quello superiore a metà fra occhi e testa: l'altezza dello specchio è metà della tua, indipendentemente dalla distanza.

15. $\Delta t = s/c = 3{,}84 \times 10^{8}\text{ m} / (3{,}00 \times 10^{8}\text{ m/s}) = 1{,}28\text{ s}$.

16. $\theta_r = \theta_i = 35°$. Angolo fra raggio incidente e riflesso: $35° + 35° = 70°$. Angolo fra raggio riflesso e superficie: $90° - 35° = 55°$.

17. $\theta_i = 90° - 25° = 65°$; $\theta_r = 65°$.

18. $h' = hd'/d = 24\text{ m} \times 0{,}25\text{ m} / 60\text{ m} = 0{,}10\text{ m} = 10\text{ cm}$ (capovolta).

19. $f = R/2 = 25\text{ cm}$. $1/q = 1/(25\text{ cm}) - 1/(75\text{ cm}) = 2/(75\text{ cm})$, $q = 37{,}5\text{ cm} \approx 38\text{ cm}$. $G = -37{,}5/75 = -0{,}50$. Immagine reale (davanti allo specchio), capovolta, rimpicciolita, alta metà dell'oggetto; l'oggetto è oltre C ($75\text{ cm} > 50\text{ cm}$) e infatti l'immagine cade fra F e C.

20. Dietro; negativa; virtuali; rimpicciolite.

21. Previsione: l'oggetto è fra C (40 cm) e F (20 cm), quindi l'immagine è reale, capovolta, ingrandita, oltre C. Verifica: $1/q = 1/(20\text{ cm}) - 1/(30\text{ cm}) = 1/(60\text{ cm})$, $q = +60\text{ cm}$ (oltre C, reale); $G = -60/30 = -2{,}0$: capovolta e ingrandita due volte.

22. $4{,}0 \times 10^{16}\text{ m} / (9{,}46 \times 10^{15}\text{ m}) \approx 4{,}2$ anni luce. La luce che vedi è partita dalla stella circa 4,2 anni fa.

23. Immagine diritta: $G = +3 = -q/p$, quindi $q = -3p = -45\text{ cm}$: immagine virtuale, 45 cm dietro lo specchio. $1/f = 1/p + 1/q = 1/(15\text{ cm}) - 1/(45\text{ cm}) = 2/(45\text{ cm})$, $f = 22{,}5\text{ cm} \approx 23\text{ cm}$; $R = 2f = 45\text{ cm}$. Controllo: $p = 15\text{ cm} < f$, il viso è fra il fuoco e lo specchio, come prevede la tabella delle immagini degli specchi sferici.

24. Specchio convesso: $f = -R/2 = -0{,}60\text{ m}$. $1/q = 1/f - 1/p = -1/(0{,}60\text{ m}) - 1/(10\text{ m}) = -1{,}767\text{ m}^{-1}$, $q \approx -0{,}57\text{ m}$: immagine virtuale, 57 cm dietro lo specchio. $G = -q/p = 0{,}566/10 \approx 0{,}057$; $h' = 0{,}057 \times 1{,}5\text{ m} \approx 0{,}085\text{ m} = 8{,}5\text{ cm}$. Immagine virtuale, diritta, molto rimpicciolita.

25. Con $360°/\alpha$ intero le immagini sono $360°/\alpha - 1$: a 90°, 3; a 60°, 5; a 45°, 7. Per 11 immagini $360°/\alpha = 12$, quindi $\alpha = 30°$.

26. a) La luce percorre $2 \times 5{,}00$ km $= 1{,}00 \times 10^4$ m: $\Delta t = 1{,}00 \times 10^4$ m / $(3{,}00 \times 10^8$ m/s) $\approx 3{,}33 \times 10^{-5}$ s. b) In questo tempo la ruota deve compiere 1/1000 di giro: $f = (1/1000) / (3{,}33 \times 10^{-5}$ s) = 30,0 giri/s = 30,0 Hz, cioè $30{,}0 \times 60 = 1{,}80 \times 10^3$ giri/min. c) $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 30{,}0$ Hz ≈ 188 rad/s.

27. a) $1/p = 1/f - 1/q = 1/(12\text{ cm}) - 1/(60\text{ cm}) = 4/(60\text{ cm})$, $p = 15$ cm. b) $G = -q/p = -60/15 = -4{,}0$; $h' = -4{,}0 \times 2{,}0$ cm $= -8{,}0$ cm: immagine reale, capovolta, alta 8,0 cm. c) Con $p = 18$ cm: $1/q = 1/(12\text{ cm}) - 1/(18\text{ cm}) = 1/(36\text{ cm})$, $q = 36$ cm. Lo schermo va avvicinato allo specchio di 60 cm − 36 cm = 24 cm.

28. Per i triangoli simili (diametro / distanza uguali): $D = 1{,}39 \times 10^9$ m $\times\, 3{,}84 \times 10^8$ m / $(3{,}47 \times 10^6$ m) $\approx 1{,}54 \times 10^{11}$ m. La distanza reale, $1{,}496 \times 10^{11}$ m, è quasi uguale (circa il 3% in meno): Sole e Luna ci appaiono quasi della stessa grandezza, e per questo la Luna può coprire esattamente il disco del Sole. Poiché le distanze variano un po' lungo le orbite, a volte la Luna appare un po' più piccola e l'eclissi non è totale.

29. a) L'immagine è sempre simmetrica di Luca rispetto allo specchio: si avvicina allo specchio a 1,2 m/s. b) Luca e immagine si muovono in versi opposti, ciascuno a 1,2 m/s rispetto allo specchio: la velocità relativa ha modulo 1,2 m/s + 1,2 m/s = 2,4 m/s. c) La distanza fra Luca e l'immagine è il doppio della distanza di Luca dallo specchio: 2,4 m corrisponde a 1,2 m dallo specchio. Luca percorre 3,0 m − 1,2 m = 1,8 m in $\Delta t = 1{,}8$ m / (1,2 m/s) = 1,5 s.

30. Traccia di risposta. Il guidatore che precede vede l'ambulanza nello specchietto retrovisore, cioè vede l'immagine data da uno specchio piano, che inverte la direzione perpendicolare allo specchio. Una scritta che, guardando il cofano da davanti, appare rovesciata, nello specchio appare diritta e si legge subito, senza dover girarsi.

31. L'errore è nel segno di f: per uno specchio convesso $f = -R/2 = -20$ cm. Allora $1/q = -1/(20\text{ cm}) - 1/(30\text{ cm}) = -5/(60\text{ cm})$, $q = -12$ cm; $G = -(-12)/30 = +0{,}40$. L'immagine è virtuale, 12 cm dietro lo specchio, diritta e rimpicciolita, come accade sempre con uno specchio convesso. Un'immagine reale da uno specchio convesso avrebbe dovuto insospettire subito.

32. Traccia di risposta. Si fissano i tre cartoncini in piedi, uno dietro l'altro, e si fa passare un filo teso attraverso i tre forellini per allinearli; si sfila il filo e si pone la candela da un lato. Dall'altro lato, guardando attraverso il primo foro, si vede la fiamma. Spostando lateralmente anche uno solo dei cartoncini, la fiamma scompare: la luce raggiunge l'occhio solo lungo la retta che passa per i tre fori. Conviene ripetere la prova con diverse distanze fra i cartoncini.