

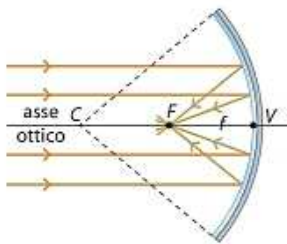


## 14.3

## La riflessione sugli specchi curvi

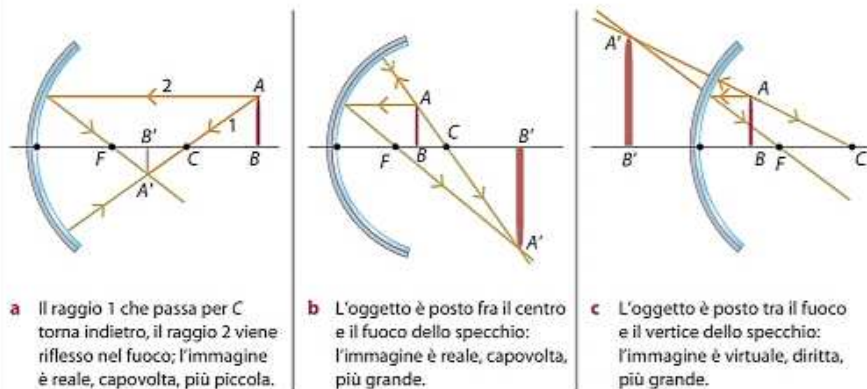
**IDEA-CHIAVE** L'immagine di un oggetto su uno specchio curvo può essere reale o virtuale, più piccola o più grande. La posizione dell'immagine si trova con la formula dei punti coniugati.

**Figura 1**  
Elementi dello specchio concavo.

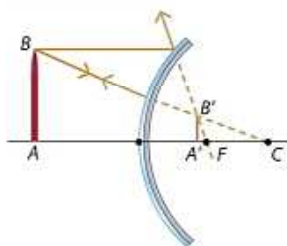


**RICHIAMO**  
Il raggio è perpendicolare alla circonferenza.

**Figura 2**  
Costruzione dell'immagine.



**Figura 3**  
L'immagine di uno specchio convesso è virtuale.



### Nomenclatura sugli specchi curvi

Uno specchio curvo è formato da una piccola calotta sferica di materiale trasparente, che viene annerita da una parte per riflettere la luce. Se la superficie riflettente è dalla stessa parte del centro della sfera lo specchio si dice *concavo* (→ figura 1), altrimenti si dice *convesso*.

L'*asse ottico* dello specchio è la retta che passa per il centro della sfera da cui proviene lo specchio; l'asse ottico intercetta la calotta sferica in un punto V che si chiama *vertice* dello specchio.

I raggi paralleli all'asse ottico vengono riflessi in un punto che si chiama fuoco dello specchio (F). La distanza di FV si chiama *distanza focale* dello specchio (simbolo  $f$ ). Se lo specchio ha una piccola apertura, il fuoco si trova nel punto medio del segmento CV, quindi la distanza focale è uguale alla metà del raggio di curvatura  $r$  dello specchio.

### Immagine formata da uno specchio curvo

Cerchiamo di costruire l'immagine di una penna. Il raggio 1 (→ figura 2a) esce dalla punta, passa per il centro di curvatura dello specchio e arriva sulla superficie riflettente con un angolo di incidenza nullo. Per la legge della riflessione, questo raggio torna indietro nella stessa direzione di quello incidente.

Il raggio 2 è parallelo all'asse ottico; incide sullo specchio, viene riflesso con un angolo uguale a quello incidente e passa per il fuoco F. L'immagine della punta della penna si trova nell'intersezione dei due raggi riflessi.

La penna completa è un insieme di tante parti luminose puntiformi; per ognuna di esse si può trovare l'immagine con la stessa costruzione e si ottiene l'immagine completa dell'oggetto.

L'immagine è più piccola ed è capovolta. Inoltre, l'immagine è reale perché su di essa arrivano i raggi luminosi. Se però spostiamo la penna verso lo specchio (→ figura 2b, 2c), l'immagine cambia. La forma, le dimensioni e il tipo (reale o virtuale) dell'immagine che fornisce uno specchio concavo dipendono sia dalla distanza focale sia dalla distanza dell'oggetto dallo specchio.

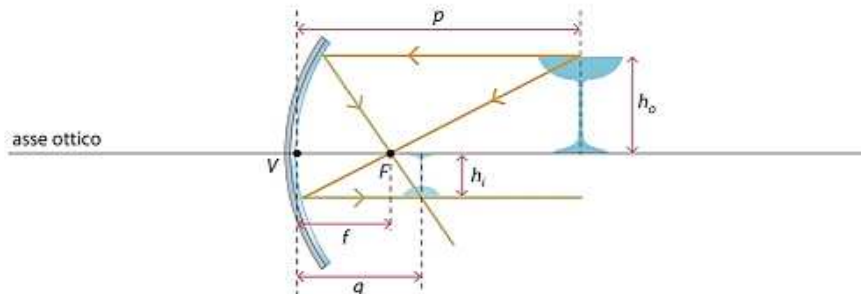
Nella → figura 3 è illustrata la costruzione dell'immagine data da uno specchio convesso. I raggi riflessi divergono dallo specchio e quindi non si incontrano. L'immagine si trova sui prolungamenti dei raggi riflessi ed è, quindi, un'immagine virtuale.





## ■ La formula dei punti coniugati

Indichiamo con  $p$  la distanza dell'oggetto dallo specchio, con  $q$  la distanza dell'immagine (misurate entrambe rispetto al punto  $V$ ), con  $f$  la distanza focale [→ figura 4].



**Figura 4**

Le grandezze  $p$ ,  $q$  e  $f$  sono misurate rispetto al vertice  $V$  dello specchio.

Per specchi di piccola apertura, vale la formula dei punti coniugati:

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

distanza focale (m)
distanza dell'immagine da V (m)

distanza dell'oggetto da V (m)

**ESEMPIO 1** Una matita che dista 10 cm da uno specchio concavo, forma un'immagine a 40 cm dallo specchio. La distanza focale  $f$  soddisfa all'equazione:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{10} + \frac{1}{40}$$

che risolta dà  $f = 8$  cm.

La formula dei punti coniugati vale sia per gli specchi concavi che per quelli convessi con la seguente convenzione: la distanza di ciò che si trova davanti allo specchio è positiva, la distanza di ciò che si trova dietro lo specchio è negativa. Pertanto  $p$  è sempre positiva perché l'oggetto sta in ogni caso davanti allo specchio;  $q$  è positiva per le immagini reali, negativa per quelle virtuali. La distanza focale  $f$  è positiva per lo specchio concavo, negativa per quello convesso.

## ■ L'ingrandimento

L'ingrandimento lineare che fornisce lo specchio è il rapporto fra l'altezza dell'immagine  $h_i$  e l'altezza dell'oggetto  $h_o$ . Indicando con  $G$  l'ingrandimento, possiamo scrivere

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

Si può dimostrare che:

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

pertanto l'ingrandimento si calcola con la formula

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

**ESEMPIO 2** L'immagine della matita dell'esempio precedente è quattro volte più grande dell'oggetto.

Infatti, l'ingrandimento è:  $G = \frac{40 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 4$ .

### MATEMATICA

Per risolvere l'equazione rispetto all'incognita  $f$ , troviamo il m.c.m. a destra del segno uguale:

$$\frac{1}{f} = \frac{p+q}{p \cdot q}; \text{ poi uguagliamo}$$

i reciproci dei due membri

$$\text{e otteniamo: } f = \frac{p \cdot q}{p+q}$$



Applica definizioni e leggi a p. F 9





## 14.2 La riflessione della luce

## APPLICA DEFINIZIONI E LEGGI

## PROBLEM SOLVING 1 ► CONOSCENZE

## ■ Raggi riflessi e raggi rifratti

- 1 A volte capita che, guardando attraverso il vetro di una finestra, oltre al paesaggio antistante si vede la propria immagine riflessa.
  - Per quale ragione?
- 2 Sulle rive di un lago di montagna scorgi nell'acqua gli alberi che fanno da corona al lago.



► Quale fenomeno ottico è in gioco?

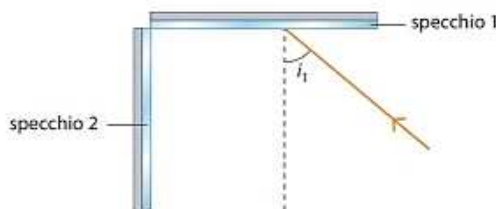
## ■ Le leggi della riflessione

## 3 Vero o falso?

- a) Il piano di incidenza è il piano su cui arriva il raggio incidente.  V  F
- b) Un raggio di luce che incide perpendicolarmente su uno specchio piano ha un angolo di incidenza di  $0^\circ$ .  V  F
- c) L'angolo di incidenza è l'angolo tra il raggio incidente e la superficie dello specchio.  V  F
- d) L'angolo di riflessione e quello di incidenza sono sempre uguali.  V  F

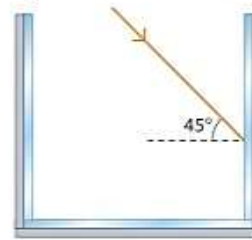
- 4 Un raggio incide su uno specchio piano con un angolo di  $40^\circ$ .
  - Disegna il raggio incidente e il raggio riflesso.
  - Quanto vale l'angolo che il raggio riflesso forma con lo specchio?
  - Calcola l'angolo tra il raggio incidente e quello riflesso.

- 5 Due specchi piani sono perpendicolari. Un raggio di luce incide su uno dei due specchi, come in figura.



- Mediante un goniometro, disegna il raggio riflesso.
- Spiega che cosa succede al raggio riflesso della domanda precedente.

- 6 Una scatola ha tre pareti metalliche riflettenti. Un raggio incide sulla parete di destra con un angolo di  $45^\circ$ .



- Disegna il raggio riflesso.
- Il raggio riflesso incide sul fondo e viene riflesso; traccia il percorso del raggio finché esce dalla scatola.

