

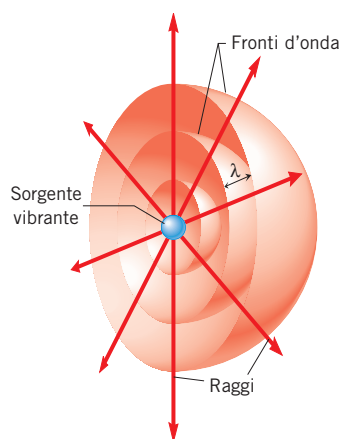
La riflessione della luce: gli specchi

Immaginiamo un campo di 20 ettari ($1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$) pieno di specchi parabolici: per l'esattezza 360. Grazie a un particolare sistema di tubi, la radiazione solare riflessa dagli specchi viene convertita in energia termica e convogliata nelle turbine di una centrale termica adiacente, incrementandone la potenza di 20 MW. Così facendo Archimede, questo il nome del progetto realizzato da Enea ed Enel nei pressi di Siracusa, riesce a fornire energia elettrica a circa 5 mila famiglie.

► L'ordine di grandezza

Volendo soddisfare il fabbisogno energetico annuo di un quarto della popolazione di Roma utilizzando un sistema fotovoltaico simile a quello di Archimede, a quanto ammonterebbe la superficie occupata dagli specchi?

La risposta a pagina 383


Figura 13.1

Una sorgente sonora puntiforme emette un'onda sonora sferica. In questa figura per chiarezza sono rappresentati solo i fronti d'onda semisferici che contengono tutti i punti delle regioni di compressione che vibrano con la stessa fase. La distanza tra due fronti d'onda adiacenti è uguale alla lunghezza d'onda λ . I raggi sono perpendicolari ai fronti d'onda e puntano nella stessa direzione della velocità dell'onda.

13.1 Fronti d'onda e raggi

Gli specchi sono oggetti molto comuni. Per esempio, sarebbe difficile truccarsi o guidare un'automobile senza usare uno specchio. Vediamo le immagini negli specchi perché una parte della luce che li colpisce viene riflessa verso i nostri occhi. Per capire come avviene la riflessione della luce è necessario introdurre i concetti di fronte d'onda e di raggio luminoso. Possiamo usare per questo scopo i concetti che già conosciamo riguardo alle onde sonore (capitolo 12), perché sia la luce sia il suono sono onde. In particolare, la luce è costituita da onde elettromagnetiche, che studieremo in dettaglio nel capitolo 24.

Consideriamo un piccolo oggetto sferico la cui superficie vibra muovendosi con un moto armonico. Questo oggetto emette un'onda sferica che si propaga in tutte le direzioni dello spazio con velocità costante. Per rappresentare questa onda disegniamo alcune superfici formate da tutti i punti che sono in fase fra loro, cioè che si muovono contemporaneamente con lo stesso moto.

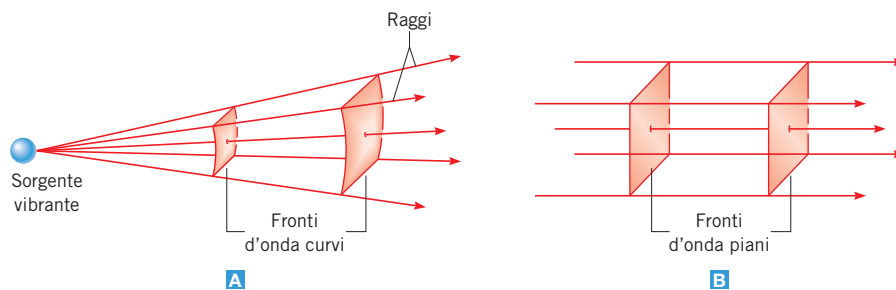
FRONTI D'ONDA

Le superfici in cui tutti i punti di un'onda hanno la stessa fase sono chiamate **fronti d'onda**.

La figura 13.1 mostra i fronti d'onda sferici emessi dalla sorgente vibrante (per semplicità è disegnata solo metà di ogni fronte d'onda). Se, come in questa figura, i fronti d'onda sono disegnati in corrispondenza delle creste delle regioni di compressione, la distanza tra due fronti d'onda adiacenti è uguale alla lunghezza d'onda λ dell'onda.

RAGGI

Le semirette che hanno origine nella sorgente dell'onda e sono perpendicolari ai fronti d'onda sono chiamate **raggi**.

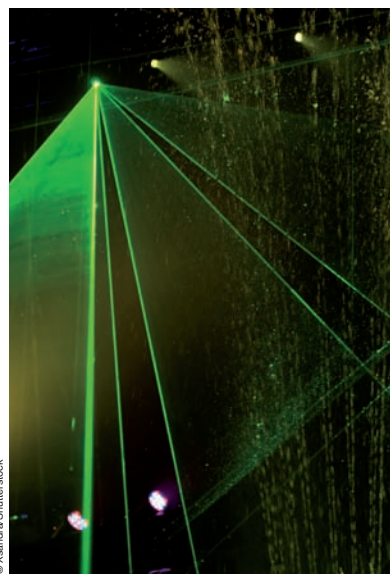

Figura 13.2

- A.** La figura mostra due piccole porzioni di fronti d'onda sferici. I raggi sono perpendicolari ai fronti d'onda e divergenti.
B. Nel caso di onda piana, i fronti d'onda sono superfici piane e i raggi sono paralleli tra loro.

I raggi hanno la stessa direzione della velocità dell'onda.

La figura 13.2A rappresenta piccole porzioni di due fronti d'onda sferici adiacenti. A grandi distanze dalla sorgente i fronti d'onda diventano sempre meno curvi e, come mostra la parte B della figura, possono essere approssimati con superfici piane. Le onde che hanno fronti d'onda piani sono chiamate **onde piane**. Poiché i raggi sono perpendicolari ai fronti d'onda, i raggi di un'onda piana sono tutti paralleli tra loro.

I concetti di fronte d'onda e di raggio possono essere impiegati anche per descrivere le onde luminose. In particolare, i **raggi luminosi** sono molto utili per rappresentare i percorsi della luce. Useremo molto spesso i raggi luminosi, che possono essere considerati come fasci di luce molto sottili simili a quelli prodotti dai laser (figura 13.3).


Figura 13.3

Raggi di luce laser orientati in diverse direzioni.

13.2 La riflessione della luce

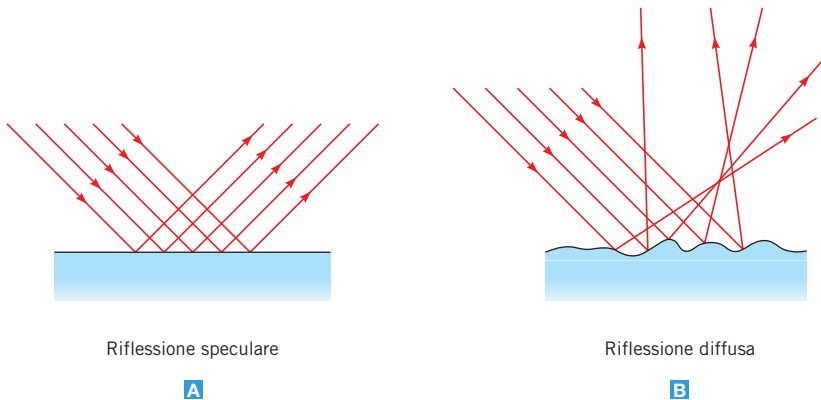
La maggior parte degli oggetti riflette una parte della luce che li colpisce. Supponiamo che un raggio luminoso colpisca una superficie piana e ben levigata, come quella dello specchio di figura 13.4. Come mostra la figura, l'*angolo di incidenza* θ_i è l'angolo che il raggio incidente forma con la normale, che è la retta perpendicolare al piano dello specchio nel punto di incidenza. L'*angolo di riflessione* θ_r è l'angolo formato dal raggio riflesso con la normale. La **legge della riflessione** descrive il comportamento dei raggi incidenti e dei raggi riflessi.

■ LEGGE DELLA RIFLESSIONE

Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza giacciono tutti sullo stesso piano e l'angolo di riflessione θ_r è uguale all'angolo di incidenza θ_i :

$$\theta_i = \theta_r$$

Quando un fascio di raggi paralleli colpisce una superficie piana e liscia come quella della figura 13.5A, i raggi riflessi sono tutti paralleli tra loro. Questo tipo di riflessione è chiamata *riflessione speculare* ed è importante per determinare le proprietà degli specchi. La maggior parte delle superfici non è però perfettamente liscia, perché presenta irregolarità di dimensioni maggiori o uguali della lunghezza d'onda della luce.



La legge della riflessione vale per ogni singolo raggio, ma una superficie irregolare riflette i diversi raggi di luce incidenti in direzioni diverse, come indica la parte B della figura. Questo tipo di riflessione è chiamata *riflessione diffusa*. Per esempio, alcune superfici che danno luogo alla riflessione diffusa sono la maggior parte dei fogli di carta, il legno, i metalli non lucidati e le pareti dipinte con vernici non lucide.

Il principio di funzionamento dei proiettori digitali (figura 13.6) è basato sulla legge della riflessione e sull'impiego di specchietti microscopici, ciascuno dei quali ha le dimensioni di un quarto del diametro di un capello umano. Ogni microspecchio crea sullo schermo di proiezione un *pixel* (contrazione di *picture element* = elemento di immagine), cioè uno dei piccolissimi punti luminosi con cui, per esempio, si formano le immagini sul monitor di un computer.

Per «accendere» il pixel sullo schermo il microspecchio è ruotato in modo tale da riflettere sullo schermo la luce emessa da una potente lampada allo xenon. Ogni microspecchio può cambiare il suo orientamento fino a 1000 volte al secondo, producendo una serie di impulsi luminosi per ogni pixel che l'occhio e il cervello interpretano come parte dell'immagine proiettata. I proiettori digitali impiegano circa 800 000 microspecchi per riprodurre ciascuno dei tre colori primari (rosso, verde e blu) che formano un'immagine a colori.

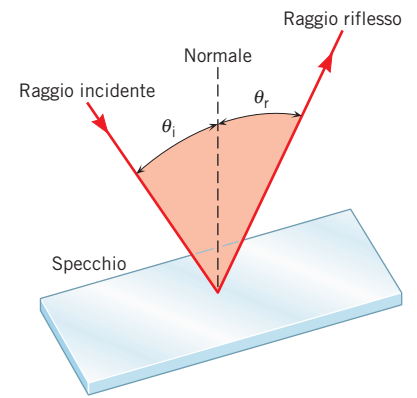


Figura 13.4

L'angolo di riflessione θ_r è uguale all'angolo di incidenza θ_i . Questi due angoli sono misurati rispetto alla normale, che è la retta perpendicolare alla superficie dello specchio nel punto di incidenza del raggio di luce.

Figura 13.5

A. La figura mostra un esempio di riflessione speculare da parte di una superficie piana e lucida, come quella di uno specchio. I raggi luminosi riflessi sono paralleli come quelli incidenti.
B. Una superficie irregolare riflette in tutte le direzioni un fascio di raggi incidenti paralleli. Questo tipo di riflessione è chiamata riflessione diffusa.



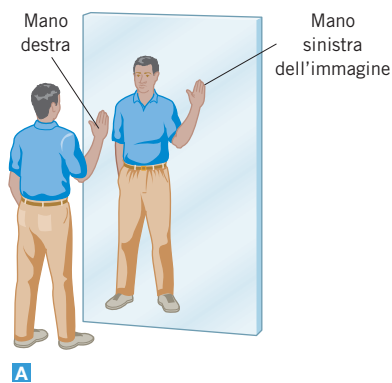
Fisica quotidiana

Proiettori cinematografici digitali e microspecchi



Figura 13.6

Un proiettore digitale: il suo principio di funzionamento è descritto nel testo.



A



B

Figura 13.7

A. Quando una persona si guarda allo specchio la sua mano destra diventa la mano sinistra dell'immagine.

B. Molte parole sui veicoli di soccorso sono scritte al contrario, in modo da apparire scritte normalmente quando vengono viste attraverso lo specchietto retrovisore di un'automobile.

Figura 13.8

A. Un raggio incidente che proviene dall'oggetto è riflesso dallo specchio e all'occhio di un osservatore il raggio riflesso sembra provenire da un punto dietro la superficie dello specchio.

B. Tutti i raggi che provengono dallo stesso punto di un oggetto sembrano provenire da un solo punto dell'immagine dietro lo specchio quando vengono riflessi.