## ■ La costruzione dell'immagine

- 7 Un ragazzo si trova a 3,0 m da uno specchio piano.
  - Qual è la distanza del ragazzo dalla sua immagine?
- 8 Una sorgente puntiforme è posta davanti a uno specchio piano, a 10 cm da esso.
  - Dove si forma la sua immagine?
  - Costruisci l'immagine.
- 9 Una figura a forma di trapezio rettangolo è posta davanti a uno specchio piano.
  - Indica con  $A, B, C, D$  i suoi vertici.
  - Costruisci la sua immagine.
  - L'area del trapezio immagine è uguale o diversa da quella del trapezio oggetto?
- 10 Lo specchio piano restituisce sempre un'immagine virtuale in cui la destra è scambiata con la sinistra.
  - Se metti davanti a uno specchio un foglio con la scritta VI (numero 6) che cosa si legge nello specchio?
- 11 L'immagine virtuale formata da uno specchio è la zona d'incontro dei prolungamenti dei raggi riflessi, non degli effettivi raggi riflessi.
  - Le immagini virtuali possono essere raccolte su di uno schermo?
- 12 Considera la parola figlia.
  - Disegna la lettera F davanti a uno specchio piano, poi disegna la sua immagine per punti.
  - Ripeti la costruzione per le altre lettere.
- 13 Una matita di estremi  $A$  e  $B$  è lunga 15 cm. L'estremo  $A$  dista 3,0 cm da uno specchio piano, l'estremo  $B$  dista 6,0 cm.
  - Disegna per punti l'immagine della matita.
  - A quale distanza dallo specchio si trovano le immagini  $A'$  e  $B'$  degli estremi?



Altri problemi sulla **riflessione della luce** a fine unità, p. F 26





## 14.3 La riflessione sugli specchi curvi

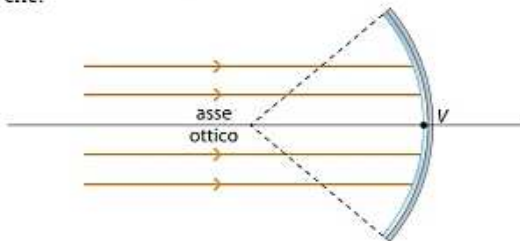
## APPLICA DEFINIZIONI E LEGGI

## ■ Nomenclatura sugli specchi curvi

- 1 Considera un mestolo di acciaio.
- Può essere considerato uno specchio curvo? Perché?
  - Quale superficie del mestolo è assimilabile a uno specchio convesso? E a uno specchio concavo?
- 2 Vero o falso?
- In uno specchio curvo, i raggi paralleli all'asse ottico vengono tutti riflessi nel fuoco.  V  F
  - La distanza focale di uno specchio curvo con una piccola apertura è metà del raggio di curvatura.  V  F
  - In uno specchio curvo il fuoco si trova sull'asse ottico.  V  F
  - L'immagine prodotta da uno specchio convesso è reale e rimpicciolita.  V  F

## ■ Immagine formata da uno specchio curvo

- 3 L'immagine di una bottiglia ottenuta da uno specchio curvo è reale, capovolta e ingrandita.
- Lo specchio è concavo o convesso?
  - Dove si trova la bottiglia rispetto al centro e al fuoco dello specchio?
- 4 Disegna una freccia tra vertice e fuoco di uno specchio concavo.
- Costruisci l'immagine della freccia.
  - Quali sono le caratteristiche dell'immagine?
- 5 Uno specchio curvo ha un raggio di curvatura di 20 cm.
- Trova la posizione dell'immagine di un chiodo posto a 30 cm dal vertice dello specchio.
  - Ripeti la costruzione per un chiodo posto prima a 20 cm dal vertice, poi a 10 cm.
  - Per ogni immagine trovata specifica le caratteristiche.



- 6 Uno specchio da trucco è uno specchio concavo. Una donna si trucca gli occhi stando a 10 cm da uno specchio concavo di distanza focale 30 cm.
- Se la donna si allontana dallo specchio la sua immagine si ingrandisce o si rimpicciolisce?
- 7 Un bicchiere si trova sull'asse ottico di uno specchio convesso, tra il fuoco e il centro dello specchio.
- Che tipo di immagine si ottiene?
  - Se il bicchiere viene spostato oltre il centro dello specchio, come cambia l'immagine?

## ■ La formula dei punti coniugati

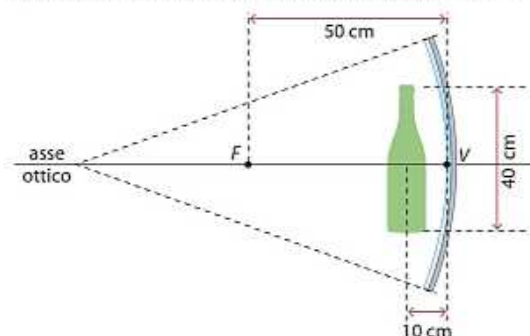
- 8 Un fiammifero è posto sull'asse ottico di uno specchio sferico concavo ( $f = 50$  cm) a 30 cm dal vertice.
- Rappresenta la situazione con un disegno.
  - Determina la posizione della sua immagine.
- 9 Il fiammifero dell'esercizio precedente è posto a 30 cm dal vertice di uno specchio convesso con  $f = 50$  cm.
- Trova la posizione dell'immagine.
- 10 Nella formula dei punti coniugati,  $p$  è la distanza dell'oggetto e  $q$  quella dell'immagine.
- Rispetto a quale punto sono misurate le due distanze?
  - Ricavando  $q$  dalla formula, come si capisce se l'immagine è reale o virtuale?
- 11 Nella tabella seguente  $f$ ,  $p$  e  $q$  sono espresse in cm.

$f$	10	12	.....	-15
$p$	20	.....	30	.....
$q$	.....	30	40	15

- Completa la tabella.

## ■ L'ingrandimento

- 12 Un righello è a 12 cm da uno specchio convesso. L'immagine è virtuale e ha altezza un terzo di quella reale.
- Qual è l'ingrandimento dello specchio?
  - A che distanza si forma l'immagine?
  - Qual è il raggio di curvatura dello specchio?
- 13 Uno specchietto retrovisore ha una distanza focale di 16 cm. Un ragazzo di 160 cm è a 2,2 m di distanza.
- Se l'autista osserva l'immagine del ragazzo quanto lo vede alto?
- 14 Una bottiglia alta 40 cm è a 10 cm dal vertice di uno specchio concavo, di distanza focale uguale a 50 cm.



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



Altri problemi sulla riflessione sugli specchi curvi a fine unità, p. F 27



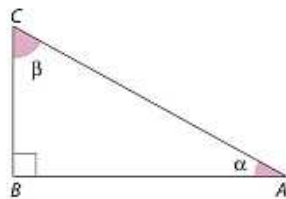


## 14.4

## La rifrazione della luce

**IDEA-CHIAVE** La luce che incide sulla superficie di separazione di due mezzi trasparenti cambia direzione, cioè si avvicina o si allontana dalla normale nel punto di incidenza.

**Figura 1**  
Il cateto  $BC$  si oppone all'angolo  $\alpha$ ,  $AC$  è l'ipotenusa del triangolo.



**Tabella 1**  
Seno di alcuni angoli

Angolo	Seno
30°	0,500
45°	0,707
60°	0,866
75°	0,966
90°	1,00

**Figura 2**  
Percorso del raggio rifratto.

### Il seno di un angolo

Nel triangolo rettangolo della → figura 1, il cateto  $BC$  è opposto all'angolo acuto  $\alpha$ .

Il rapporto fra il cateto opposto all'angolo  $\alpha$  e l'ipotenusa del triangolo si chiama **seno di  $\alpha$** .

Indicando il seno dell'angolo  $\alpha$  con la scrittura  $\text{sen } \alpha$  (si legge «seno di  $\alpha$ »), possiamo scrivere:

$$\text{sen } \alpha = \frac{BC}{AC}$$

Se nello stesso triangolo consideriamo l'angolo  $\beta$ , possiamo scrivere anche l'uguaglianza:

$$\text{sen } \beta = \frac{AB}{AC}$$

perché  $AB$  è il cateto opposto all'angolo  $\beta$ .

Il seno di un angolo non ha unità di misura, perché rapporto tra due segmenti. Alcuni valori del seno sono indicati nella → tabella 1, altri valori si possono trovare con una calcolatrice scientifica.

Attenzione a non confondere seno e coseno di un angolo; anche il coseno è un numero, però è il rapporto tra il cateto *adiacente* all'angolo e l'ipotenusa.

### La prima legge della rifrazione

Nelle → figure 2a e 2b è illustrato un raggio di luce che incontra la superficie di separazione di due mezzi trasparenti. In entrambi i casi il raggio viene deviato dalla sua traiettoria rettilinea e prosegue nel secondo mezzo. Notiamo però che c'è una differenza: se il raggio passa da un mezzo meno denso a uno più denso [→ figura 2a] si avvicina alla normale; viceversa, se il raggio passa da un mezzo più denso a uno meno denso [→ figura 2b], si allontana dalla normale.



**a** Il raggio di luce che passa da un mezzo meno denso (aria) a uno più denso (acqua) viene deviato e si avvicina alla normale.

**b** Il raggio che passa dal mezzo più denso (acqua) a uno meno denso (aria) si allontana dalla normale.

Il raggio che penetra nel secondo mezzo si chiama *raggio rifratto*. L'angolo  $i_2$  che il raggio rifratto forma con la normale si chiama *angolo di rifrazione*.

Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale nel punto di incidenza appartengono a uno stesso piano (**prima legge della rifrazione**).



**1 FILMATO**  
• La rifrazione della luce





## La seconda legge della rifrazione

Consideriamo il passaggio dall'aria all'acqua e tracciamo una circonferenza con il centro nel punto di incidenza  $I$  [→ figura 3]. Il raggio incidente interseca la circonferenza nel punto  $A$  e il raggio rifratto la interseca nel punto  $B$ . Se aumentiamo l'angolo di incidenza, anche l'angolo di rifrazione aumenta; viceversa, se diminuiamo l'angolo di incidenza anche quello di rifrazione diminuisce.

I segmenti  $AH$  e  $BK$  sono perpendicolari alla normale. Sperimentalmente si verifica che il rapporto fra i segmenti  $AH$  e  $BK$  è sempre lo stesso al variare dell'angolo di incidenza.

$$\frac{AH}{BK} = \text{costante}$$

Questa è la **seconda legge della rifrazione**.

Il valore della costante dipende dalle caratteristiche dei due mezzi.

Si può dimostrare che vale l'uguaglianza:

$$\frac{AH}{BK} = \frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2}$$

Perciò, possiamo esprimere la seconda legge della rifrazione con la formula:

$$\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = \text{costante}$$

Il rapporto fra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante.

Questo significa che, al variare dell'angolo di incidenza, varia anche l'angolo di rifrazione, però il rapporto tra i seni di questi angoli resta sempre identico.

Le leggi della rifrazione, come quelle della riflessione, sono state enunciate dal francese René Descartes (1596-1650) [→ figura 4] e, nello stesso periodo, dall'olandese Willebrord Snell (1581-1626).

**ESEMPIO 1** L'angolo di incidenza è  $i_1 = 40^\circ$  e quello di rifrazione  $i_2 = 26^\circ$ . Risulta:  $\text{sen } i_1 = 0,643$  e  $\text{sen } i_2 = 0,438$ ; il rapporto tra i seni è:

$$\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = 1,47$$

e si mantiene costante al variare dell'angolo di incidenza.