13.3 Gli specchi piani

Quando ti guardi in uno specchio piano vedi un'immagine di te stesso che ha tre proprietà:

- l'immagine è diritta;
- l'immagine ha le tue stesse dimensioni;
- l'immagine è collocata dietro lo specchio a una distanza da esso uguale a quella fra te e lo specchio.

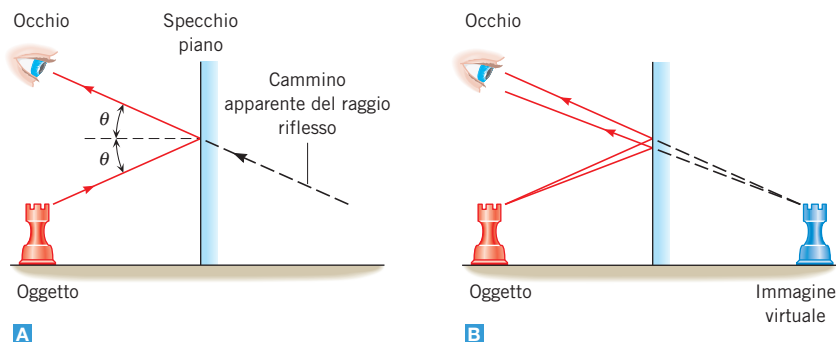
Come mostra la figura 13.7A, nella tua immagine la destra e la sinistra sono scambiate fra loro: per esempio, se saluti con la mano *destra*, l'immagine saluta con la mano *sinistra*. Analogamente, le lettere e le parole appaiono rovesciate nello specchio. Sulle ambulanze, come mostra la figura 13.7B, le scritte sono rovesciate, in modo da apparire in modo corretto quando sono lette nello specchietto retrovisore di un'automobile.

Per capire perché l'immagine formata da uno specchio piano sembra provenire da dietro lo specchio osserviamo la figura 13.8A. Un raggio luminoso proveniente da un punto di un oggetto viene riflesso dallo specchio (l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione) e colpisce il nostro occhio. Al nostro occhio appare come se provenisse da dietro lo specchio, in un punto situato lungo la retta tratteggiata della figura. In realtà, da ogni punto dell'oggetto partono raggi luminosi diretti in tutte le direzioni, ma solo una piccola parte di questi raggi viene intercettata dal nostro occhio. La parte B della figura mostra due raggi che partono dallo stesso punto dell'oggetto. Tutti i raggi che hanno origine in un punto dell'oggetto, anche se incidono sullo specchio con angoli diversi, sembrano avere origine nello stesso punto dell'immagine dietro lo specchio (vedi le linee tratteggiate nella parte B della figura). In conclusione, a ogni punto dell'oggetto corrisponde un solo punto dell'immagine: questo è il motivo per cui l'immagine prodotta da uno specchio piano appare nitida e non distorta.

■ Immagini reali e immagini virtuali

Anche se i raggi riflessi *sembrano* provenire dall'immagine, dalla figura 13.8B appare evidente che essi non hanno origine dietro lo specchio nella posizione in cui sembra che si trovi l'immagine. Poiché nessuno dei raggi luminosi riflessi proviene realmente dall'immagine, l'immagine formata da uno specchio piano è chiamata **immagine virtuale**. In questo libro rappresenteremo con rette tratteggiate i raggi luminosi che provengono da immagini virtuali.

Esistono anche specchi che producono immagini da cui provengono realmente i raggi luminosi e che per questo motivo sono chiamate **immagini reali**. Sono immagini reali per esempio quelle formate dagli *specchi curvi*, di cui parleremo più avanti in questo capitolo.



A

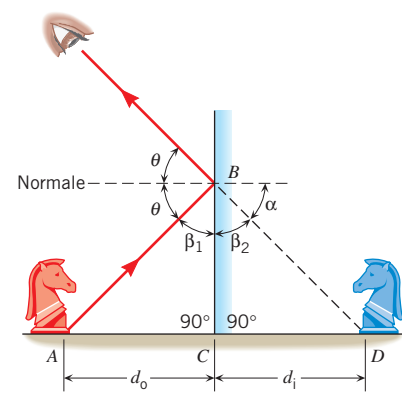
B

■ Distanza dallo specchio e dimensione dell'immagine

Mediante la legge della riflessione è possibile dimostrare che **la distanza tra l'immagine e lo specchio è uguale a quella tra l'oggetto e lo specchio**.

Nella figura 13.9 la distanza dell'oggetto è indicata con d_o , mentre quella dell'immagine è indicata con d_i . Un raggio luminoso parte da un punto della base dell'oggetto, colpisce lo specchio con un angolo di incidenza θ e viene riflesso con lo stesso angolo. All'occhio di un osservatore il raggio riflesso sembra provenire da un punto della base dell'immagine. Poiché i triangoli ABC e DBC della figura sono rettangoli, si ha che $\theta + \beta_1 = 90^\circ$ e che $\alpha + \beta_2 = 90^\circ$. Ma l'angolo α è uguale all'angolo di riflessione θ , perché sono angoli opposti al vertice di due rette che si intersecano, per cui $\beta_1 = \beta_2$. Di conseguenza i triangoli ABC e DBC sono uguali, perché hanno un lato in comune, i due angoli al vertice β_1 e β_2 uguali e gli angoli retti alla base uguali. Pertanto i due lati d_o e d_i sono uguali.

Con un ragionamento analogo si può dimostrare che **l'altezza dell'immagine è uguale all'altezza dell'oggetto**.


Figura 13.9

La figura rappresenta le proprietà geometriche usate nel testo per dimostrare che la distanza d_i dell'immagine formata da uno specchio piano dalla superficie dello specchio è uguale alla distanza d_o dell'oggetto dalla stessa superficie.

ESEMPIO 1 ■ Dimensioni di uno specchio

Lo specchio più piccolo

La figura 13.10 rappresenta una donna in piedi davanti a uno specchio piano.

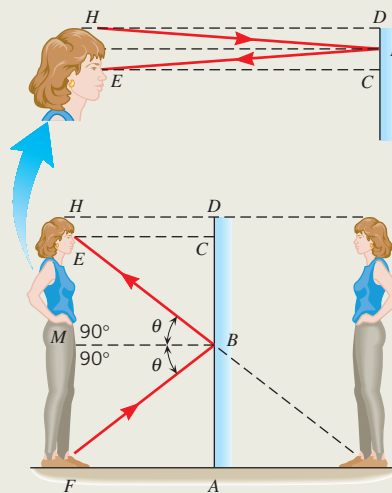
► Qual è l'altezza minima che deve avere lo specchio perché la donna possa vedere la sua immagine completa?

Ragionamento e soluzione

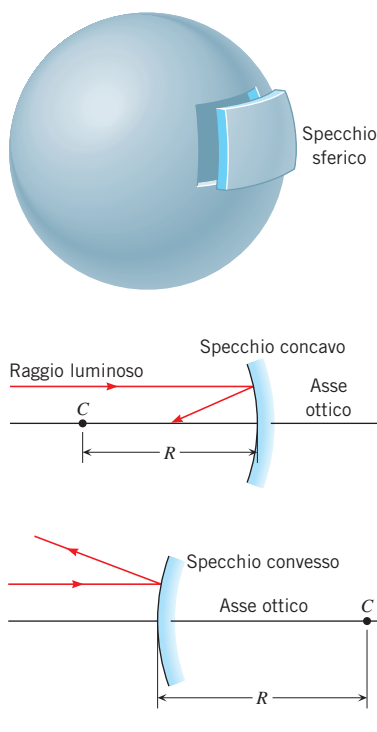
Lo specchio $ABCD$ nella figura ha la stessa altezza della donna. La luce che proviene dal corpo della donna viene riflessa dallo specchio e una parte della luce riflessa giunge ai suoi occhi. Il raggio luminoso che proviene dal suo piede F incide sullo specchio nel punto B e il raggio riflesso giunge ai suoi occhi nel punto E . Per la legge della riflessione gli angoli di incidenza e di riflessione sono entrambi uguali a θ . Ogni raggio luminoso che proviene dal piede e incide sullo specchio in un punto più in basso di B è riflesso in un punto più basso di E e non giunge negli occhi della donna. Quindi possiamo eliminare la parte di specchio compresa tra B e A . La parte BC dello specchio che forma l'immagine ha un'altezza uguale alla metà dell'altezza compresa tra i punti F ed E della donna. Infatti i triangoli rettangoli FBM ed EBM sono uguali perché hanno il lato BM in comune e i due angoli in B uguali.

L'ingrandimento in alto nella figura mostra lo stesso tipo di ragionamento per un raggio luminoso che proviene dalla sommità H della testa della donna: questo raggio colpisce lo specchio nel punto P e raggiunge gli occhi della donna nel punto E .

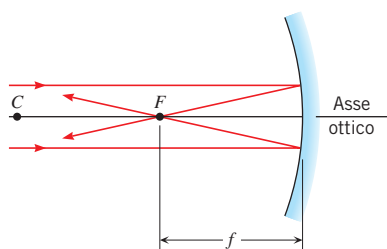
La parte superiore PD dello specchio può essere eliminata senza cambiare l'immagine riflessa. La parte di specchio necessaria CP ha un'altezza uguale alla metà dell'altezza della donna compresa tra il punto H della sua testa e il punto E dei suoi occhi. L'altezza complessiva delle parti BC e CP è esattamente uguale a metà dell'altezza della donna. Quindi, per vedere un'immagine a tutta altezza di una persona basta uno specchio alto la metà dell'altezza della persona. Le conclusioni che abbiamo raggiunto valgono indipendentemente dalla distanza tra la persona e lo specchio.


Figura 13.10

Schema per comprendere l'altezza minima di uno specchio che permetta di vedere un'immagine a tutta altezza di una persona.


Figura 13.11

Uno specchio sferico ha la forma di una calotta sferica. Il centro di curvatura C e il raggio di curvatura R dello specchio sono rispettivamente il centro e il raggio della sfera. Se la superficie riflettente è quella interna della calotta, lo specchio è concavo; se invece è quella esterna, lo specchio è convesso.


Figura 13.13

I raggi luminosi paralleli all'asse ottico e vicini a esso vengono riflessi dallo specchio concavo e dopo la riflessione convergono in un punto dell'asse ottico chiamato punto focale (o fuoco) F dello specchio. La distanza focale f dello specchio è la distanza tra F e il centro dello specchio.

13.4 Gli specchi sferici

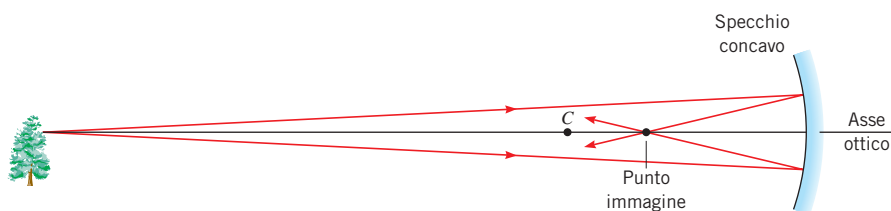
Il tipo più comune di specchio curvo è lo specchio sferico; come mostra la figura 13.11, la superficie di uno specchio sferico è una piccola parte di una superficie sferica. Se la parte riflettente della superficie è quella interna si ha uno **specchio concavo**, mentre se è quella esterna si ha uno **specchio convesso**.

La legge della riflessione che abbiamo enunciato per gli specchi piani vale anche per gli specchi sferici. In questo caso la normale è la perpendicolare al piano tangente alla superficie sferica nel punto di incidenza. Il centro di curvatura e il raggio di curvatura sono il centro della sfera C e il suo raggio R .

L'**asse ottico** dello specchio è il suo asse di simmetria, cioè la retta che congiunge il centro di curvatura con il centro dello specchio.

■ Specchi sferici concavi

La figura 13.12 mostra un albero davanti a uno specchio concavo. Un punto dell'albero si trova sull'asse ottico dello specchio e più lontano dallo specchio rispetto al centro di curvatura C . I raggi luminosi che provengono da questo punto sono riflessi dallo specchio secondo la legge della riflessione. Se i raggi incidenti sono vicini all'asse ottico, i raggi riflessi convergono in un punto chiamato *punto immagine* e poi proseguono il loro cammino divergendo dal punto immagine. Tutto avviene come se in questo punto ci fosse un oggetto da cui partono raggi luminosi. Poiché dal punto immagine provengono realmente dei raggi luminosi, l'immagine è un'immagine reale.


Figura 13.12

Un punto dell'albero si trova sull'asse ottico dello specchio concavo. I raggi che provengono da questo punto e sono vicini all'asse ottico vengono riflessi dallo specchio e dopo la riflessione convergono in un punto dell'asse ottico chiamato punto immagine.

■ Distanza focale

Se l'albero della figura 13.12 fosse a una distanza infinita dallo specchio, i raggi luminosi provenienti da esso giungerebbero allo specchio praticamente paralleli tra loro e all'asse ottico. La figura 13.13 mostra alcuni di questi raggi vicini all'asse ottico, detti **raggi parassiali**, e il punto immagine formato dai raggi riflessi. In questo caso particolare il punto immagine è chiamato **punto focale** F , o **fuoco**, dello specchio.

Pertanto l'immagine di un oggetto a distanza infinita da uno specchio concavo e posto sul suo asse ottico si trova nel fuoco dello specchio. La distanza tra il fuoco e il centro dello specchio è chiamata **distanza** (o **lunghezza**) **focale** f dello specchio stesso.

Il fuoco F di uno specchio concavo si trova a metà tra il centro di curvatura C e il centro dello specchio. In altre parole, la distanza focale f è pari alla metà del raggio di curvatura R :

$$\text{Distanza focale di uno specchio concavo} \quad f = \frac{1}{2}R \quad (13.1)$$

L'equazione (13.1) è valida solo per i raggi parassiali. Consideriamo infatti un raggio di luce parassiale AB che incide su uno specchio sferico nel punto B (figura

13.14). Per la legge della riflessione, gli angoli di incidenza e di riflessione sono uguali: $\hat{i} = \hat{r}$. Poiché il raggio AB e l'asse ottico CD sono paralleli, gli angoli alterni interni formati dal raggio BC sono uguali: $\hat{i} = \hat{c}$. Quindi è anche $\hat{c} = \hat{r}$ e il triangolo CBF è isoscele e ha due lati uguali: $CF = FB$. Poiché il raggio AB è parassiale, BD è molto più piccolo del raggio e quindi, con buona approssimazione, il triangolo FDB è isoscele, per cui $FB \approx FD$. Ma $CF = FB$, quindi:

$$CF = FB \approx FD$$

e

$$CD = CF + FD \approx FD + FD = 2FD$$

Ma $CD = R$ e $FD = f$, quindi possiamo concludere che, se il raggio è parassiale, risulta:

$$R = 2f \quad \text{ossia} \quad f = \frac{R}{2}$$

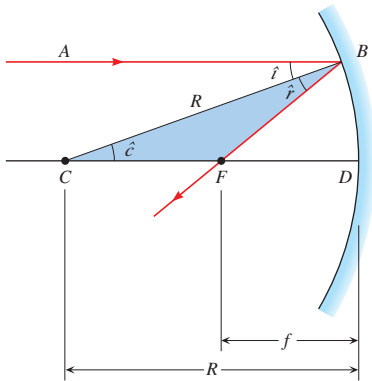


Figura 13.14

La figura è utilizzata per mostrare che la distanza focale f di uno specchio concavo è la metà del raggio di curvatura R dello specchio.

Come mostra la figura **13.15**, i raggi molto distanti dall'asse ottico non convergono in un punto unico dopo essere stati riflessi dallo specchio. Il risultato è che l'immagine che si forma è confusa. Il fatto che uno specchio sferico non formi un unico punto immagine per tutti i raggi paralleli all'asse ottico che incidono su di esso è chiamato **aberrazione sferica**. L'aberrazione sferica può essere minimizzata utilizzando uno specchio di altezza piccola rispetto al raggio di curvatura.

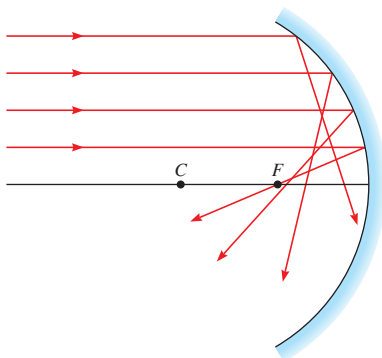


Figura 13.15

I raggi più lontani dall'asse ottico hanno angoli di incidenza maggiori e dopo essere stati riflessi dallo specchio concavo non convergono in un unico punto immagine.

■ Specchi parabolici

Si può ottenere un'immagine molto nitida anche usando uno specchio grande, ma con una superficie parabolica anziché sferica. Infatti gli specchi parabolici hanno la proprietà che tutti i raggi paralleli all'asse ottico, dopo essere stati riflessi, convergono in un unico punto immagine, indipendentemente dalla loro distanza dall'asse ottico (figura **13.16**).

La fabbricazione di specchi parabolici di grandi dimensioni è però molto costosa, perciò questo tipo di specchi viene impiegato quando è necessario ottenere immagini molto nitide di oggetti lontani, come avviene nei telescopi.

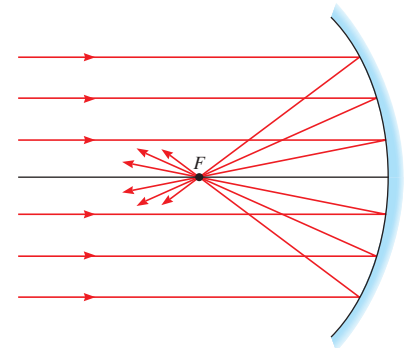


Figura 13.16

Schema di uno specchio parabolico: tutti i raggi paralleli all'asse ottico convergono in un unico punto F .

Figura 13.17

Questa lunga fila di specchi parabolici concentra nei fuochi degli specchi i raggi solari riflessi dagli specchi e il calore così concentrato riscalda un tubo pieno d'olio che corre lungo i fuochi degli specchi.

Quella rappresentata nella fotografia è una delle molte file di specchi parabolici impiegati in una centrale elettrica termosolare nel deserto Mojave (California).



© Mastroiello/Corbis Stock Market

Fisica quotidiana

Centrali solari. Fari delle automobili



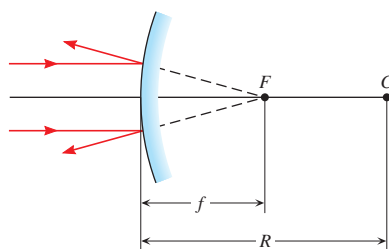
Gli specchi parabolici sono impiegati anche nelle centrali solari, come quella mostrata in figura 13.17. Una lunga fila di specchi parabolici riflettono i raggi provenienti dal Sole; all'altezza dei loro fuochi corre un tubo riempito d'olio che è scaldato dai raggi solari riflessi. Il calore immagazzinato dall'olio è poi utilizzato per vari impieghi, fra i quali la produzione di energia elettrica.

Un'altra applicazione degli specchi parabolici si trova nei fari delle automobili. In un faro una lampada ad alta intensità è posta nel fuoco di uno specchio parabolico e i raggi luminosi emessi dalla lampada vengono riflessi dallo specchio come un fascio di raggi paralleli all'asse ottico.

■ Specchi sferici convessi

La figura 13.18 mostra come determinare il fuoco di uno specchio convesso. Due raggi luminosi paralleli che incidono su uno specchio convesso sono riflessi in direzioni che divergono rispetto all'asse ottico. Se i raggi incidenti sono parassiali, i raggi riflessi sembrano provenire da un unico punto F situato dietro lo specchio. Questo punto è il fuoco dello specchio convesso e la sua distanza dal centro dello specchio è la distanza focale f . Anche la distanza focale di uno specchio convesso è uguale alla metà del raggio di curvatura, ma per convenienza (come vedremo più avanti) è indicata con un segno negativo:

$$\text{Distanza focale di uno specchio convesso} \quad f = -\frac{1}{2}R \quad (13.2)$$


Figura 13.18

Quando un fascio di raggi parassiali e paralleli all'asse ottico è riflesso da uno specchio sferico convesso, i raggi riflessi sembrano provenire dal fuoco F dello specchio. R e f indicano rispettivamente il raggio di curvatura e la distanza focale dello specchio.

13.5 Immagini prodotte da specchi sferici

I tipi di immagine formati da uno specchio possono essere analizzati mediante un metodo grafico detto **diagramma dei raggi**. Questo metodo consiste in una costruzione geometrica dell'immagine basata sulla legge della riflessione e sui concetti di centro di curvatura e di fuoco di uno specchio sferico. Il diagramma dei raggi permette di determinare sia la posizione dell'immagine sia le sue dimensioni semplicemente tenendo presente che i raggi parassiali provenienti da un punto dell'oggetto si intersecano dopo la riflessione nel corrispondente punto dell'immagine.

■ Specchi concavi

Per costruire l'immagine di un oggetto sono particolarmente convenienti i tre raggi rappresentati nella figura 13.19 a pagina seguente. La figura rappresenta una freccia colorata (l'oggetto) e tre raggi che partono dalla sua punta, indicati con 1, 2 e 3. Per tracciare i cammini di questi tre raggi useremo le seguenti convenzioni.

■ DIAGRAMMA DEI RAGGI PER UNO SPECCHIO CONCAVO

Raggio 1. Questo raggio incidente è parallelo all'asse ottico dello specchio e poi è riflesso come raggio passante per il fuoco F .

Raggio 2. Questo raggio incidente passa per il fuoco F e poi è riflesso come raggio parallelo all'asse ottico. Questo raggio è analogo al raggio 1, con la differenza che il raggio parallelo all'asse ottico è il raggio riflesso e non il raggio incidente.

Raggio 3. Questo raggio incidente passa per il centro di curvatura C e quindi ha la direzione di un raggio perpendicolare alla superficie dello specchio. Pertanto il raggio riflesso ha la stessa direzione di quello incidente.

Se i raggi 1, 2 e 3 sono tracciati in un unico disegno in scala, come nella figura 13.20A (*), essi si intersecano in un punto che è l'immagine della punta della freccia. Anche se per determinare la posizione dell'immagine abbiamo usato tre raggi, in realtà ne bastano solo due e il terzo è usato solo per controllo.

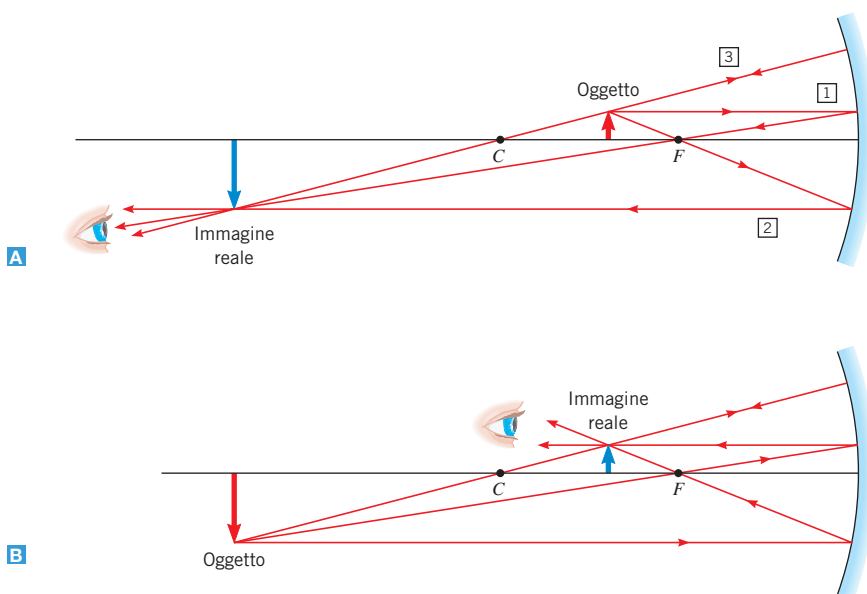
Procedendo in modo simile a quello usato per trovare l'immagine della punta della freccia, si possono trovare le immagini di altri punti dell'oggetto. Guardando l'immagine dalla posizione dell'occhio indicato nella figura si vedrebbe un'immagine dell'oggetto *ingrandita* e *capovolta*. Inoltre l'immagine è *reale*, perché i raggi luminosi passano realmente per il punto immagine.

Se nella figura 13.20A si scambia la posizione dell'oggetto con quella dell'immagine, si ottiene la situazione rappresentata nella figura 13.20B. L'immagine che si forma nella parte B della figura è *reale*, ed è *capovolta* e *rimpicciolita* rispetto all'oggetto. I tre raggi della parte B della figura sono gli stessi di quelli della parte A, con l'unica differenza che i versi dei loro cammini sono opposti. Questi disegni illustrano il seguente principio:

■ PRINCIPIO DI REVERSIBILITÀ DEI CAMMINI OTTICI

Se si inverte il verso di un raggio luminoso, il raggio ripercorre il cammino originale.