## La rifrazione e la natura dei mezzi

Per via sperimentale si verifica che il valore della costante è uguale al rapporto fra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e l'indice di rifrazione del primo mezzo:

$$\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Si può anche scrivere:

$$n_1 \cdot \text{sen } i_1 = n_2 \cdot \text{sen } i_2$$

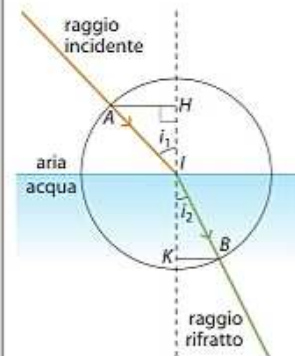
Qual è il vantaggio di questa formulazione della seconda legge della rifrazione?

Se conosciamo l'angolo di incidenza e gli indici di rifrazione dei due mezzi, possiamo calcolare il seno dell'angolo di rifrazione:

$$\text{sen } i_2 = \frac{\text{sen } i_1 \cdot n_1}{n_2}$$

e quindi, guardando sulla tabella del seno o mediante una calcolatrice, possiamo individuare l'angolo di rifrazione senza ricorrere alla costruzione geometrica dei segmenti  $AH$  e  $BK$ .

**Figura 3**  
I segmenti  $AH$  e  $BK$  sono perpendicolari alla normale nel punto di incidenza  $I$ .



**Figura 4**  
René Descartes.



Foto: Rocca/Contrasto, A. Bernasconi



Applica definizioni e leggi a p. F 14



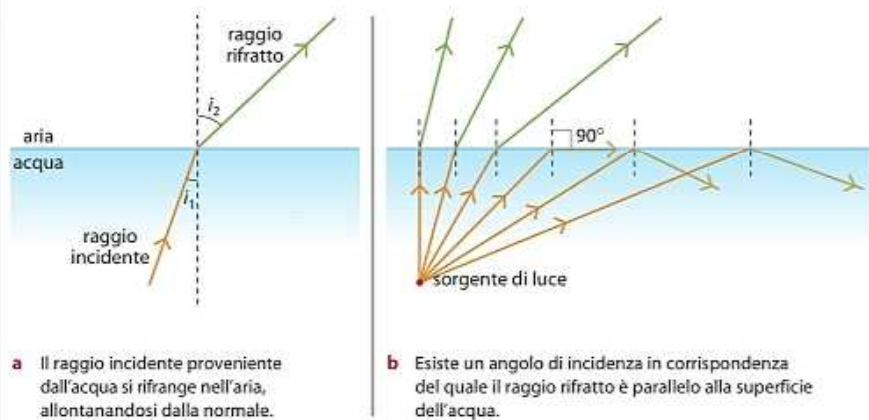


## 14.5

## La riflessione totale

**IDEA-CHIAVE** Nel passaggio da un mezzo più denso a uno meno denso, la luce può anche non subire la rifrazione, ma essere riflessa totalmente.

**Figura 1**  
Riflessione totale.



All'angolo di incidenza limite corrisponde un angolo di rifrazione  $i_2$  tale che

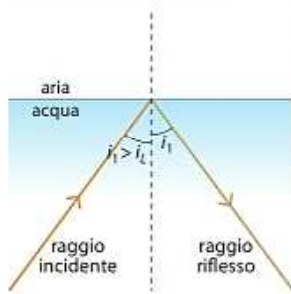
$$\sin i_2 = \sin 90^\circ = 1$$

Indichiamo con  $i_L$  l'angolo limite e applichiamo la seconda legge della rifrazione:

$$\frac{\sin i_L}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin i_L = \frac{n_2}{n_1}$$

**Figura 2**  
L'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite. Non c'è rifrazione, ma riflessione totale perché il raggio rimane nel mezzo da cui proviene.



**ESEMPIO 1** Quando la luce passa dal vetro ( $n_1 = 1,5$ ) all'aria ( $n_2 = 1$ ), l'angolo limite soddisfa alla seguente uguaglianza:

$$\frac{\sin i_L}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{1,5} = 0,67$$

L'angolo il cui seno vale 0,67 è  $i_L = 42^\circ$ .

### La riflessione totale interna

Che cosa succede alla luce quando l'angolo di incidenza supera l'angolo limite? L'esperienza dimostra che il raggio incidente viene riflesso, come se la superficie di separazione dei due mezzi fosse uno specchio [→ figura 2].

Questo fenomeno si chiama **riflessione totale**.

Naturalmente la riflessione totale può avvenire solo quando la luce viaggia in un mezzo denso e cerca di passare in uno meno denso.





## ■ Prismi ottici

Nella → figura 3 è disegnato un prisma di vetro avente per sezione un triangolo rettangolo isoscele. Il raggio che incide sulla superficie  $AB$  prosegue dritto nel vetro, perché l'angolo di incidenza è uguale a zero. Il raggio, che prosegue nel vetro in linea retta, arriva sulla superficie di separazione vetro-aria con un angolo di incidenza di  $45^\circ$ .

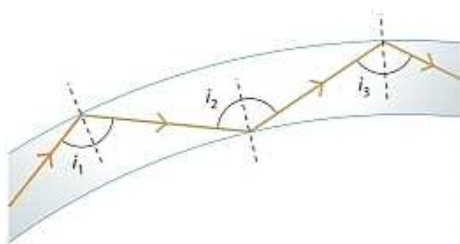
Poiché questo angolo è maggiore di  $42^\circ$  (angolo limite del vetro in aria), il raggio si riflette totalmente e rimane nel vetro. Incide sulla superficie  $AC$  e prosegue nella stessa direzione uscendo dal prisma. Il risultato finale è che il raggio emergente è perpendicolare a quello incidente.

Un prisma di questo genere serve per deviare un raggio di luce di  $90^\circ$ .

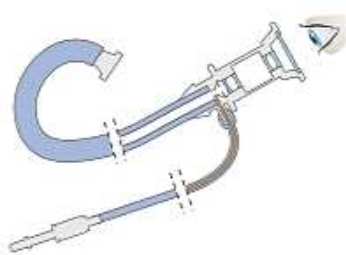
## ■ Le fibre ottiche

Le fibre ottiche costituiscono una delle più interessanti applicazioni della riflessione totale. Una fibra ottica è costituita da un materiale trasparente rivestito da una guaina opaca. La luce penetra nella fibra con un angolo di incidenza maggiore dell'angolo limite [→ figura 4a], perciò viene riflessa totalmente e prosegue il suo cammino subendo altre riflessioni totali. In questo modo, la luce si trasferisce da un estremo all'altro della fibra.

L'endoscopio, sfruttando la luce veicolata da fibre ottiche, permette di illuminare oggetti inaccessibili e quindi di osservarli [→ figura 4b]. L'endoscopio trova la sua principale applicazione in campo medico per osservare alcuni organi interni altrimenti difficilmente osservabili, come l'esofago, i bronchi, lo stomaco, l'intestino. L'endoscopio è utilizzato anche in campo industriale, per ispezionare zone di difficile accesso, come pozzi, cisterne, condotte ecc.



**a** La fibra ottica è un tubo sottile di materiale trasparente. La luce inviata dentro una fibra ottica subisce numerose riflessioni totali e non esce all'esterno.



**b** L'endoscopio serve per illuminare e quindi ispezionare corpi non facilmente raggiungibili.

Le fibre ottiche servono anche per trasportare dati a distanza e sono usate nel campo delle telecomunicazioni ad alta velocità.

Le fibre ottiche, infatti, non trasportano solo segnali analogici (cioè continui), ma consentono di trasmettere anche dati di tipo digitale (sequenze di 0 e di 1), a una velocità molto maggiore di quella dei tradizionali cavi coassiali telefonici.

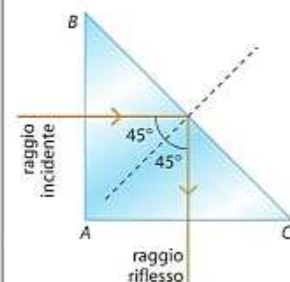
In una singola fibra ottica può viaggiare una quantità di dati dell'ordine di qualche Gigabit al secondo, per questo motivo sono particolarmente usate per i collegamenti internet.

Le fibre ottiche usate nelle telecomunicazioni [→ figura 5] presentano inoltre il vantaggio di avere una bassissima attenuazione: il segnale luminoso trasmesso, che subisce numerose riflessioni totali all'interno della fibra, è ancora leggibile dopo centinaia di chilometri senza bisogno di amplificarlo.

### MATEMATICA

In un triangolo rettangolo isoscele, gli angoli alla base misurano ognuno  $45^\circ$ .

**Figura 3**  
Il prisma cambia di  $90^\circ$  la direzione di un raggio luminoso.



**Figura 4**  
Le fibre ottiche.

**Figura 5**  
Fibre ottiche usate nelle telecomunicazioni.



Tommaso A. Neri, Basso X, Cluseri G. 2002



Applica definizioni e leggi a p. F 15





## 14.4 La rifrazione della luce

## APPLICA DEFINIZIONI E LEGGI

## PROBLEM SOLVING 1 ► CONOSCENZE

## ■ Il seno di un angolo

1 In un triangolo rettangolo un cateto misura 6,0 cm e l'altro cateto 8,0 cm.

- Qual è il seno dei due angoli acuti?
- Quanto valgono i due angoli?

## ■ La prima legge della rifrazione

## 2 Vero o falso?

- a) Il raggio incidente e quello rifratto appartengono a uno stesso piano.  V  F
- b) L'angolo di rifrazione si misura rispetto alla superficie di separazione tra i due mezzi.  V  F
- c) L'angolo di incidenza è sempre maggiore dell'angolo di rifrazione.  V  F
- d) Il raggio incidente e il raggio rifratto appartengono a due mezzi diversi.  V  F

3 Un raggio di luce incide sulla superficie di un bicchiere pieno di acqua ed emerge dalla parte opposta.

- Descrivi qualitativamente che cosa succede al raggio nei vari passaggi aria-vetro, vetro-acqua, acqua-vetro, vetro-aria.

## ■ La seconda legge della rifrazione

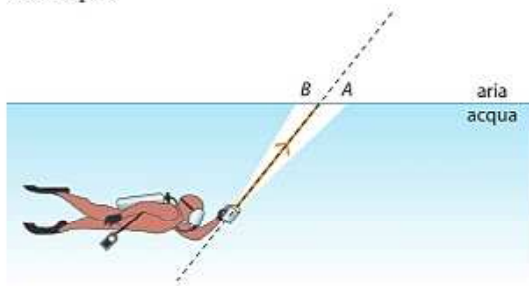
4 Un raggio luminoso incide su una lastra di vetro con un angolo di  $30^\circ$ , venendo in parte riflesso e in parte rifratto.