Questo principio ha una portata generale e non è quindi limitato alla riflessione da parte di uno specchio.



(*) I raggi considerati nei disegni sono tutti parassiali, anche se spesso la loro distanza dall'asse ottico è esagerata per rendere più chiaro il diagramma.

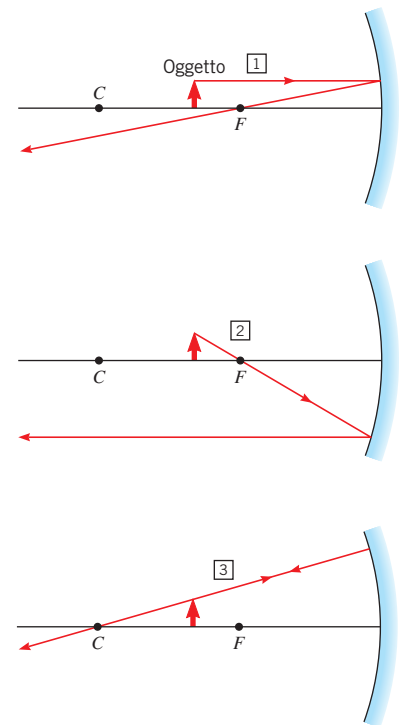
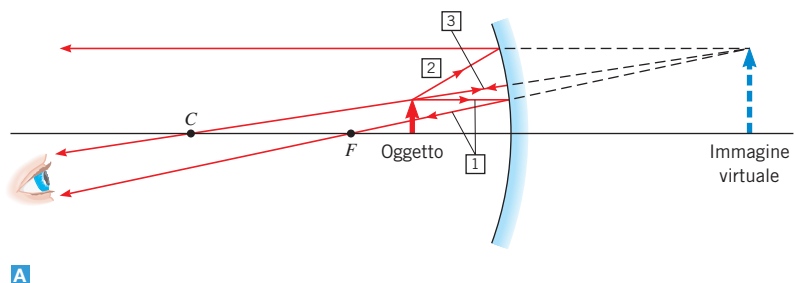


Figura 13.19

I raggi indicati con 1, 2 e 3 sono utili per trovare l'immagine di un oggetto posto davanti a uno specchio sferico concavo. Nel disegno l'oggetto è rappresentato da una freccia verticale.

Figura 13.20

A. Quando un oggetto è posto tra il fuoco F e il centro di curvatura C di uno specchio sferico concavo, si forma un'immagine dell'oggetto che è reale, ingrandita e capovolta.
B. Quando un oggetto è posto oltre il centro di curvatura C , si forma un'immagine dell'oggetto che è reale, rimpicciolita e capovolta.



A



B

Figura 13.21

A. Quando un oggetto è posto tra uno specchio sferico concavo e il suo fuoco F si forma un'immagine dell'oggetto che è virtuale, diritta e ingrandita.

B. Gli specchi da barba (o da trucco) sono specchi concavi che possono formare un'immagine virtuale e ingrandita, come quella mostrata nella fotografia.

Il diagramma dei raggi consente di determinare anche l'immagine di un oggetto posto tra il fuoco e lo specchio, come nella figura 13.21A. In questo caso il raggio 2 non passa per il fuoco perché l'oggetto è al di là di esso, però ha la stessa direzione della retta passante per il fuoco e per la punta della freccia; quindi il raggio riflesso è parallelo all'asse ottico dello specchio. In questo caso i tre raggi riflessi non si intersecano in un punto unico ma sono divergenti. Tuttavia i prolungamenti di questi raggi oltre lo specchio sembrano provenire da un unico punto, che appartiene all'immagine *virtuale* dell'oggetto. Questa immagine virtuale è *diritta* e *ingrandita* rispetto all'oggetto.

Gli specchi di ingrandimento usati per truccarsi o per radersi sono specchi concavi. Quando si mette il viso tra lo specchio e il suo fuoco se ne vede un'immagine virtuale e ingrandita, come mostra la parte B della figura.

Fisica quotidiana



Specchi di ingrandimento

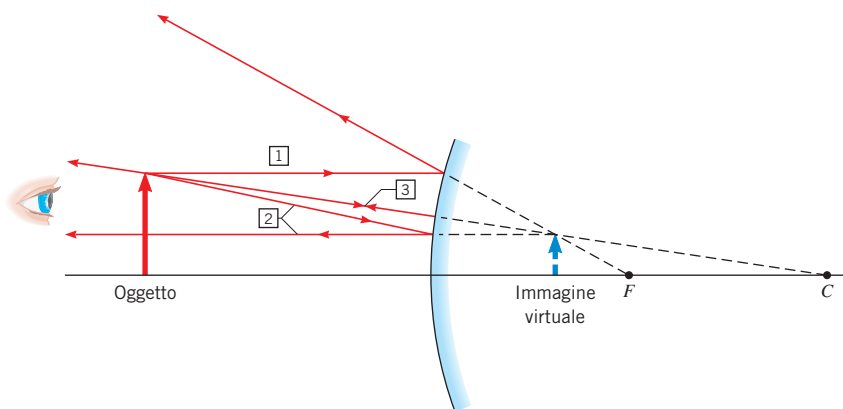
■ **Specchi convessi**

Per determinare la posizione e le dimensioni dell'immagine formata da uno specchio convesso si può usare il metodo del diagramma dei raggi, ma bisogna tenere presente che il fuoco e il centro di curvatura di uno specchio convesso si trovano dietro la superficie riflettente, non davanti a essa. La figura 13.22A rappresenta una freccia colorata (l'oggetto) e i tre raggi che partono dalla sua punta, indicati con 1, 2 e 3. Per tracciare i cammini di questi tre raggi useremo le convenzioni indicate a pagina seguente, che tengono conto delle posizioni diverse del fuoco e del centro di curvatura.

Figura 13.22

A. Quando un oggetto è posto davanti a uno specchio sferico convesso, si forma un'immagine dell'oggetto che è virtuale, diritta e rimpicciolita e posta dietro la superficie dello specchio.

B. Lo schermo solare nel casco di questo pilota funziona come uno specchio sferico e riflette l'immagine del suo aereo.



A



B

■ DIAGRAMMA DEI RAGGI PER UNO SPECCHIO CONVESSO

Raggio 1. Questo raggio incidente è parallelo all'asse ottico dello specchio e pertanto il raggio riflesso sembra provenire dal fuoco F .

Raggio 2. Il prolungamento di questo raggio passa per il fuoco F : il suo raggio riflesso è parallelo all'asse ottico. Il raggio 2 è analogo al raggio 1, con la differenza che il raggio parallelo all'asse ottico è il raggio riflesso e non il raggio incidente.

Raggio 3. Il prolungamento di questo raggio passa per il centro di curvatura C ; quindi il raggio incide perpendicolarmente sullo specchio e si riflette lungo la stessa direzione, cambiando verso.

I tre raggi riflessi della figura 13.22A sembrano provenire da un unico punto situato su un'immagine *virtuale* posta dietro lo specchio. L'immagine virtuale è *diritta* e *rimpicciolita* rispetto all'oggetto. Uno specchio convesso forma *sempre* immagini virtuali di un oggetto, indipendentemente dalla posizione dell'oggetto davanti allo specchio. La figura 13.22B mostra un esempio di immagine virtuale formata da uno specchio sferico convesso.

A causa della loro forma gli specchi sferici forniscono un campo visivo più ampio di quello di altri tipi di specchi. Per questo motivo sono spesso impiegati come apparati di sicurezza negli incroci stradali (figura 13.23) o per la sorveglianza dei supermercati.

Uno specchio con un campo visivo ampio è necessario anche per fornire al conducente di un'automobile una buona visione di ciò che avviene dietro di lui. Per questo motivo gli specchietti retrovisori delle automobili sono in genere specchi convessi. Bisogna però ricordare che, come mostra la figura 13.22A, l'immagine virtuale formata da uno specchio sferico è rimpicciolita. Quindi l'automobile riflessa nello specchio retrovisore sembra più lontana di quello che è in realtà.


Figura 13.23

Uno specchio sferico stradale.


Fisica quotidiana

Specchietti retrovisori di un'automobile

13.6 L'equazione dei punti coniugati per gli specchi sferici

I diagrammi dei raggi sono molto utili per determinare graficamente la posizione e la dimensione dell'immagine formata da uno specchio. Tuttavia, per descrivere in modo più accurato le caratteristiche dell'immagine, è necessario utilizzare una relazione che lega ogni punto P dell'oggetto al corrispondente punto P' dell'immagine, detto **punto coniugato** di P . La relazione che lega due **punti coniugati** è detta **equazione dei punti coniugati**:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (13.3)$$

dove:

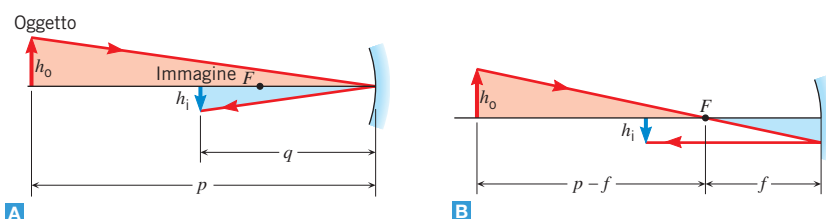
f = distanza focale dello specchio;

p = distanza dell'oggetto, cioè distanza tra l'oggetto e lo specchio;

q = distanza dell'immagine, cioè distanza tra l'immagine e lo specchio.

■ Specchi concavi

Dimostriamo la validità dell'equazione dei punti coniugati nel caso di uno specchio concavo. Nella figura 13.24A un raggio emesso dalla punta dell'oggetto viene riflesso


Figura 13.24

Dimostrazione dell'equazione dei punti coniugati.

A. I due triangoli rettangoli colorati sono simili.

B. Se il raggio incidente è parassiale, cioè molto vicino all'asse ottico, le due regioni colorate sono con buona approssimazione due triangoli simili.

nel centro dello specchio, cioè nel punto in cui l'asse ottico incontra lo specchio, e passa per l'immagine. Poiché l'asse ottico è perpendicolare allo specchio, esso è anche la normale allo specchio nel punto di incidenza. Quindi il raggio incidente e il raggio riflesso formano due angoli uguali con l'asse ottico. I due triangoli rettangoli colorati sono simili perché hanno gli stessi angoli, quindi i loro lati sono in proporzione:

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{p}{q}$$

essendo h_o l'altezza dell'oggetto e h_i l'altezza dell'immagine.

Nella figura 13.24B un raggio emesso dall'oggetto passa per il fuoco F , è riflesso parallelamente all'asse ottico e passa per l'immagine. Se il raggio incidente è parasiale, la figura colorata in azzurro può essere considerata con buona approssimazione un triangolo rettangolo. In questo caso le due figure colorate sono triangoli rettangoli simili, perché hanno gli stessi angoli, quindi i loro lati sono in proporzione:

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{p-f}{f}$$

Confrontando le due equazioni si ha:

$$\frac{p}{q} = \frac{p-f}{f} \quad \text{da cui:} \quad \frac{p}{q} = \frac{p}{f} - 1$$

Dividendo entrambi i membri per p e ricombinando i termini, si ottiene l'equazione dei punti coniugati:

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

Nella dimostrazione abbiamo fatto l'ipotesi che l'immagine dell'oggetto sia reale. L'equazione vale anche nel caso in cui l'immagine sia virtuale, cioè quando l'oggetto è posto tra il fuoco e lo specchio: in questo caso bisogna attribuire il segno negativo alla distanza q dell'immagine.

Oltre a stabilire la posizione dell'immagine di un oggetto formata da uno specchio, è importante valutare il suo **ingrandimento** G , cioè il rapporto tra l'altezza dell'immagine e quella dell'oggetto h_i/h_o . Nella dimostrazione precedente, abbiamo visto che $h_o/h_i = p/q$ e quindi che $h_i/h_o = q/p$. Si definisce allora **ingrandimento** G il rapporto:

$$G = -\frac{q}{p} \quad (13.4)$$

Per convenzione, un'immagine rovesciata ha ingrandimento negativo, mentre un'immagine diritta ha ingrandimento positivo.

ESEMPIO 2 ■ Equazione dei punti coniugati

L'immagine reale formata da uno specchio concavo

Un oggetto alto 2,0 cm è posto a una distanza di 7,10 cm da uno specchio concavo che ha un raggio di curvatura di 10,20 cm. Trova:

- ▶ la posizione dell'immagine.
- ▶ l'altezza dell'immagine.

Ragionamento

Poiché:

$$f = \frac{1}{2}R = \frac{1}{2}(10,20 \text{ cm}) = 5,10 \text{ cm}$$

l'oggetto si trova tra il fuoco F e il centro di curvatura C dello specchio, come nella figura 13.20A. Ci aspettiamo che l'immagine sia reale, che si trovi a una

distanza dallo specchio maggiore di quella dall'oggetto e che sia capovolta e ingrandita.

Soluzione

► Ponendo $p = 7,10$ cm e $f = 5,10$ cm nell'equazione (13.3), si ha:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{5,10 \text{ cm}} - \frac{1}{7,10 \text{ cm}} = 0,055 \text{ cm}^{-1} \quad \text{da cui: } \boxed{q = 18 \text{ cm}}$$

Il valore positivo per q indica che l'immagine è reale, come nel caso della figura 13.20A.

► L'ingrandimento è:

$$G = -\frac{q}{p} = -\frac{18 \text{ cm}}{7,10 \text{ cm}} = -2,5$$

quindi risulta:

$$h_i = Gh_o = (-2,5)(2,0 \text{ cm}) = \boxed{-5,0 \text{ cm}}$$

L'immagine è capovolta e 2,5 volte più alta dell'oggetto, come nel caso della figura 13.20A.

Problem solving

Osservazione sulla determinazione di q

Dall'equazione degli specchi si ricava che il reciproco della distanza q è $q^{-1} = f^{-1} - p^{-1}$. Perciò, dopo aver combinato i valori di f^{-1} e p^{-1} , è importante non dimenticare di calcolare il reciproco del risultato trovato per determinare q .

ESEMPIO 3 ■ Equazione dei punti coniugati

L'immagine virtuale formata da uno specchio concavo

Un oggetto alto 1,2 cm è posto a una distanza di 6,00 cm da uno specchio concavo che ha una distanza focale di 10,0 cm. Trova:

- la posizione dell'immagine.
- l'altezza dell'immagine.

Ragionamento

L'oggetto si trova tra il fuoco e lo specchio, come nella figura 13.21A: l'immagine è virtuale, diritta e ingrandita rispetto all'oggetto.

Soluzione

► Usando l'equazione (13.3) con $p = 6,00$ cm e $f = 10,0$ cm, otteniamo:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{10,0 \text{ cm}} - \frac{1}{6,00 \text{ cm}} = -0,067 \text{ cm}^{-1} \quad \text{da cui: } \boxed{q = -15 \text{ cm}}$$

Il valore negativo di q indica che l'immagine si trova *dietro* lo specchio e quindi è virtuale.

► L'ingrandimento G è:

$$G = -\frac{q}{p} = -\frac{-15 \text{ cm}}{6,00 \text{ cm}} = 2,5$$

quindi l'altezza dell'immagine è:

$$h_i = Gh_o = (2,5)(1,2 \text{ cm}) = \boxed{3,0 \text{ cm}}$$

L'immagine è diritta e più grande dell'oggetto, come nel caso della figura 13.21A.

■ Specchi convessi

L'equazione dei punti coniugati vale anche per specchi convessi di raggio R . In questo caso però la lunghezza focale f è negativa:

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

Problem solving
Osservazione sull'uso dell'equazione dei punti coniugati

Quando si usa l'equazione dei punti coniugati è utile disegnare il diagramma dei raggi sia per ragionare sul problema sia per controllare che i risultati dei calcoli siano coerenti con quelli indicati dal diagramma.

ESEMPIO 4 ■ Equazione dei punti coniugati
L'immagine virtuale formata da uno specchio convesso

Uno specchio convesso riflette la luce proveniente da un oggetto posto a una distanza di 66 cm. La distanza focale dello specchio è $f = -46$ cm. Trova:

- ▶ la posizione dell'immagine.
- ▶ l'ingrandimento dello specchio.

Ragionamento

Uno specchio convesso forma sempre un'immagine virtuale, diritta e rimpicciolita come nella figura 13.22A.

Soluzione

- ▶ Usando l'equazione dei punti coniugati con $p = 66$ cm e $f = -46$ cm, otteniamo:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{-46 \text{ cm}} - \frac{1}{66 \text{ cm}} = -0,037 \text{ cm}^{-1}$$

da cui: $q = -27 \text{ cm}$

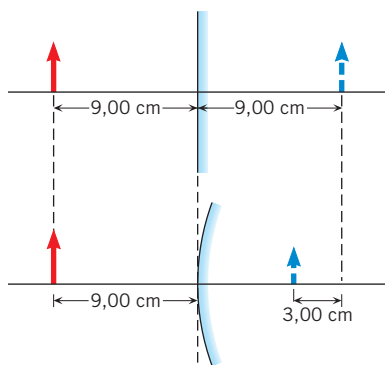
Il valore negativo di q indica che l'immagine si trova dietro lo specchio e quindi è un'immagine virtuale.

- ▶ L'ingrandimento G è:

$$G = -\frac{q}{p} = -\frac{-27 \text{ cm}}{66 \text{ cm}} = 0,41$$

L'immagine è più piccola dell'oggetto (perché G è minore di 1) e diritta (perché G è positivo).

Gli specchi convessi, come quelli piani, formano sempre immagini virtuali dietro lo specchio. Però, come mostra l'esempio 5, le immagini virtuali formate dagli specchi convessi sono più vicine allo specchio di quelle formate dagli specchi piani.


Figura 13.25

La distanza dell'oggetto (9,00 cm) è la stessa sia per lo specchio piano (figura in alto) sia per lo specchio convesso (figura in basso); in quest'ultimo caso, però, come mostra l'esempio 5, l'immagine è 3,00 cm più vicina allo specchio.

ESEMPIO 5 ■ Equazione dei punti coniugati
Confronto tra uno specchio convesso e uno specchio piano

Un oggetto è posto a una distanza di 9,00 cm da uno specchio. Se lo specchio è convesso la distanza dell'immagine dallo specchio è minore di 3,00 cm rispetto alla distanza dell'immagine formata da uno specchio piano (figura 13.25).

- ▶ Trova la distanza focale dello specchio convesso.

Ragionamento e soluzione

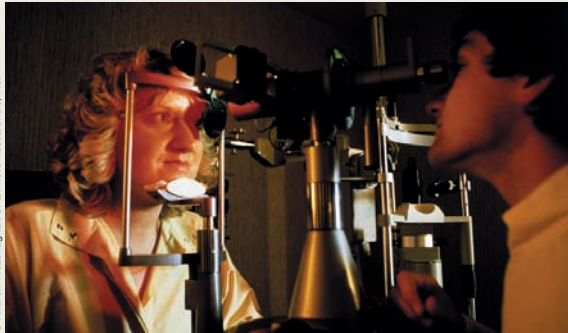
Un oggetto e la sua immagine formata da uno specchio piano si trovano alla stessa distanza dallo specchio, da parti opposte di esso. Perciò l'immagine formata da uno specchio piano sarebbe a una distanza di 9,00 cm dallo specchio. Se lo specchio è convesso e l'immagine è più vicina di 3 cm rispetto a quella formata da uno specchio piano, significa che in questo caso l'immagine si trova a 6 cm dietro lo specchio. In altre parole, quando $p = 9$ cm, $q = -6$ cm (il segno è negativo perché l'immagine è virtuale). Mediante l'equazione dei punti coniugati si calcola il reciproco della distanza focale:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{9,00 \text{ cm}} + \frac{1}{-6,00 \text{ cm}} = -0,056 \text{ cm}^{-1} \text{ da cui: } f = -18 \text{ cm}$$

ESEMPIO 6 ■ Equazione dei punti coniugati
Misura della curvatura della cornea

Una lente a contatto si posiziona sulla cornea dell'occhio. Per scegliere il modello di lente che meglio si adatta alla cornea, bisogna conoscere il raggio di curvatura della cornea. Questa misura si effettua con il cheratometro (figura 13.26). Lo strumento proietta l'immagine di un oggetto luminoso sulla cornea, che si comporta come uno specchio convesso.

- Calcola il raggio di curvatura di una cornea che fornisce un'immagine con ingrandimento 0,046 di un oggetto posto a 9,0 cm da essa.


Figura 13.26

Un optometrista misura il raggio di curvatura della cornea della paziente mediante il cheratometro.

Ragionamento

Il raggio di curvatura R è legato alla distanza focale f , che a sua volta è legata alle distanze p e q dell'oggetto e dell'immagine dall'equazione dei punti coniugati. L'ingrandimento dipende dal rapporto q/p . Mediante queste due relazioni si può calcolare f e quindi R .

Dati e incognite

| | Grandezze | Simboli | Valori | Commenti |
|------------------|----------------------------------|---------|--------|----------|
| Dati | Distanza dell'oggetto | p | 9,0 cm | |
| | Ingrandimento | G | 0,046 | |
| Incognite | Raggio di curvatura della cornea | R | | |

Il modello del problema

1 Relazione tra raggio di curvatura R e fuoco f di uno specchio sferico La lunghezza focale f vale:

$$f = -\frac{1}{2} R$$

da cui segue:

$$R = -2f$$

Grandezza da determinare: f

$$R = -2f \quad (1)$$

2 Equazione dei punti coniugati Esprime la relazione tra lunghezza focale, distanza dell'oggetto p e dell'immagine q :

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

da cui segue:

$$f = \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} \right)^{-1}$$

Grandezza da determinare: q

$$R = -2f \quad (1)$$

$$f = \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} \right)^{-1} \quad (2)$$

3 Ingrandimento Dato che l'ingrandimento G è espresso dalla relazione:

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

risulta:

$$q = -Gp$$

$$R = -2f \quad (1)$$

$$f = \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$q = -Gp$$

Soluzione

Combinando i vari passaggi si ottiene algebricamente:

$$R = -2f = -2 \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} \right)^{-1} = -2 \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{-Gp} \right)^{-1}$$

e quindi:

$$\begin{aligned} R &= -2 \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{-Gp} \right)^{-1} = -2 \left[\frac{1}{p} \left(1 - \frac{1}{G} \right) \right]^{-1} = \\ &= 2 \left[\frac{1}{p} \left(\frac{1-G}{G} \right) \right]^{-1} = \frac{2pG}{1-G} \end{aligned}$$

Numericamente risulta:

$$R = \frac{2pG}{1-G} = \frac{2(9,0 \text{ cm})(0,046)}{1-0,046} = \boxed{0,87 \text{ cm}}$$

Riepiloghiamo le convenzioni sui segni usate nell'equazione dei punti coniugati e nell'equazione dell'ingrandimento. Queste convenzioni valgono sia per gli specchi concavi sia per quelli convessi.

RIEPILOGO DELLA CONVENZIONE SUI SEGNI PER GLI SPECCHI SFERICI

Distanza focale

$f > 0$ per uno specchio concavo

$f < 0$ per uno specchio convesso

Distanza dell'oggetto

$p > 0$ se l'oggetto è davanti allo specchio (oggetto reale)

$p < 0$ se l'oggetto è dietro lo specchio (oggetto virtuale)

Distanza dell'immagine

$q > 0$ se l'immagine è davanti allo specchio (immagine reale)

$q < 0$ se l'immagine è dietro lo specchio (immagine virtuale)

Ingrandimento

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

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

L'ordine di grandezza



Volendo soddisfare il fabbisogno energetico annuo di un quarto della popolazione di Roma utilizzando un sistema fotovoltaico simile a quello di Archimede, a quanto ammonterebbe la superficie occupata dagli specchi?

Per calcolare la superficie che occuperebbero gli specchi, bisogna dividere un quarto del fabbisogno energetico annuo degli abitanti di Roma per l'energia prodotta annualmente per ogni ettaro occupato dagli specchi.