- Sapendo che il rapporto tra l'angolo di incidenza e quello di rifrazione è 1,6, calcola l'angolo di rifrazione.
- Quanto vale l'angolo di incidenza?

5 Un raggio luminoso, che attraversa il vetro di una finestra ed entra nella tua stanza, subisce due rifrazioni: sulla superficie di separazione aria-vetro e poi sulla superficie di separazione vetro-aria.

- Nelle due rifrazioni gli angoli di incidenza sono uguali?
- Gli angoli di rifrazione sono uguali?

6 Un sommozzatore accende una lampada, quando è sott'acqua.



- Dove posizioneresti l'occhio per raccogliere la luce della lampada sott'acqua: nella zona A oppure nella zona B?

7 Un raggio luminoso che sta viaggiando in un mezzo, passa in un altro mezzo.

Supponi che  $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = 1,4$ .

- Utilizzando una calcolatrice completa la tabella seguente:

$i_1$	$25^\circ$	$50^\circ$
$i_2$	.....	.....

- Ad angolo di incidenza doppio corrisponde angolo di rifrazione doppio?

8 Nel passaggio da un mezzo meno denso a uno più denso, il raggio incidente viene deviato.

- Angolo di incidenza e angolo di rifrazione sono uguali? Spiega.
- Che cosa succede se facciamo aumentare l'angolo di incidenza?

## ■ La rifrazione e la natura dei mezzi

9 Un acquario in plexiglas (indice di rifrazione 1,5) contiene dell'acqua (indice di rifrazione 1,33). Un raggio che viaggia in aria e incide sul plexiglas subisce due rifrazioni: la prima sulla superficie aria-plexiglas e l'altra sulla superficie plexiglas-acqua.

Possiamo studiare entrambe le rifrazioni con la seconda legge.

- Quanto vale la costante nella prima rifrazione?
- Quanto vale nella seconda rifrazione?

10 Un raggio di luce incide su una lastra di vetro a facce piane parallele.

- Traccia il percorso del raggio.
- Dimostra che il raggio esce dalla lastra in direzione parallela a quella entrante.

11 Quando la luce passa dall'aria all'acqua, il rapporto tra gli indici di rifrazione vale 1,33.

- Nella rifrazione acqua-aria, il rapporto fra i due seni ha lo stesso valore?

► Se nella rifrazione acqua-glicerina il rapporto  $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = 1,1$ , quanto vale il rapporto tra i seni per la rifrazione glicerina-acqua?

12 Un raggio di luce penetra in una soluzione con un angolo di incidenza di  $40,0^\circ$  e viene deviato di  $15,0^\circ$  rispetto alla direzione di incidenza.

- Calcola il rapporto tra gli indici di rifrazione della soluzione e dell'aria.



Altri problemi sulla **rifrazione della luce** a fine unità, p. F 28





## 14.5 La riflessione totale

## APPLICA DEFINIZIONI E LEGGI

## ■ L'angolo limite

- Un raggio luminoso che si propaga in aria incide su un diamante.
  - Sapendo che l'angolo limite è  $24,4^\circ$ , calcola l'indice di rifrazione del diamante.
- Un fascio di luce monocromatica passa dal vetro ( $n = 1,50$ ) all'aria ( $n = 1,00$ ) e dal vetro all'acqua ( $n = 1,33$ ).
  - Calcola l'angolo limite nel passaggio vetro-aria.
  - Calcola l'angolo limite nel passaggio vetro-acqua.
- L'angolo limite di un pezzo di plastica in aria è  $38,5^\circ$ .
  - Qual è l'indice di rifrazione del pezzo di plastica?
  - Se la stessa plastica viene messa in acqua, l'angolo limite è lo stesso?

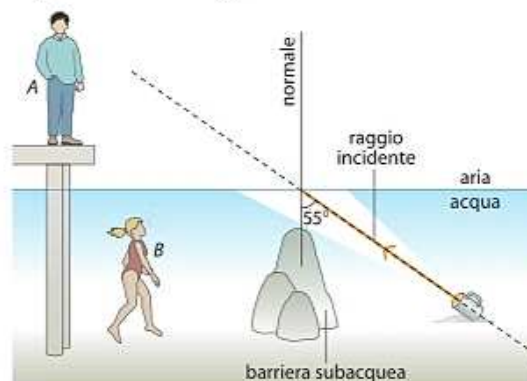
## ■ La riflessione totale interna

- Un raggio di luce che si propaga nel vetro ( $n = 1,50$ ) incide sulla superficie di separazione vetro-aria con un angolo di  $45^\circ$ .
  - Qual è l'angolo di rifrazione? Perché?
- Vero o falso?** Le affermazioni sono riferite alla riflessione totale.
  - La riflessione totale si ha quando l'angolo di incidenza è superiore all'angolo limite.  V  F
  - Se un raggio luminoso passa da un mezzo più denso a uno meno denso si ha sempre riflessione totale.  V  F
  - Se la luce passa dall'acqua al plexiglas, si ha sempre riflessione totale.  V  F
  - Con un angolo di incidenza di  $90^\circ$  si ha sempre riflessione totale.  V  F
- L'angolo limite per la rifrazione vetro-aria vale circa  $42^\circ$ . Due raggi che si stanno propagando in un blocco di vetro incidono sulla superficie di separazione vetro-aria con angoli rispettivamente di  $30^\circ$  e  $45^\circ$ .
  - Che cosa succede a questi due raggi?
- Un raggio luminoso colpisce un fermacarte cubico di plastica ( $n = 1,49$ ) che poggia su un tavolo.
  - Calcola l'angolo limite.
  - Se l'angolo di incidenza del raggio luminoso è  $60^\circ$ , disegna il percorso del raggio.
- La tabella che segue è relativa al passaggio di un raggio di luce dal vetro all'aria.

$i_1$	$\text{sen}(i_1)$	$n_1$	$n_2$	$\text{sen}(i_2)$	$i_2$
$30^\circ$	.....	1,5	1	.....	.....
$45^\circ$	.....			.....	.....

- Completala nelle parti mancanti.

- Un fascio di luce incide sulla superficie di separazione acqua-aria come in figura.



- Quale dei due ragazzi vede la luce emessa dal faretto?

## ■ Prismi ottici

- Un raggio incide sull'ipotenusa del prisma di vetro a sezione triangolare, come in figura.



- Costruisci il percorso del raggio finché esce dal prisma.
  - Di quanto viene deviato il raggio quando riemerge nell'aria?
- Il periscopio è un dispositivo molto usato nei sottomarini per osservare oggetti che si trovano sulla superficie dell'acqua senza dover emergere. Esso sfrutta due prismi a sezione triangolare.
    - Come devono essere disposti i due prismi per ottenere un periscopio?



## ■ Le fibre ottiche

- Le fibre ottiche sono tubi sottili che servono per trasportare la luce.
  - Qual è la caratteristica fondamentale di una fibra ottica?



Altri problemi sulla **riflessione totale** a fine unità, p. F 28





## 14.6

## Le lenti

**IDEA-CHIAVE** Le lenti formano immagini reali o virtuali, più piccole o più grandi dell'oggetto. La posizione dell'immagine si trova con la formula  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$

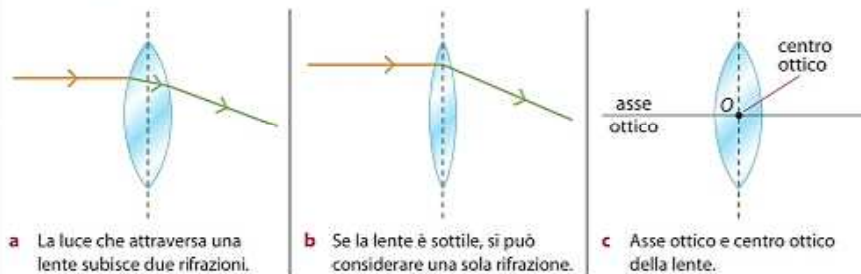
### Nomenclatura sulle lenti

Una lente è un corpo trasparente. Un raggio di luce che attraversa una lente subisce due rifrazioni [→ figura 1a]: la prima avviene sulla superficie aria-vetro, la seconda sulla superficie vetro-aria. Il raggio che entra nella lente si avvicina alla normale nel punto di incidenza; quando esce dalla lente si allontana dalla normale.

Per semplicità, consideriamo solo lenti che hanno uno spessore centrale trascurabile rispetto ai raggi delle superfici sferiche che delimitano la lente (*lenti sottili*). In tal modo possiamo supporre che la rifrazione sia una sola e non due [→ figura 1b].

Nella → figura 1c sono indicati l'*asse ottico* e il *centro ottico* O della lente.

**Figura 1**  
Lenti sottili.



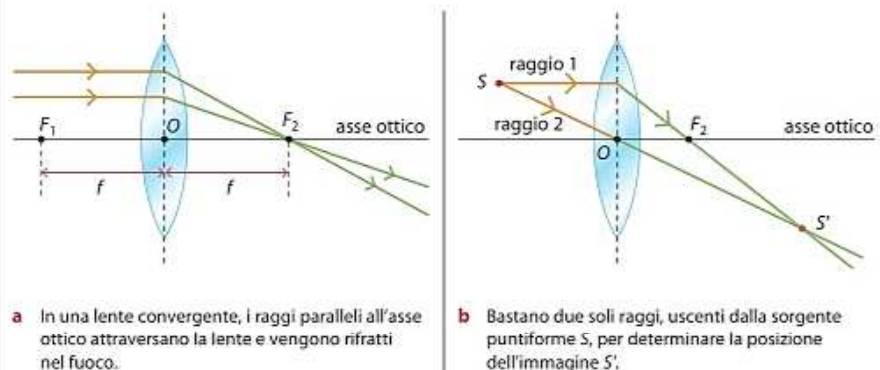
### Lenti convergenti

Le *lenti convergenti* sono quelle che fanno convergere i raggi paralleli all'asse ottico in un punto che sta dietro la lente, detto *fuoco* della lente [→ figura 2a]. Poiché la luce può incidere sulla lente sia da destra sia da sinistra, ogni lente ha due fuochi. La distanza del fuoco dal centro ottico O della lente è la *distanza focale*.

Le lenti formano immagini degli oggetti luminosi o illuminati; tali immagini sono reali o virtuali, più piccole o più grandi dell'oggetto, diritte o capovolte.

Per costruire l'immagine di un punto S, bastano due raggi: il raggio 1 parallelo all'asse ottico e che passa per il fuoco [→ figura 2b]; il raggio 2 che passa per il centro ottico della lente e la attraversa senza cambiare direzione.