IL MODELLO

(superficie occupata dagli specchi) = $1/4$ (fabbisogno energetico annuo degli abitanti di Roma) / (energia prodotta annualmente per ogni ettaro occupato dagli specchi)

I NUMERI

■ **Fabbisogno energetico annuo degli abitanti di Roma** =
 = (fabbisogno energetico annuo di un italiano) (numero degli abitanti di Roma) = $(5,5 \text{ MW} \cdot \text{h}) (2,7 \cdot 10^6 \text{ ab})$ =
 = $1,5 \cdot 10^7 \text{ MW} \cdot \text{h} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ GW} \cdot \text{h}$

■ **Energia prodotta annualmente per ogni ettaro occupato dagli specchi** =
 = (energia totale prodotta in 1 anno da Archimede) / (ettari occupati da Archimede) =
 = (potenza di Archimede · secondi in 1 anno) / (ettari occupati da Archimede) =
 = $(20 \text{ MW} \cdot 3,2 \cdot 10^7 \text{ s}) / (20 \text{ ha})$ =
 = $(20 \cdot 10^6 \text{ J/s} \cdot 3,2 \cdot 10^7 \text{ s}) / (20 \text{ ha})$ =
 = $3,2 \cdot 10^{13} \text{ J/ha} = (3,2 \cdot 10^{13}) (2,7 \cdot 10^{-13} \text{ GW} \cdot \text{h})/\text{ha} =$
 = $8,6 \text{ GW} \cdot \text{h/ha}$

IL RISULTATO

superficie occupata dagli specchi =
 = $1/4 (1,5 \cdot 10^4 \text{ GW} \cdot \text{h}) / (8,6 \text{ GW} \cdot \text{h/ha}) =$
 = $4,3 \cdot 10^2 \text{ ha} = 4,3 \cdot 10^6 \text{ m}^2$

L'ordine di grandezza è: 10^6 m^2

Per produrre energia elettrica sufficiente al fabbisogno del 25% degli abitanti di Roma sfruttando la radiazione solare con un sistema di specchi analogo a quello del progetto Archimede, bisognerebbe occupare una superficie di circa 430 ettari.

Un paragone Esprimiamo questa superficie in numero di campi da calcio:

numero di campi da calcio occupati =
 = $\frac{\text{superficie occupata dagli specchi}}{\text{superficie di un campo da calcio}} = \frac{430 \text{ ha}}{0,6 \text{ ha}} \approx$
 $\approx 7 \cdot 10^2$ campi

Settecento campi da calcio corrispondono alla metà dei campi da calcio presenti nella sola provincia di Roma.

Le fonti

Fabbisogno energetico annuo di un italiano: ISTAT (www.istat.it)

Numero degli abitanti di Roma: Comune di Roma (www.comune.roma.it)

Potenza erogata da Archimede: Enel s.p.a. (www.enel.it/attivita/ambiente/energy/sole02_menu/sole02/archimede/)

Ettari occupati da Archimede: Enel s.p.a. (www.enel.it/attivita/ambiente/energy/sole02_menu/sole02/archimede/)

Stima l'ordine di grandezza



Quanto olio combustibile consente di risparmiare il progetto Archimede?

IL MODELLO

(olio combustibile risparmiato grazie al progetto Archimede) = (energia prodotta in un anno da Archimede) (quantità di olio combustibile per unità di energia elettrica)

I NUMERI

Quantità di olio combustibile per unità di energia elettrica = $7,7 \cdot 10^{-8} \text{ kg/J}$

IL RISULTATO

Olio combustibile risparmiato grazie al progetto Archimede = kg

Le fonti

Quantità di olio combustibile per unità di energia elettrica: *Le tavole MAFBIC*, Zanichelli, 1989

I concetti fondamentali

1. Fronti d'onda e raggi

Fronti d'onda e onde piane ■ I fronti d'onda sono superfici in cui tutti i punti di un'onda hanno la stessa fase. Le onde che hanno superfici d'onda piane sono chiamate onde piane.

Raggi ■ I raggi sono rette perpendicolari ai fronti d'onda e aventi la stessa direzione della velocità di propagazione dell'onda.

2. La riflessione della luce

Legge della riflessione ■ Quando un raggio luminoso incide su una superficie levigata, il raggio riflesso è descritto dalla legge della riflessione:

1) il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza giacciono sullo stesso piano;

2) l'angolo di riflessione θ_r è uguale all'angolo di incidenza θ_i :

$$\theta_i = \theta_r$$

3. Gli specchi piani

Immagine virtuale ■ Un'immagine è detta virtuale se i raggi luminosi non provengono realmente da essa, ma ciò avviene solo in apparenza. Un'immagine virtuale non può essere raccolta da uno schermo o da una pellicola.

Immagine reale ■ Un'immagine è detta reale se i raggi luminosi provengono realmente da essa.

Specchio piano ■ Uno specchio piano forma un'immagine virtuale e diritta che si trova dietro la superficie dello specchio, a una distanza da esso uguale a quella dell'oggetto davanti allo specchio. Inoltre l'altezza dell'immagine è uguale a quella dell'oggetto.

4. Gli specchi sferici

Specchi concavi e specchi convessi ■ Uno specchio è detto sferico se ha la forma di una porzione di superficie sferica. Se la superficie riflettente è quella interna, lo specchio è concavo; se è quella esterna, lo specchio è convesso.

Asse ottico e raggi parassiali ■ L'asse ottico di uno specchio sferico è la retta che passa per il centro di curvatura e per il punto centrale della superficie dello specchio. I raggi vicini all'asse ottico sono chiamati raggi parassiali. I raggi parassiali non sono necessariamente paralleli all'asse ottico.

Raggio di curvatura ■ Il raggio di curvatura R di uno specchio sferico è uguale alla distanza dello specchio dal centro di curvatura.

Fuoco di uno specchio concavo ■ Il fuoco di uno specchio concavo è un punto dell'asse ottico situato davanti allo specchio. I raggi parassiali paralleli all'asse ottico, dopo essere stati riflessi dallo specchio, convergono nel fuoco dello specchio.

Aberrazione sferica ■ I raggi paralleli all'asse ottico incidenti su uno specchio sferico dopo la riflessione non convergono tutti in un unico punto immagine: questo fenomeno è chiamato aberrazione sferica.

Fuoco di uno specchio convesso ■ Il fuoco di uno specchio convesso è un punto dell'asse ottico situato dietro lo specchio. I raggi parassiali paralleli all'asse ottico, dopo essere stati riflessi dallo specchio, divergono e sembrano provenire dal fuoco dello specchio.

Distanza focale ■ La distanza focale di uno specchio sferico è la distanza tra il fuoco dello specchio e il suo centro.

Specchio concavo
e specchio convesso

- La distanza focale f e il raggio di curvatura R sono legati dalle due relazioni seguenti:

$$\text{Specchio concavo} \quad f = \frac{1}{2}R \quad (13.1)$$

$$\text{Specchio convesso} \quad f = -\frac{1}{2}R \quad (13.2)$$

5. Immagini prodotte da specchi sferici

Diagramma dei raggi

- L'immagine formata da uno specchio sferico può essere costruita con un metodo grafico chiamato diagramma dei raggi.

Il diagramma dei raggi
per uno specchio concavo

- Per disegnare il diagramma dei raggi di uno specchio concavo si tracciano i seguenti tre raggi (figura 13.19):

Raggio 1. Questo raggio parte dall'oggetto ed è parallelo all'asse ottico dello specchio. Il raggio riflesso passa per il fuoco F .

Raggio 2. Questo raggio parte dall'oggetto ed è diretto verso il fuoco F . Il raggio riflesso è parallelo all'asse ottico.

Raggio 3. Questo raggio parte dall'oggetto ed è diretto verso il centro di curvatura C e quindi è perpendicolare alla superficie dello specchio. Pertanto il raggio riflesso ha la stessa direzione di quello incidente.

Il diagramma dei raggi
per uno specchio convesso

- Per disegnare il diagramma dei raggi di uno specchio convesso si tracciano i seguenti tre raggi (figura 13.22A):

Raggio 1. Questo raggio parte dall'oggetto ed è parallelo all'asse ottico dello specchio, quindi il raggio riflesso sembra provenire dal fuoco F .

Raggio 2. Questo raggio parte dall'oggetto ed è diretto verso il fuoco F . Pertanto il raggio riflesso è parallelo all'asse ottico.

Raggio 3. Questo raggio parte dall'oggetto ed è diretto verso il centro di curvatura C , quindi è perpendicolare alla superficie dello specchio. Pertanto il raggio riflesso ha la stessa direzione di quello incidente.

6. L'equazione dei punti coniugati per gli specchi sferici

Equazione dei punti coniugati

- L'equazione dei punti coniugati esprime quantitativamente la relazione tra la distanza p dell'oggetto, la distanza q dell'immagine e la distanza focale f dello specchio:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (13.3)$$

Questa equazione vale sia per gli specchi concavi sia per gli specchi convessi.

Ingrandimento

- L'ingrandimento G di uno specchio è il rapporto tra l'altezza h_i dell'immagine e l'altezza h_o dell'oggetto:

$$G = \frac{h_i}{h_o}$$

- L'ingrandimento è legato alla distanza p dell'oggetto e alla distanza q dell'immagine dall'equazione:

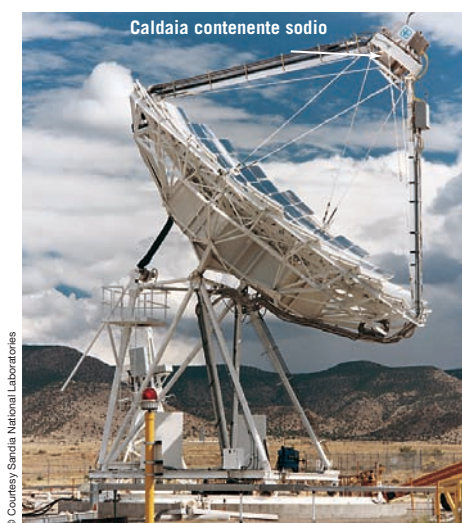
$$G = -\frac{q}{p} \quad (13.4)$$

Convenzioni sui segni

- Le convenzioni sui segni delle variabili che compaiono nell'equazione dei punti coniugati e nell'equazione dell'ingrandimento sono riepilogate alla fine del capitolo.

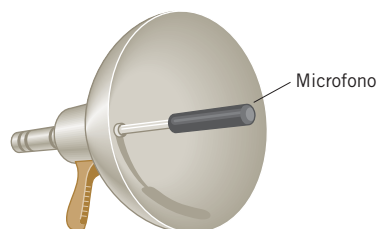
Domande

- 1 Una parola scritta sulla vetrina di un negozio appare rovesciata quando è osservata dall'interno. Se una persona all'interno del negozio guarda la parola in uno specchio piano, come la vede? Diritta o rovesciata?
- 2 Se osservi un orologio allo specchio, come ruota la lancetta dei secondi?
- 3 La foto mostra un dispositivo per sfruttare l'energia solare; esso consiste essenzialmente in uno specchio che concentra i raggi del Sole su una caldaia contenente sodio. Quale tipo di specchio è stato usato? Dove è collocata la caldaia rispetto allo specchio?



© Courtesy Sandia National Laboratories

- 4 L'immagine formata da uno specchio concavo può essere proiettata direttamente su uno schermo? E l'immagine formata da uno specchio convesso?
- 5 Mentre fai colazione, usi un cucchiaio come specchio e noti che un lato riflette un'immagine diritta, mentre l'altro riflette un'immagine capovolta. Perché?
- 6 La figura mostra un microfono direzionale, in grado di rilevare suoni di bassa intensità. Perché è fatto così?



Test

- 1 Per *fronte d'onda* si intende:
 A la superficie di uno specchio piano.
 B una superficie su cui incide un'onda.
 C una superficie in cui tutti i punti di un'onda hanno la stessa fase.
 D una superficie parallela alla direzione di propagazione di un'onda.
- 2 Quale delle seguenti affermazioni relative ai raggi è falsa?
 A I raggi puntano nella direzione della velocità dell'onda.
 B I raggi escono dalla sorgente dell'onda.
 C I raggi sono sempre paralleli ai fronti d'onda.
 D I raggi di un'onda piana sono paralleli fra loro.
- 3 L'immagine di un oggetto formata da uno specchio piano:
 A è più piccola dell'oggetto.
 B è più grande dell'oggetto.
 C è virtuale.
 D è capovolta.

- 4 Daniele cammina a 0,25 m/s verso uno specchio piano. La velocità relativa dell'immagine rispetto a lui è:
 A 0,0 m/s
 B 0,13 m/s
 C 0,25 m/s
 D 0,50 m/s
- 5 Cinque palline sono poste davanti a uno specchio piano come mostra la figura. Nello specchio l'osservatore vede solo:
 A A
 B C
 C A e C
 D A, B e C

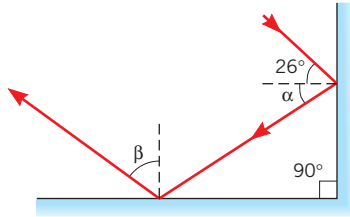
Specchio piano

A • B • C •
D • E •



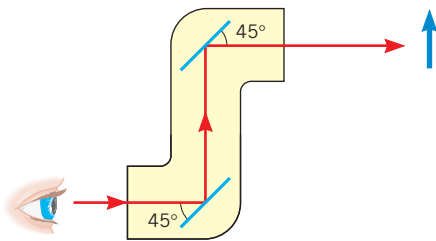
6 Un raggio luminoso è riflesso da due specchi piani come mostra la figura. Quali sono i valori di α e β ?

- A $\alpha = 26^\circ$ $\beta = 26^\circ$
- B $\alpha = 26^\circ$ $\beta = 64^\circ$
- C $\alpha = 64^\circ$ $\beta = 26^\circ$
- D $\alpha = 64^\circ$ $\beta = 64^\circ$



7 L'immagine di una freccia luminosa nel periscopio mostrato in figura è:

- A capovolta e reale.
- B capovolta e virtuale.
- C diritta e reale.
- D diritta e virtuale.



8 La distanza focale di uno specchio sferico concavo è pari a 20 cm. Qual è il suo raggio di curvatura?

- A -5 cm
- B 10 cm
- C 20 cm
- D 40 cm

9 Il raggio di curvatura di uno specchio sferico convesso è 52 cm. Qual è la sua distanza focale?

- A 26 cm
- B -26 cm
- C -52 cm
- D -104 cm

10 Uno specchio concavo ha raggio di curvatura di 30,0 cm. A quale distanza dallo specchio deve essere collocata una sorgente luminosa puntiforme perché i raggi riflessi siano paralleli all'asse ottico dello specchio?

- A 10,0 cm
- B 15,0 cm
- C 30,0 cm
- D 45,0 cm

11 Quale delle seguenti affermazioni relative all'immagine formata da uno specchio sferico concavo è vera?

- A Se un oggetto è posto fra lo specchio e il suo fuoco, l'immagine dell'oggetto è capovolta.
- B Se un oggetto è posto fra lo specchio e il suo fuoco, l'immagine dell'oggetto è virtuale.
- C Se l'oggetto è posto fra il fuoco e il centro di curvatura, l'immagine è virtuale.
- D Se l'oggetto è posto nel centro di curvatura, l'immagine si forma a una distanza infinita dallo specchio.

12 Un oggetto è posto davanti a uno specchio sferico concavo, a una distanza maggiore del raggio di curvatura. Quali caratteristiche ha la sua immagine?

- A È reale, diritta e ingrandita.
- B È reale, diritta e rimpicciolita.
- C È reale, capovolta e ingrandita.
- D È reale, capovolta e rimpicciolita.

13 Uno specchio concavo ha raggio di curvatura di 20 cm. A quale delle seguenti distanze bisogna collocare un oggetto perché lo specchio ne dia un'immagine reale, capovolta e rimpicciolita?

- A 25 cm
- B 20 cm
- C 15 cm
- D 5 cm

14 Uno specchio concavo ha raggio di curvatura di 6,0 cm. A quale distanza bisogna collocare un oggetto di 6,0 cm perché lo specchio ne dia un'immagine alta 48 cm?

- A 1,3 cm
- B 3,6 cm
- C 4,2 cm
- D 5,3 cm

15 Uno specchio convesso ha raggio di curvatura di 0,50 m. A quale distanza bisogna collocare un oggetto in modo che la sua immagine si formi 0,15 m dietro lo specchio?

- A 0,093 m
- B 0,19 m
- C 0,38 m
- D 0,77 m

Problemi

1. Fronti d'onda e raggi ■ 2. La riflessione della luce ■ 3. Gli specchi piani

1  Two diverging light rays, originating from the same point, have an angle of 10° between them.

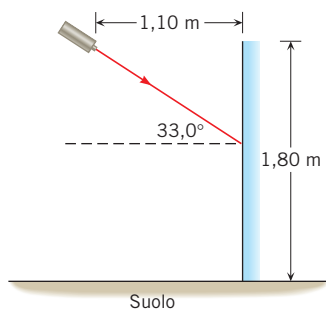
- After the rays reflect from a plane mirror, what is the angle between them?
Construct one possible ray diagram that supports your answer.

2 Prima di risolvere questo problema rivedi l'esempio 1.
* Una donna è in piedi davanti a uno specchio piano e i suoi occhi sono a un'altezza di 1,70 m dal pavimento. Il punto più alto della sua testa è a 0,12 m sopra i suoi occhi.

- Qual è l'altezza minima che deve avere lo specchio perché la donna riesca a vedere la propria immagine intera?
- A quale altezza dal pavimento dovrebbe trovarsi il bordo inferiore dello specchio?

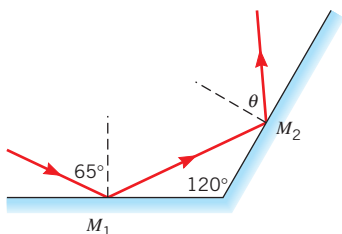
3 Un laser è posto a 1,80 m di altezza e a una distanza di 1,10 m da uno specchio perpendicolare al suolo, come puoi vedere in figura. Il laser emette un raggio di luce che incide sullo specchio con un angolo di $33,0^\circ$.

- A quale distanza dalla base dello specchio il raggio riflesso incide sul suolo?



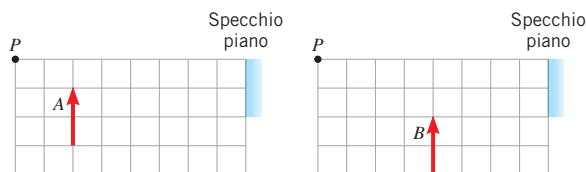
4 Due specchi piani formano un angolo di 120° , come mostra la figura.

- Se un raggio incide sullo specchio M_1 con un angolo di 65° , qual è l'angolo θ con cui viene riflesso dallo specchio M_2 ?



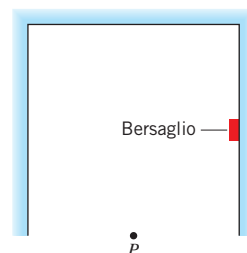
5 La figura mostra due frecce, A e B , situate di fronte a uno specchio piano.

- Quale delle due frecce è vista per intero dalla persona P ?



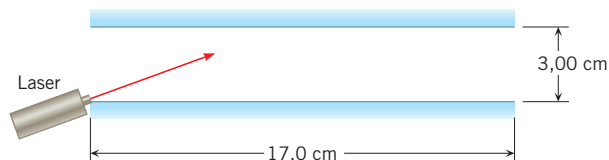
6 La figura rappresenta una vista dall'alto di una stanza quadrata che ha tre pareti coperte da specchi e una parete che non è visibile nel disegno. Dal punto centrale P di questa parete viene inviato un raggio laser con l'intento di colpire un piccolo bersaglio situato nel centro di una parete.

- Determina sei direzioni in cui può essere inviato il raggio laser in modo che esso o uno dei raggi riflessi dalle pareti vadano a colpire il bersaglio, supponendo che nessun raggio colpisca uno specchio più di una volta. Disegna i raggi che illustrano la tua risposta.



7 Due specchi piani di 17,0 cm sono disposti parallelamente alla distanza di 3,00 cm (figura). Un raggio laser è diretto verso lo specchio superiore a partire dallo spigolo dello specchio inferiore. Qual è il più piccolo angolo di incidenza sullo specchio superiore per cui:

- il raggio si riflette solo su uno specchio?
- il raggio si riflette solo una volta su ciascuno degli specchi?



8 Riprendiamo la situazione descritta dalla figura del problema 6. Un laser viene puntato dal punto P al centro della parete non disegnata della stanza quadrata verso la parete a specchio di destra.

- Con quale angolo il raggio deve incidere sulla parete di destra perché il raggio riflesso colpisca l'angolo di sinistra della parete di fronte a P ?

4. Gli specchi sferici ■ 5. Immagini prodotte da specchi sferici

9 * Un oggetto alto 2,0 cm è posto a 15,0 cm da uno specchio concavo che ha un raggio di curvatura di 10,0 cm.

- ▶ Traccia un opportuno diagramma dei raggi e determina la posizione e l'altezza dell'immagine. Lo specchio deve essere disegnato in scala.

10 * Uno specchio concavo ha lunghezza focale di 20,0 cm. Un oggetto alto 2,0 cm è posto a 12,0 cm davanti a esso.

- ▶ Traccia un opportuno diagramma dei raggi e determina la posizione e l'altezza dell'immagine. Lo specchio deve essere disegnato in scala.

11 * Quando un determinato oggetto alto 3,0 cm è posto a grande distanza da uno specchio convesso, l'immagine dell'oggetto si forma 18 cm oltre lo specchio.

- ▶ Traccia un opportuno diagramma dei raggi e determina dove si forma l'immagine quando l'oggetto è posto a 9,0 cm dallo specchio. Lo specchio deve essere disegnato in scala.

12 * Il raggio di curvatura di uno specchio convesso è pari a $1,00 \cdot 10^2$ cm. Un oggetto di 10,0 cm è posto davanti allo specchio.

- ▶ Traccia un opportuno diagramma dei raggi e determina la posizione e l'altezza dell'immagine. Lo specchio deve essere disegnato in scala.

13 * Uno specchio convesso ha una lunghezza focale pari a $-40,0$ cm. Un oggetto alto 12,0 cm è posto a 40,0 cm da esso.

- ▶ Traccia un opportuno diagramma dei raggi e determina la posizione e l'altezza dell'immagine. Lo specchio deve essere disegnato in scala.

14 ** Uno specchio piano e uno concavo (con $f = 8,0$ cm) sono posti uno di fronte all'altro a una distanza di 20,0 cm. Un oggetto è posto davanti allo specchio piano a una distanza di 10,0 cm da esso. Considera i raggi luminosi che provengono dall'oggetto e che vengono riflessi prima dallo specchio piano e poi da quello concavo.

- ▶ Usando un diagramma dei raggi disegnato in scala trova la distanza dallo specchio concavo dell'immagine dell'oggetto formata da questo specchio.

6. L'equazione dei punti coniugati per gli specchi sferici

15 * Un oggetto è posto a 7,50 cm da uno specchio. L'immagine si forma 34,0 cm dietro lo specchio.

- ▶ Qual è la distanza focale dello specchio?
- ▶ Lo specchio è concavo o convesso?

16 * Uno specchio convesso ha raggio di curvatura di 68 cm. L'immagine di un oggetto si forma 22 cm dietro lo specchio.

- ▶ Dove è collocato l'oggetto?
- ▶ Quanto vale l'ingrandimento?

▶ Stabilisci se l'immagine è diritta o rovesciata e se è più piccola o più grande dell'oggetto.

17 * Uno specchio concavo ha una lunghezza focale di 12 cm. L'immagine di un oggetto si forma 36 cm davanti allo specchio.

- ▶ Calcola l'ingrandimento dell'immagine.

18 * Uno specchio concavo (con $R = 56,0$ cm) viene impiegato per proiettare una diapositiva su una parete. La diapositiva è a una distanza di 31,0 cm dallo specchio e la luce proveniente da una piccola pila tascabile attraversa la diapositiva e va a colpire la parete. La disposizione di tutti questi oggetti è simile a quella della figura **13.20A** del testo.


- ▶ A quale distanza dalla parete deve essere lo specchio?
- ▶ Sapendo che l'altezza dell'oggetto rappresentato nella diapositiva è 0,95 cm, qual è l'altezza dell'immagine?
- ▶ Come deve essere girata la diapositiva perché l'immagine dell'oggetto risulti diritta?

19 * Lo specchietto retrovisore esterno di un'automobile ha una lunghezza focale di $-7,0$ m. Dietro l'auto, un camion procede a 11 m dallo specchietto. Calcola:

- ▶ la distanza dell'immagine del camion.
- ▶ l'ingrandimento del camion.

20 * Un piccolo francobollo è posto davanti a uno specchio concavo di raggio R , in modo tale che l'immagine ha la stessa distanza del francobollo dallo specchio. Determina:

- ▶ la distanza dell'oggetto in funzione di R .
- ▶ l'ingrandimento dell'immagine.
- ▶ Stabilisci se l'immagine è diritta o rovesciata. Traccia un diagramma dei raggi per valutare la situazione.

21 *  A concave mirror ($f = 45$ cm) produces an image whose distance from the mirror is one-third the object distance.

- ▶ Determine the object distance and the (positive) image distance.

22 * L'immagine del Sole al tramonto che si vede in uno specchio sferico è un'immagine virtuale che si forma dietro lo specchio a una distanza di 12,0 cm da esso.

- ▶ Lo specchio è concavo o convesso? Perché?
- ▶ Qual è il raggio di curvatura dello specchio?

23 ** Uno specchio concavo per trucco è costruito in modo da formare un'immagine virtuale di dimensione doppia di quella di un oggetto posto a 14 cm da esso.