**Figura 2**  
Lente convergente.



#### METODO

Un terzo raggio, utile nella costruzione dell'immagine, è quello che, provenendo da uno dei due fuochi, attraversa la lente ed esce in direzione parallela all'asse ottico.

L'immagine S' si trova nell'intersezione di questi due raggi o dei loro prolungamenti.

Un oggetto esteso può essere pensato come tante sorgenti puntiformi, perciò si può ripetere la stessa costruzione per ogni punto e ottenere l'immagine completa.





## Ricerca analitica dell'immagine di un oggetto

Indichiamo con  $p$  la distanza dell'oggetto dalla lente, con  $q$  la distanza dell'immagine, con  $f$  la distanza focale, misurate tutte rispetto al centro ottico  $O$  della lente [→ figura 3].

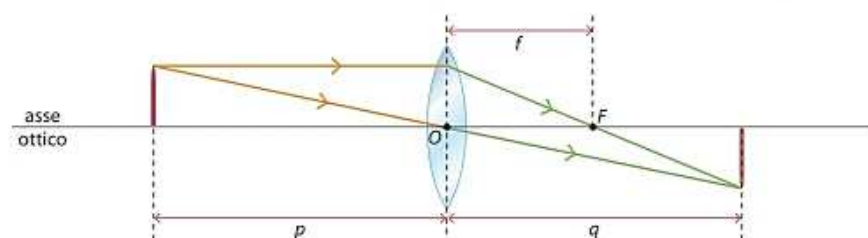


Figura 3

L'oggetto è a distanza  $p$  dal centro ottico. L'immagine si forma alla distanza  $q$  dal centro ottico;  $f$  è la distanza focale.

Si può dimostrare, con semplici costruzioni grafiche, che il tipo di immagine (reale o virtuale), la forma (diritta o capovolta) e le dimensioni (più piccola o più grande dell'oggetto) dipendono dal valore di  $p$  e di  $f$ .

Inoltre, quando l'immagine è a fuoco, le tre distanze  $p$ ,  $q$ ,  $f$  sono legate dalla **formula delle lenti sottili**:

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

La formula è simile a quella degli specchi curvi, la convenzione sui segni però è diversa. Infatti,  $q$  è positiva quando l'immagine si trova dalla parte opposta a quella da cui proviene la luce;  $q$  è negativa quando si trova dalla stessa parte da cui proviene la luce.

**ESEMPIO 1** Se oggetto e immagine della figura 3 distano entrambi 15 cm dal centro ottico della lente, la distanza focale della lente soddisfa all'equazione:

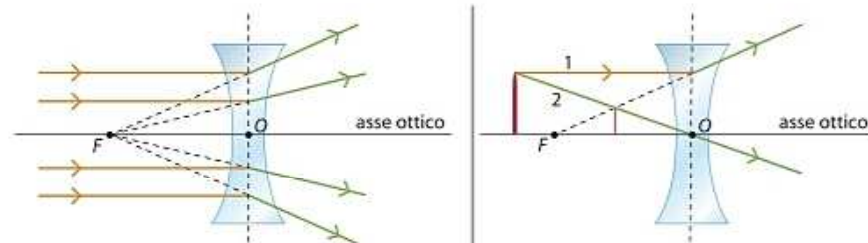
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{15} + \frac{1}{15}$$

che risolta dà il valore  $f = 7,5$  cm.

## Lenti divergenti

La lente divergente, contrariamente a quella convergente, fa divergere i raggi paralleli all'asse ottico [→ figura 4a]. I raggi rifratti non si incontrano, però i loro prolungamenti si incontrano nel punto  $F$  che rappresenta il fuoco della lente. La luce si propaga come se provenisse dal fuoco, in realtà viene da un oggetto molto lontano dalla lente.

Anche per le lenti divergenti, la costruzione grafica dell'immagine di una sorgente puntiforme viene effettuata considerando il raggio parallelo all'asse ottico e quello che passa per il centro della lente [→ figura 4b]. L'immagine si trova nell'intersezione dei prolungamenti dei due raggi rifratti ed è sempre virtuale.



**a** I raggi paralleli all'asse ottico divergono, uscendo dalla lente; i prolungamenti dei raggi rifratti si incontrano nel fuoco della lente.

**b** Due raggi luminosi bastano per costruire l'immagine della punta della penna.

Figura 4

Lente divergente.





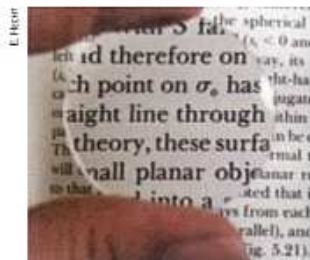
**BIOLOGIA**  
L'occhio, 2 pagine

**RICHIAMO**

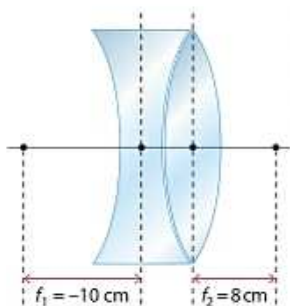
L'ingrandimento lineare è il rapporto fra l'altezza dell'immagine  $h_i$  e l'altezza dell'oggetto  $h_o$ :

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

**Figura 5**  
Una lente di ingrandimento.



**Figura 6**  
Due lenti sottili affiancate.



Se l'oggetto è esteso, come la penna della [→ figura 4b], si ripetono le stesse considerazioni fatte per le lenti convergenti: si trova l'immagine di alcuni suoi punti per ottenere l'immagine completa. Nella pratica, è possibile distinguere una lente divergente da una convergente toccandola: quella convergente è più spessa al centro che ai bordi, quella divergente invece è più spessa ai bordi.

Per le lenti divergenti, vale la formula delle lenti sottili con due differenze rispetto alle lenti convergenti: la distanza focale  $f$  è negativa; la distanza dell'immagine  $q$  è negativa.

**ESEMPIO 2** Se la penna è posta a 12 cm dalla lente divergente, che ha una distanza focale di -8,0 cm, la posizione dell'immagine si trova con l'equazione:

$$\frac{1}{12} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-8,0}$$

che risolta dà il valore

$$q = -4,8 \text{ cm}$$

## ■ L'ingrandimento

Come nel caso degli specchi curvi, anche l'ingrandimento di una lente [→ figura 5] si calcola con la formula:

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

Se la lente è divergente,  $q$  è negativo e quindi l'ingrandimento  $G$  risulta negativo. Per calcolare l'altezza dell'immagine si considera il valore assoluto di  $G$ :

$$h_i = |G| \cdot h_o$$

**ESEMPIO 3** L'ingrandimento che fornisce la lente dell'esempio precedente è:

$$G = \frac{q}{p} = \frac{-4,8 \text{ cm}}{12 \text{ cm}} = -0,4$$

Il valore assoluto di -0,4 è uguale a 0,4, perciò l'altezza dell'immagine è 0,4 volte quella dell'oggetto.

## ■ Il potere diottrico di una lente

Si chiama **potere diottrico** di una lente, convergente o divergente, il reciproco della distanza focale espressa in metri. In genere, il potere diottrico si indica con la lettera  $d$ :

$$d = \frac{1}{f}$$

Nel SI il potere diottrico si esprime in  $\text{m}^{-1}$  (si legge «metro alla meno 1»); nella pratica si misura in **diottrie**.

**ESEMPIO 4** Una lente ha una distanza focale di 20 cm. Poiché  $20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$ , se la lente è convergente, il potere diottrico è:

$$d = \frac{1}{0,2 \text{ m}} = 5 \text{ m}^{-1} = 5 \text{ diottrie}$$

mentre se la lente è divergente, il suo potere diottrico è -5 diottrie.

È conveniente usare il potere diottrico quando ci sono due lenti affiancate [→ figura 6]. In questo caso la lunghezza focale complessiva delle due lenti è

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Utilizzando il potere diottrico si ha una formula più semplice:

$$d = d_1 + d_2$$





## 14.6 Le lenti

## APPLICA DEFINIZIONI E LEGGI

## ■ Lenti convergenti

- Una candela si trova tra il centro e il fuoco di una lente convergente.
  - Quali raggi tracci per costruire l'immagine della candela?
  - Costruisci l'immagine.
  - L'immagine è diritta?
- La candela dell'esercizio precedente si trova ora oltre il fuoco della lente.
  - Costruisci l'immagine.
  - Quali sono le caratteristiche dell'immagine?
  - Dove devi posizionare la candela per ottenere un'immagine con le stesse dimensioni?
- Un righello è posto in verticale tra il fuoco e il centro ottico di una lente convergente.
  - Ricava graficamente la posizione dell'immagine.
  - Descrivi le caratteristiche dell'immagine.
  - Puoi raccogliere l'immagine su di uno schermo?
- Considera una lente convergente e la lettera  $R$ .
  - Disegna la lettera  $R$  a una distanza dal centro ottico maggiore della distanza focale.
  - Costruisci per punti l'immagine.

## ■ Ricerca analitica dell'immagine di un oggetto

- La formula delle lenti sottili permette di ricavare una delle tre grandezze note le altre due.
  - Note le distanze  $q$  ed  $f$ , con quale formula si calcola la distanza  $p$ ?
- Un bicchiere è posto a 20 cm da una lente sottile di distanza focale 0,25 m.
  - A quale distanza dal centro della lente si forma l'immagine?
  - Da quale parte della lente si trova?
  - Verifica i risultati costruendo l'immagine.
- Una candela viene posta a 30 cm da una lente di distanza focale 15 cm.
  - Dove si forma l'immagine?
  - Quali sono le caratteristiche dell'immagine?

## ■ Lenti divergenti

- Un tuo amico vuol bruciare un foglio con i raggi del sole. Sceglie allo scopo una lente divergente.
  - Perché non approvi la sua scelta?
- Una freccia, appoggiata all'asse ottico di una lente divergente, si trova ad una distanza dal centro ottico pari al doppio della distanza focale.
  - Costruisci l'immagine della freccia.

- Posiziona ora la freccia tra il fuoco e il centro ottico, poi costruisci di nuovo l'immagine.
- Infine costruisci l'immagine quando la freccia si trova nel fuoco della lente.