- ▶ Calcola il raggio di curvatura dello specchio.

24 * Un oggetto è posto davanti a uno specchio convesso e l'altezza della sua immagine è un quarto della sua altezza.

- ▶ Qual è il rapporto p/f tra la distanza dell'oggetto e la distanza focale dello specchio?

25 ****** Uno stesso oggetto viene posto davanti a due specchi sferici A e B alla stessa distanza da essi. Gli ingrandimenti prodotti dai due specchi sono $m_A = 4,0$ e $m_B = 2,0$.

► Calcola il rapporto f_A/f_B tra le distanze focali dei due specchi.

26 ****** Uno specchio convesso di lunghezza focale $-24,0$ cm forma un'immagine con un ingrandimento pari a $0,150$.

► Come e quanto deve essere spostato l'oggetto perché la dimensione dell'immagine raddoppi?

27 ****** Uno specchio concavo ha una lunghezza focale di $30,0$ cm. La distanza fra un oggetto e la sua immagine è $45,0$ cm. Calcola la distanza dell'oggetto e dell'immagine dallo specchio nell'ipotesi che:

- l'oggetto stia oltre il centro di curvatura.
- l'oggetto stia tra il fuoco e lo specchio.

30 ***** Un oggetto è posto davanti a uno specchio convesso. Disegna in scala uno specchio convesso con il raggio di curvatura di 15 cm e un oggetto alto 4 cm a una distanza di 25 cm da esso. Traccia un diagramma dei raggi per determinare la posizione dell'immagine e la sua altezza. Adesso sposta l'oggetto più vicino allo specchio, a una distanza di 5 cm da esso.

- Determina di nuovo la posizione dell'immagine con un diagramma dei raggi.
- Quando l'oggetto è più vicino allo specchio, il valore assoluto della distanza dell'immagine aumenta o diminuisce? E il valore assoluto dell'altezza dell'immagine aumenta o diminuisce?
- Qual è il rapporto tra l'altezza dell'immagine quando la distanza dell'oggetto è 5 cm e l'altezza dell'immagine quando la distanza dell'oggetto è 25 cm? (Indica la tua risposta con una sola cifra significativa).

31 ***** Uno specchio concavo ha una distanza focale di 42 cm. Un'immagine formata da questo specchio è davanti allo specchio a una distanza di 97 cm da esso.

► Qual è la distanza dell'oggetto?

32 ***** L'immagine di un oggetto formata da uno specchio concavo è davanti allo specchio a una distanza di 26 cm da esso. La distanza focale dello specchio è 12 cm.

► Qual è la distanza dell'oggetto dallo specchio?

33 ***** Per truccarsi un clown pone il suo viso a 27 cm da uno specchio. L'immagine si forma 65 cm dietro lo specchio.

► Determina la lunghezza focale dello specchio e l'ingrandimento.

34 ***** Un oggetto posto davanti a uno specchio convesso a una distanza di 25 cm ha un'immagine posta dietro lo specchio a una distanza di 17 cm da esso.

► Qual è la distanza dell'immagine dietro lo specchio se la distanza dell'oggetto davanti allo specchio è 19 cm?

35 ****** Sia la superficie interna sia quella esterna di uno specchio sferico sono riflettenti. Quando lo specchio è usato come specchio convesso, l'ingrandimento è $+1/4$.

► Qual è l'ingrandimento quando è usato come specchio concavo, se l'oggetto è posto alla stessa distanza?

36 ***** Una candela è posta davanti a uno specchio convesso a una distanza di 15 cm. Quando lo specchio convesso viene sostituito con uno specchio piano, l'immagine della candela si allontana di $7,0$ cm.

► Calcola la distanza focale dello specchio convesso.

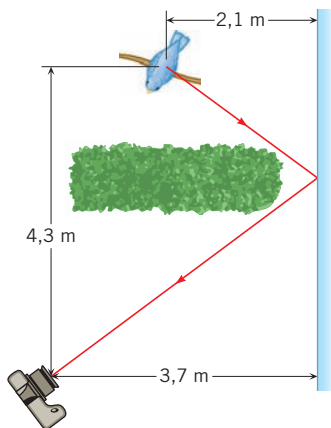
37 ***** Un oggetto è posto a $14,0$ cm da uno specchio convesso. L'immagine si forma $7,00$ cm dietro lo specchio. Un secondo oggetto, alto il doppio del primo, è posto davanti allo specchio ma in un punto diverso dal primo. L'immagine del secondo oggetto ha la stessa altezza di quella del primo.

► Calcola la distanza del secondo oggetto dallo specchio.

PROBLEMI FINALI

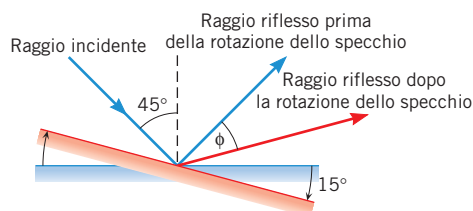
28 ***** Stai cercando di fotografare una colomba posata su un ramo di un albero, ma una siepe alta ti impedisce la visuale diretta. Tuttavia, uno specchio piano situato nella posizione indicata in figura riflette la luce proveniente dalla colomba in modo che i raggi riflessi arrivino alla tua macchina fotografica.

► Quale distanza devi impostare sull'obiettivo perché l'immagine della colomba risulti perfettamente a fuoco?



29 ***** Un raggio luminoso colpisce uno specchio piano con un angolo di incidenza di 45° . Lo specchio viene poi ruotato di 15° nella posizione indicata in rosso nella figura, mentre il raggio incidente mantiene la sua direzione.

- Di quale angolo ϕ viene ruotato il raggio riflesso?
- Quale sarebbe la risposta alla domanda precedente se l'angolo di incidenza fosse di 60° anziché di 45° ?

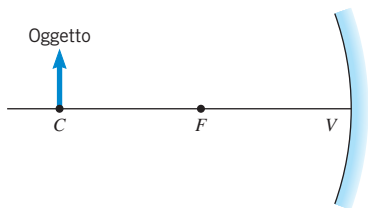


QUESITI

- 1 Enuncia e spiega la legge della riflessione.
- 2 Spiega le regole per costruire l'immagine negli specchi sferici.
- 3 Descrivi le caratteristiche tecniche degli specchi concavi e di quelli convessi.
- 4 Definisci i concetti di immagine *reale* e *virtuale* specificando i tipi di immagine che si formano attraverso gli specchi piani, concavi e convessi.
- 5 Ricava l'equazione dei punti coniugati per gli specchi sferici e illustra con un disegno la costruzione di un'immagine formata da uno specchio concavo.

OLIMPIADI DELLA FISICA

- 1 Nella figura è schematizzato uno specchio sferico concavo e un oggetto sottile, perpendicolare all'asse ottico e posto con un'estremità nel centro di curvatura C , dello specchio.

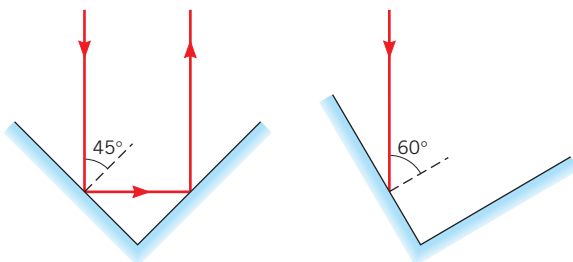


Se l'oggetto viene spostato lungo l'asse, mentre si avvicina al fuoco, l'immagine:

- A rimpicciolisce e si avvicina allo specchio.
- B rimpicciolisce e si allontana dallo specchio.
- C mantiene le medesime dimensioni e si avvicina allo specchio.
- D ingrandisce e si avvicina allo specchio.
- E ingrandisce e si allontana dallo specchio.

(Gara di 1° livello edizione 2008)

- 2 Un raggio di luce incide su una coppia di specchi piani posti ad angolo retto, rigidamente collegati tra loro. L'angolo di incidenza sul primo specchio è di 45° , come mostrato nella figura sotto a sinistra. Se l'insieme dei due specchi viene rigidamente ruotato in modo che l'angolo di incidenza sul primo specchio sia 60° (figura sotto a destra), che cosa succede alla direzione del raggio riflesso dal secondo specchio?

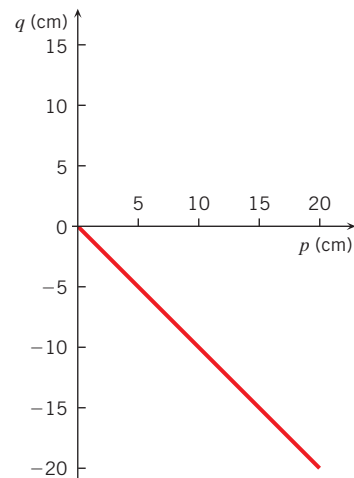


- A Ruoterà di 15° .
- B Ruoterà di 30° .

- C Ruoterà di 45° .
 - D Ruoterà di 60° .
 - E Non ruoterà affatto.
- (Gara di 1° livello edizione 2008)

- 3 Un oggetto è collocato davanti a uno specchio sferico concavo, a una distanza di 12 cm. L'immagine è diritta ed è due volte più grande dell'oggetto. L'immagine è:
 - A davanti allo specchio, a 6 cm di distanza, e reale.
 - B dietro allo specchio, a 6 cm di distanza, e virtuale.
 - C davanti allo specchio, a 12 cm di distanza, e virtuale.
 - D davanti allo specchio, a 24 cm di distanza, e reale.
 - E dietro allo specchio, a 24 cm di distanza, e virtuale.
 (Gara di 1° livello edizione 2007)

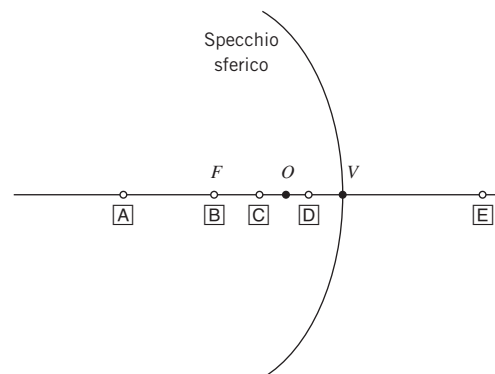
- 4 Nel grafico è rappresentato l'andamento della coordinata q dell'immagine di un oggetto, prodotto da uno specchio, in funzione della coordinata p dell'oggetto, rispetto alla posizione dello specchio stesso.



Di che tipo di specchio si tratta?

- A Specchio sferico concavo.
 - B Specchio sferico convesso.
 - C Specchio parabolico.
 - D Specchio piano.
 - E L'andamento non si adatta a nessun tipo di specchio.
- (Gara di 1° livello edizione 2006)

- 5 In figura è mostrato uno specchio sferico concavo; sono indicati il fuoco F e la posizione di un oggetto O . In quali dei punti indicati si trova l'immagine?



(Gara di 1° livello edizione 2005)

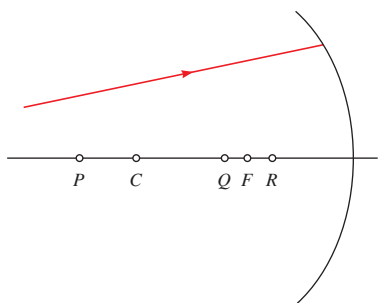
6 Uno studente alto 2 metri, stando in piedi, riesce a vedere interamente il proprio corpo in uno specchio verticale. L'altezza minima dello specchio per cui questo è possibile è:

- A 0,5 m
- B 1,0 m
- C 1,5 m
- D 2,0 m
- E 2,5 m

(Gara di 1° livello edizione 2004)

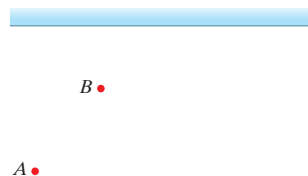
7 La figura mostra un raggio di luce che incide su uno specchio sferico. I punti F e C sono rispettivamente il fuoco e il centro dello specchio. Successivamente, il raggio riflesso passerà dal punto:

- A R
- B F
- C Q
- D C
- E P



(Gara di 1° livello edizione 2004)

8 Un osservatore vede riflessi in uno specchio piano gli oggetti A e B ; la situazione vista dall'alto è rappresentata in figura. Dopo aver riprodotto la figura, segnare su quella almeno un punto P dal quale l'osservatore vede allineate le immagini degli oggetti e indicare in quali regioni deve mettersi l'osservatore per vedere A a destra di B oppure B a destra di A , mediante una costruzione geometrica brevemente commentata.



(Gara di 2° livello edizione 2000)