## 10 Vero o falso?

- Una lente divergente ha la distanza focale negativa.  V  F
- L'immagine prodotta da una lente divergente è sempre reale.  V  F
- L'immagine prodotta da una lente divergente è sempre ingrandita.  V  F
- L'immagine di un oggetto che si trova tra il fuoco e il centro di una lente divergente è capovolta e rimpicciolata.  V  F

## ■ L'ingrandimento

- Un orofice utilizza, per il suo lavoro, una lente convergente di distanza focale 10 cm. L'immagine virtuale dell'oggetto che guarda si forma a 25 cm dalla lente.
  - Calcola la posizione dell'oggetto.
  - Qual è l'ingrandimento della lente?
- Una matita è posta a 1,0 m da una lente divergente e l'immagine si forma a 25 cm dal centro della lente.
  - Calcola la distanza focale.
  - Dove va posizionata la matita per avere un'immagine rimpicciolata di 2/3?
- Una lente divergente, di distanza focale -25 cm, produce di un oggetto un'immagine virtuale a 20 cm dal centro ottico.
  - Dove è posto l'oggetto?
  - Qual è l'ingrandimento prodotto dalla lente?

## ■ Il potere diottrico di una lente

- Un miope corregge la vista con delle lenti da -7 diottrie.
  - Qual è la distanza focale delle lenti?
- Completa la tabella seguente.

lente	lunghezza focale	diottrie
convergente	20 cm	.....
divergente	-10 cm	.....
.....	.....	-4
.....	.....	+2

- Una lente convergente ( $f_1 = +8$  cm) è affiancata a una lente divergente ( $f_2 = -10$  cm).
  - Verifica che il potere diottrico del sistema è 2,5 diottrie.



Altri problemi sulle lenti a fine unità, p. F 29





## VISIONE D'INSIEME

## Per collegare le idee

## ► In quali mezzi si propaga la luce?

- Le onde sonore hanno bisogno di un mezzo per propagarsi; la luce viaggia nel vuoto e nei mezzi trasparenti.
- Nei mezzi trasparenti omogenei e isotropi, la luce si propaga in linea retta; in genere cambia direzione quando passa da un mezzo trasparente a un altro o incontra degli ostacoli.

## ► Con quale velocità si propaga la luce?

- Nel vuoto la velocità della luce è 300 000 km/s. La velocità di propagazione in un mezzo trasparente è sempre minore di 300 000 km/s; per esempio la velocità in acqua è circa 225 000 km/s.

## ► Che cos'è l'indice di rifrazione di un mezzo?

- È il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto  $c$  e la velocità della luce nel mezzo  $v$ :

$$n = \frac{c}{v}$$

## ► Come riflettono la luce gli specchi piani?

- La luce che arriva su uno specchio piano viene riflessa: l'angolo di incidenza è uguale a quello di riflessione. Gli specchi piani forniscono immagini virtuali: l'immagine di un oggetto sta sui prolungamenti dei raggi riflessi e non si può raccogliere su uno schermo.

## ► Come sono le immagini di uno specchio curvo?

- Gli specchi curvi possono fornire sia immagini reali sia virtuali. In ogni caso, vale la legge dei punti coniugati che lega la distanza focale  $f$  alla distanza dell'oggetto  $p$  e dell'immagine  $q$  dal vertice dello specchio:

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

## ► Come si calcola l'ingrandimento di uno specchio curvo?

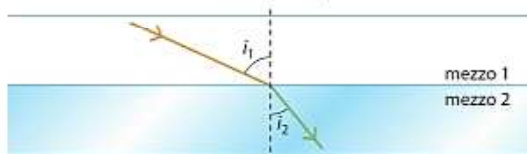
- L'ingrandimento  $G$  si calcola con la formula:

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

## ► In quale caso si verifica la rifrazione?

- La rifrazione si ha quando la luce passa da un mezzo trasparente (indice di rifrazione  $n_1$ ) a un altro mezzo di indice di rifrazione diverso ( $n_2$ ). Vale la legge:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



## ► Che cos'è l'angolo limite?

- Nel passaggio da un mezzo più denso a uno meno denso, l'angolo limite è quell'angolo di incidenza a cui corrisponde un angolo di rifrazione di  $90^\circ$ .
- Se l'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite, la luce viene riflessa totalmente.

## ► Che cosa succede quando la luce incide su una lente?

- Nelle lenti convergenti i raggi paralleli all'asse ottico attraversano la lente e convergono in uno dei fuochi, in quelle divergenti gli stessi raggi attraversano la lente e divergono in modo tale che i loro prolungamenti convergono in uno dei fuochi.

## ► Come sono le immagini formate dalle lenti?

- Quando un oggetto, luminoso o illuminato, è posto davanti a una lente, la sua immagine è reale o virtuale, più piccola o più grande dell'oggetto, diritta o capovolta.
- Per una lente sottile, vale la legge

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

e l'ingrandimento  $G$  si calcola con la formula

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

## ► Che cos'è la luce?

- La luce è un'onda, caratterizzata da una lunghezza d'onda  $\lambda$ , una frequenza  $f$  e una velocità  $v$ , tale che:

$$v = \lambda \cdot f$$

## ► Che cos'è la diffrazione?

- La diffrazione è un fenomeno che si verifica quando la luce attraversa una fenditura o incontra un ostacolo di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda.
- Nella diffrazione da una fenditura il fascio di luce si apre a ventaglio e si propaga anche oltre la fenditura.

## ► Che cos'è l'interferenza?

- Quando due onde luminose si sovrappongono in un punto, si ha il fenomeno dell'interferenza, che può essere costruttiva (luce) o distruttiva (buio).
- Dalla figura di interferenza attraverso due fenditure si ricava la lunghezza d'onda della luce incidente dalla relazione:

$$\lambda = \frac{y d}{l}$$

dove  $l$  è la distanza tra le fenditure e lo schermo,  $d$  la distanza tra le fenditure e  $y$  la distanza della prima zona luminosa da quella centrale.





## Test e quesiti

## ■ Test

- 1 L'indice di rifrazione di un mezzo trasparente è:
- A un numero qualunque, purché positivo;
- B un numero compreso tra 0 e 1;
- C un numero maggiore o uguale a 1;
- D un numero qualunque.
- 2 L'immagine di un oggetto formata da uno specchio piano:
- A è rimpicciolita;
- B è capovolta;
- C è virtuale;
- D cade davanti allo specchio.
- 3 Nella riflessione della luce si possono individuare due piani: quello di incidenza (formato dal raggio incidente e dalla normale nel punto di incidenza) e quello di riflessione (formato dal raggio riflesso e dalla normale nel punto di incidenza).
- A I due piani coincidono.
- B I due piani sono paralleli.
- C I due piani sono perpendicolari.
- D I due piani sono diversi.
- 4 In quale caso uno specchio concavo fornisce un'immagine virtuale?
- A Mai.
- B Se l'oggetto è fra il centro di curvatura e il fuoco.
- C Se l'oggetto è fra il fuoco e il vertice.
- D Se l'oggetto è sull'asse ottico.
- 5 Le seguenti uguaglianze rappresentano formulazioni diverse della seconda legge della rifrazione:
- $$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \text{costante}; \quad \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}; \quad n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2.$$
- Quale delle seguenti affermazioni è corretta?
- A La prima formula è sbagliata.
- B La seconda è sbagliata.
- C La terza è sbagliata.
- D Nessuna è sbagliata.
- 6 Un diamante è immerso prima in aria, e successivamente in acqua.
- A L'angolo limite del diamante rimane sempre lo stesso.
- B L'angolo limite del diamante è minore quando è immerso in acqua.
- C L'angolo limite del diamante cambia secondo il mezzo in cui è immerso.
- D È possibile calcolare l'angolo limite del diamante solo quando è in aria.

- 7 Nella formula delle lenti sottili, per una lente convergente si ha:
- A  $p, q$  e  $f$  positive;
- B  $p$  positiva,  $f$  negativa,  $q$  diversa da zero;
- C  $p$  ed  $f$  positive,  $q$  diversa da zero;
- D  $p$  qualsiasi;  $q$  qualsiasi;  $f$  qualsiasi.
- 8 Una lente divergente può fornire un'immagine capovolta?
- A se l'oggetto si trova in un fuoco.
- B se l'oggetto si trova tra il fuoco e il centro ottico della lente.
- C se l'oggetto ha la stessa distanza dell'immagine.
- D mai.
- 9 Un raggio di luce incide su una lente divergente senza cambiare direzione. Come era diretto il raggio?
- A Era parallelo all'asse ottico della lente.
- B Passava per uno dei fuochi della lente.
- C Passava per il centro della lente.
- D Non è una situazione fisica possibile.
- 10 Le grandezze che caratterizzano un raggio di luce monocromatico possono variare secondo il mezzo in cui esso si propaga. Certamente rimane costante:
- A la sua lunghezza d'onda;
- B la sua frequenza;
- C la sua velocità di propagazione;
- D nessuna delle precedenti grandezze.

## ■ Quesiti

- 11 Che cosa succede quando la luce incide perpendicolarmente su una lastra di vetro?
- 12 Qual è la differenza tra la riflessione e la rifrazione?
- 13 Qual è la differenza tra immagine virtuale e immagine reale?
- 14 Perché quando la luce passa dall'acqua al vetro non ci può essere una riflessione totale?
- 15 A che cosa può servire un prisma di vetro?
- 16 Cosa succede quando due onde interferiscono distruttivamente?



ZTE TEST INTERATTIVI, 30 minuti (20 test)  
TEST E QUESITI, 1 pagina





## SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

PROBLEM SOLVING 3 ► COMPETENZE

### 14.1 La propagazione della luce

#### 1 PROBLEMA SVOLTO

##### ■ Distanza Terra-Luna

Durante la missione Apollo 11 del 1969, gli astronauti americani hanno deposto sulla Luna uno specchio. Una luce laser inviata sullo specchio viene riflessa e torna indietro dopo 2,51 s.

► Calcoliamo la distanza fra la superficie della Luna e quella della Terra.

#### Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Tempo impiegato dalla luce: $t = 2,51 \text{ s}$	Distanza Terra-Luna: $d = ?$

• La luce si muove, nel vuoto, con velocità di 300 000 km/s. In 2,51 secondi, la luce percorre due volte la distanza Terra-Luna che abbiamo indicato con  $d$ , perciò possiamo scrivere:

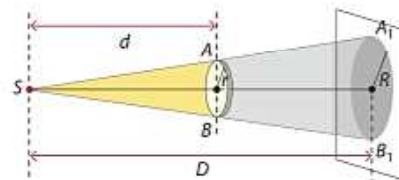
$$2d = (300\,000 \text{ km/s}) \times (2,51 \text{ s}) = 7,53 \times 10^5 \text{ km}$$

$$d = \frac{7,53 \times 10^5 \text{ km}}{2} = 3,77 \times 10^5 \text{ km}$$

2 La sorgente puntiforme della figura dà un'ombra netta della moneta. Vale la seguente proporzione:  $R : r = D : d$ .

► Se l'area della superficie della moneta è  $10 \text{ cm}^2$ , quanto vale l'area della superficie dell'ombra?

► Che cosa succede se la distanza della moneta dalla sorgente  $S$  diventa  $d/2$ ? [40 cm<sup>2</sup>]



### 14.2 La riflessione della luce

#### 3 PROBLEMA SVOLTO

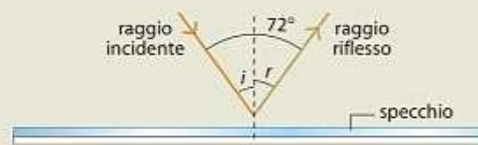
##### ■ Specchio piano

Un raggio incide su uno specchio piano e il raggio riflesso viene deviato di  $72^\circ$ .

► Qual è l'angolo di incidenza?

#### Analisi e soluzione

Disegniamo il raggio incidente e il raggio riflesso, in modo che la loro somma sia  $72^\circ$  (figura). Poiché i due angoli sono uguali, l'angolo di incidenza sarà  $72^\circ : 2 = 36^\circ$ .



#### Osservazione

Con quale angolo deve incidere il raggio per essere deviato di  $90^\circ$ ?

4 Ti trovi di fronte a uno specchio piano.

► Se fai due passi verso lo specchio, di quanti passi ti avvicini alla tua immagine?

► Se ti trovi a 1,5 m dallo specchio, qual è la distanza fra te e la tua immagine? [4; 3 m]

5 Due specchi formano un angolo di  $130^\circ$ . Una luce colpisce lo specchio 1 con un angolo di  $57^\circ$ .

► Disegna il raggio riflesso dallo specchio 2.

► Trova l'angolo di riflessione del raggio uscente dal secondo specchio. [73°]

6 Una sorgente puntiforme è davanti a uno specchio piano. Un raggio che parte da S incide sullo specchio con un angolo di  $0^\circ$  e un altro incide con un angolo acuto.

► Disegna i prolungamenti dei due raggi riflessi e trova la posizione dell'immagine S'.

► Con considerazioni geometriche, dimostra che S' e S hanno uguale distanza dallo specchio.

7 Una luce incide su uno specchio piano con un angolo di  $40^\circ$ .

► Disegna il raggio riflesso.

► Disegna lo specchio ruotato di un angolo  $\alpha$ .

► Dimostra che il raggio riflesso è ruotato di  $2\alpha$ .





## SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

- 8** Un triangolo rettangolo di cateti  $AB = 5 \text{ cm}$  e  $AC = 5 \text{ cm}$  è posto davanti a uno specchio piano. Il vertice  $A$  dista 10 cm dallo specchio,  $B$  dista 5 cm,  $C$  dista 10 cm.
- ▶ Costruisci l'immagine  $A'B'C'$  del triangolo.
  - ▶ Qual è la lunghezza dei cateti  $A'B'$  e  $A'C'$ ?
  - ▶ Qual è la distanza di  $A$  da  $A'$ ? [5 cm; 5 cm; 20 cm]
- 9** Due specchi lunghi 1,0 m sono posti uno di fronte all'altro alla distanza di 10 cm. Una luce incide con un angolo di  $30^\circ$  all'estremità di uno dei due specchi.

▶ Quante volte viene riflesso il raggio prima di uscire dall'altro estremo? [18]

- 10** Una luce, a 6,0 m da uno specchio piano, sullo specchio con un angolo di  $60^\circ$  e si riflette su uno schermo parallelo allo specchio e alle spalle della sorgente. L'intero cammino del raggio è 50 m.
- ▶ Rappresenta la situazione con un disegno.
  - ▶ Calcola la distanza tra specchio e schermo. [19 m]

## 14.3 La riflessione sugli specchi curvi

## 11 PROBLEMA SVOLTO

## Specchio curvo

Uno spillo di 2,0 cm è a 30 cm dal vertice di uno specchio concavo con raggio di 20 cm.

▶ Determiniamo la posizione dell'immagine algebricamente.

## Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Distanza oggetto: $p = 30 \text{ cm}$ Raggio di curvatura: $r = 20 \text{ cm}$	Distanza immagine: $q = ?$

- La distanza focale è la metà del raggio di curvatura:  
 $f = (20 \text{ cm}) : 2 = 10 \text{ cm}$
- Ricaviamo la distanza dell'immagine  $q$  dalla formula dei punti coniugati:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \rightarrow \frac{1}{q} = \frac{p-f}{f \cdot p}$$

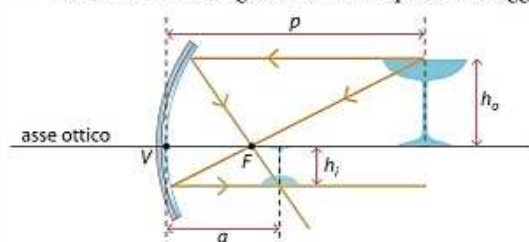
- Sostituiamo i valori numerici:

$$\frac{1}{q} = \frac{(30 \text{ cm} - 10 \text{ cm})}{(10 \text{ cm}) \times (30 \text{ cm})} \rightarrow q = \frac{300 \text{ cm}^2}{20 \text{ cm}} = 15 \text{ cm}$$

## Osservazione

Poiché  $q$  è positivo, l'immagine è reale. Si può verificare il risultato per via grafica.

- 12** Osserva la figura seguente. La differenza  $p - q$  vale 15,0 cm, l'altezza dell'immagine è 0,4 volte quella dell'oggetto.



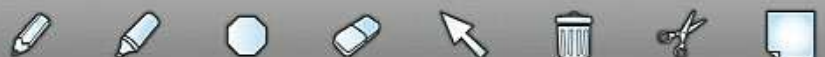
- ▶ Calcola la lunghezza focale della lente.
- ▶ Quanto è alto il bicchiere se l'immagine è alta 5,00 cm? [7,14 cm; 12,5 cm]

- 13** Una biro è a 10 cm dal vertice di uno specchio convesso. L'altezza dell'immagine è un quarto di quella dell'oggetto.

- ▶ Qual è l'ingrandimento dello specchio?
- ▶ A che distanza si forma l'immagine?
- ▶ Qual è il raggio di curvatura dello specchio? [0,25; -2,5 cm; 6,6 cm]

- 14** Un chiodo è posto sull'asse ottico di uno specchio concavo. La distanza chiodo vertice è doppia della distanza focale dello specchio.
- ▶ Determina la posizione dell'immagine
  - ▶ Quanto vale l'ingrandimento? [1]

- 15** Uno specchio convesso produce l'immagine di un oggetto a 25,0 cm da esso. L'immagine è 1/5 dell'oggetto.
- ▶ L'immagine è reale o virtuale?
  - ▶ Determina distanza dell'immagine e distanza focale. [-5,00 cm; -6,25 cm]





## SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

## 14.4 La rifrazione della luce

16 PROBLEMA SVOLTO  
Rifrazione sul vetro

Un raggio di luce, che viaggia in aria, incide su un blocco di vetro ( $n = 1,52$ ) con un angolo di  $30^\circ$ .

► Calcoliamo l'angolo di rifrazione.



## Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Indice di rifrazione del vetro: $n_2 = 1,52$ Angolo di incidenza: $i_1 = 30^\circ$	Angolo di rifrazione: $i_2 = ?$

- Il raggio passa dall'aria al vetro, perciò il raggio rifratto si avvicina alla normale nel punto di incidenza. Applichiamo la seconda legge della rifrazione nella forma:  $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$ .

$$\sin i_2 = \frac{n_1 \cdot \sin i_1}{n_2} = \frac{1 \times 0,5}{1,52} = 0,329$$

- Poiché  $\sin i_2 = 0,329$ , l'angolo di rifrazione è  $i_2 = 19^\circ$ .

## Osservazione

Il raggio incidente risulta deviato di un angolo  $\alpha = 30^\circ - 19^\circ = 11^\circ$ .

17 Un raggio luminoso incide su una lastra di vetro ( $n = 1,5$ ), a facce piane e parallele, con un angolo di  $40^\circ$ . Viene in parte riflesso e in parte rifratto.

- Qual è l'angolo di riflessione?
- Qual è l'angolo di rifrazione?
- Con quale angolo il raggio rifratto incide sulla superficie vetro-aria?

[ $40^\circ$ ;  $25^\circ$ ;  $25^\circ$ ]

18 Un raggio di luce penetra in un diamante e colpisce una sua faccia con un angolo di incidenza di  $30^\circ$ .

- Cosa succede al raggio?
- Che velocità ha la luce nel diamante?

[ $1,24 \times 10^8$  m/s]

19 Un raggio di luce monocromatica entra in un cubetto di ghiaccio con un angolo di incidenza di  $50,0^\circ$ .

- Sapendo che l'angolo di rifrazione è  $35,8^\circ$ , calcola l'indice di rifrazione del ghiaccio.
- Se il cubetto di ghiaccio si scioglie e l'angolo di incidenza rimane costante, qual è il valore dell'angolo di rifrazione?

[1,31;  $35,2^\circ$ ]

20 Una luce penetra in una soluzione biologica con un certo angolo e viene rifratto con un angolo di  $45,0^\circ$ .

- Sapendo che l'indice di rifrazione della soluzione è 1,25, determina l'angolo di incidenza.
- Qual è la velocità di propagazione della luce nella soluzione?

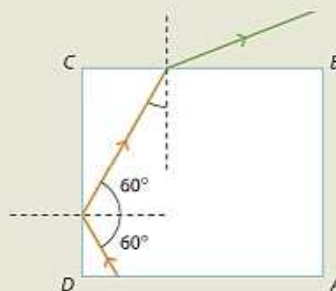
[ $62,1^\circ$ ;  $2,40 \times 10^8$  m/s]

## 14.5 La riflessione totale

21 PROBLEMA SVOLTO  
Riflessione totale

Un raggio di luce sta viaggiando dentro un blocco di materiale trasparente ( $n_1 = 1,54$ ) a forma di parallelepipedo. Il raggio incide con un angolo di  $60^\circ$  sulla superficie di separazione blocco-aria (indicata nella figura con DC).

► Disegniamo il percorso del raggio.





## SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

## Analisi e soluzione

- Calcoliamo l'angolo limite

$$\sin i_L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1,54} = 0,65$$

da cui si ottiene

$$i_L = 40,5^\circ$$

- Poiché l'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite, il raggio viene riflesso totalmente e rimane dentro al blocco. Il raggio riflesso incide sulla superficie di separazione blocco-aria (BC) con un angolo di  $30^\circ$  ed esce dal blocco allontanandosi dalla normale.

## Che succede se...

L'angolo di incidenza iniziale è minore di  $40^\circ$ ?

**22** Una luce che viaggia dentro una vaschetta contenente alcool etilico (indice di rifrazione = 1,35) incide sulla superficie di separazione alcool-aria con un angolo di  $50^\circ$ .

- Calcola il valore dell'angolo limite.
- Disegna il percorso del raggio. [47,8°]

**23** Un prisma di vetro ha per sezione un triangolo rettangolo isoscele. Un raggio incide su uno dei cateti.

- Costruisci il percorso del raggio.

**24** La velocità di propagazione di un raggio di luce in una soluzione è  $1,95 \times 10^8$  m/s.

- Qual è l'indice di rifrazione della soluzione?
- Calcola il valore dell'angolo limite rispetto all'aria. [1,54; 40,5°]

**25** Un raggio luminoso si propaga, con velocità di  $2,16 \times 10^8$  m/s, in un liquido a contatto con l'aria.

- Con quale angolo rispetto all'orizzontale deve incidere il raggio sulla superficie liquido-aria per avere riflessione totale? [43,9°]

## 14.6 Le lenti

**26** PROBLEMA SVOLTO  
Lente convergente

Quando un oggetto è posto a 10 cm dal centro ottico di una lente convergente, la sua immagine è virtuale e ingrandita due volte.

- Calcoliamo la distanza focale della lente.

## Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Distanza oggetto-lente: $p = 10$ cm Ingrandimento della lente: $G = 2$	Distanza focale: $f = ?$

- L'ingrandimento si calcola con  $G = q/p$ . L'ingrandimento della lente è 2, pertanto:

$$2 = \frac{q}{p} \rightarrow q = 2p = 2 \times (10 \text{ cm}) = 20 \text{ cm}$$

- Applichiamo la legge delle lenti sottili  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$  e ricaviamo la distanza focale:

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

- Poiché l'immagine è virtuale, il valore di  $q$  è negativo. Sostituendo i valori si ha:

$$f = \frac{(-20 \text{ cm}) \times (10 \text{ cm})}{(-20 \text{ cm} + 10 \text{ cm})} = +20 \text{ cm}$$

## Osservazione

La distanza focale è positiva, d'accordo con il fatto che la lente è convergente.





## SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

- 27** Un cucchiaio si trova a 25 cm dal centro ottico di una lente convergente con distanza focale  $f = 8,0$  cm.
- Trova la posizione dell'immagine.
  - Calcola l'ingrandimento dell'oggetto.
  - Costruisci l'immagine graficamente. [12 cm; 0,47]
- 28** In una lente convergente, la distanza oggetto-immagine è 100 cm, la distanza lente-immagine misura 20 cm.
- Qual è la distanza focale della lente? [16 cm]
- 29** Con una lente convergente si ottiene un'immagine reale di un martello, posto sull'asse ottico e distante 30 cm dal centro ottico. L'immagine è doppia dell'oggetto.
- A quale distanza si trova l'immagine?
  - Qual è la distanza focale della lente? [60 cm; 20 cm]
- 30** Un miope non mette a fuoco a più di 1 metro.
- Ha bisogno di lenti convergenti o divergenti?
  - Quale deve essere il potere diottrico delle lenti?
  - Qual è la distanza focale delle lenti? [-1 m<sup>-1</sup>; -1 m]
- 31** Una lattina, alta 12 cm, è posta a 0,20 m da una lente. La sua immagine, virtuale, è alta 30 cm.
- Determina la posizione dell'immagine e la distanza focale.
  - La lente è convergente o divergente? [-50 cm; 33 cm]
- 32** Un oggetto è posto a distanza  $p$  da una lente convergente di focale  $f$ .
- A quale distanza dalla lente si deve posizionare l'oggetto se vogliamo che l'immagine sia il doppio dell'oggetto? [3/2 f]

**33** PROBLEMA SVOLTO

## Lente divergente

Un oggetto è posto sull'asse ottico di una lente divergente a 4,0 cm dal suo centro ottico. La distanza focale della lente è -6,0 cm.

- Dove si forma l'immagine e quanto vale l'ingrandimento?

## Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Distanza oggetto-lente: $p = 4,0$ cm	Distanza immagine: $q = ?$
Distanza focale: $f = -6,0$ cm	Ingrandimento: $G = ?$

- Dalla formula delle lenti sottili si ha  $\frac{1}{4,0} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{6,0}$ :

$$\frac{1}{q} = -\frac{1}{4,0} - \frac{1}{6,0} = \frac{-3,0 - 2,0}{12} \rightarrow q = \frac{12}{-5,0} = -2,4 \text{ cm}$$

- Calcoliamo l'ingrandimento con la formula  $G = \frac{q}{p}$ :

$$G = \frac{-2,4 \text{ cm}}{4,0 \text{ cm}} = -0,6$$

## Osservazione

L'immagine è più piccola dell'oggetto.

- 34** La lente del problema precedente viene accoppiata a una lente convergente di distanza focale 10 cm.
- Qual è la distanza focale del sistema delle due lenti?
  - Che potere diottrico ha il sistema? [-15 cm; -6,7 m<sup>-1</sup>]
- 35** Una lente divergente ha distanza focale -8,0 cm.
- Posiziona una biro a 10 cm dal centro ottico e disegna la sua immagine.
  - Trova la posizione dell'immagine.
  - L'immagine è più grande dell'oggetto? [-4,4 cm]
- 36** Un oggetto è sull'asse ottico di una lente con  $f = -36,0$  cm. L'immagine è 3 volte più piccola dell'oggetto.
- Per avere un'immagine 4 volte più piccola dell'oggetto, dobbiamo allontanare o avvicinare l'oggetto?
  - Calcola la distanza a cui si trova l'oggetto prima e dopo essere stato spostato. [72 cm, 108 cm]
- 37** Una matita viene posizionata a 1,0 m da una lente divergente e la sua immagine si forma a 25 cm dal vertice.
- Spiega perché l'immagine è virtuale.
  - Calcola l'ingrandimento della lente.
  - Calcola la distanza focale. [-0,25; -33 cm]





## SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

- 38** Due lenti sottili affiancate hanno distanza focale  $f_1 = 8 \text{ cm}$  e  $f_2 = -12 \text{ cm}$ .
- Il sistema delle due lenti è convergente o divergente?
  - Se poniamo un oggetto a 10 cm dalla prima lente, dove si forma l'immagine?
  - Se poniamo lo stesso oggetto a 10 cm dalla seconda lente, l'immagine cambia? [-17 cm]

- 39** Una lente ha un potere diottrico uguale a -5 diottrie.
- Calcola la sua distanza focale.
  - Si vuole usare questa lente accoppiata con un'altra perché il sistema abbia un potere di 7 diottrie. Qual è la distanza focale della seconda lente? [-20 cm; 8,3 cm]

## 14.7 Cenni di ottica ondulatoria

**40 PROBLEMA SVOLTO**  
**Sorgente di luce in acqua**

Una sorgente di luce immersa in acqua emette luce rossa di lunghezza d'onda 6000 Å.

- Calcoliamo la frequenza della luce e la velocità di propagazione.

## Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Lunghezza d'onda luce rossa: $\lambda = 6000 \text{ Å}$	Frequenza: $f = ?$ Velocità: $v = ?$

- 1 Å corrisponde a  $10^{-10} \text{ m}$ , perciò la lunghezza d'onda è:  

$$\lambda = 6000 \times 10^{-10} \text{ m} = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m}$$
- Poiché l'indice di rifrazione dell'acqua è 1,33, la velocità nell'acqua è:  

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,33} = 2,26 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$
- Calcoliamo la frequenza dalla relazione  $v = \lambda \cdot f$ :  

$$f = \frac{2,26 \times 10^8 \text{ m/s}}{6,0 \times 10^{-7} \text{ m}} = 3,76 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

- 41** Una luce di lunghezza d'onda 5000 Å si propaga in un vetro il cui indice di rifrazione è 1,6.
- Calcola la velocità e la frequenza. [ $1,9 \times 10^8 \text{ km/s}$ ;  $3,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ]

- 42** L'indice di rifrazione del ghiaccio è 1,31.
- Quanto tempo impiega un raggio di luce per attraversare un iceberg di larghezza 3,0 km? [ $1,3 \times 10^{-5} \text{ s}$ ]

- 43** Attraverso due sottili fenditure, che distano tra loro  $d = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m}$ , viene fatta passare della luce monocromatica. La distanza, tra il piano delle fenditure e lo schermo, è di 0,6 m. La prima frangia luminosa dista  $y = 22 \text{ mm}$  da quella centrale.
- Quanto vale la lunghezza d'onda della luce utilizzata? [ $4,4 \times 10^{-7} \text{ m}$ ]

- 44** Un'onda attraversa due fenditure distanti 0,3 mm e forma una figura di interferenza su uno schermo che dista 1,5 m dal piano delle due fenditure. La distanza della prima frangia luminosa dal massimo centrale è 2,5 mm.
- Calcola la lunghezza d'onda in metri e in Å.
  - Cosa succede se si avvicinano le due fenditure? [ $5,0 \times 10^{-7} \text{ m}$ ; 5000 Å]



PROBLEMI RIASSUNTIVI, 1 pagina





## SOLUZIONI DEGLI ESERCIZI

## UNITÀ 14

## ■ 14.2 La riflessione della luce [p. F 8]

- 3 a) F; b) V; c) F; d) V  
4  $50^\circ$ ;  $80^\circ$   
7 6,0 m  
13 3,0 cm, 6,0 cm

## ■ 14.3 La riflessione sugli specchi curvi [p. F 9]

- 2 a) V; b) V; c) V; d) F

- 8 -75 cm  
9 -18,75 cm  
11 20; 20; 17; -7,5  
12 0,33; -4,0 cm; 12 cm  
13 11 cm  
14 -8,3 cm; 33 cm

## ■ 14.4 La rifrazione della luce [p. F 14]

- 1 0,6; 0,8;  $37^\circ$ ;  $53^\circ$   
2 a) V; b) F; c) F; d) V  
4  $19^\circ$ ;  $30^\circ$   
7  $17,6^\circ$ ;  $33,2^\circ$   
9 1,5; 0,89  
11 No; 0,91  
12 1,52

## ■ 14.5 La riflessione totale [p. F 15]

- 1 2,42  
2  $41,8^\circ$ ;  $62,5^\circ$   
3 1,61  
5 a) V; b) F; c) F; d) F  
7  $42^\circ$   
8 0,5; 0,75;  $48,6^\circ$ ; 0,71;  $45^\circ$   
10  $180^\circ$

## ■ 14.6 Le lenti [p. F 19]

- 6 -1,0 m  
7 30 cm  
10 a) V; b) F; c) F; d) F  
11 17 cm; 1,5  
12 -33 cm; a 75 cm dal centro

- 13 100 cm; -0,2  
14 -14 cm  
15 5 diottrie; -10 diottrie; -25 cm; 50 cm

