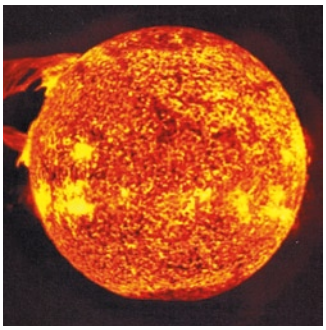
UNITÀ 14
LA LUCE

14.1 La propagazione della luce

IDEA-CHIAVE In un mezzo omogeneo, la luce si propaga in linea retta con velocità costante; il valore della velocità dipende dalle caratteristiche del mezzo.

La propagazione della luce

Figura 1
Foto del Sole, sorgente di luce primaria, realizzata con un filtro per evidenziare i dettagli della superficie.



NASA 1993

Il Sole [➜ figura 1] è una sorgente di luce *primaria*; la Luna non produce luce, ma diffonde quella che riceve dal Sole, perciò è una sorgente di luce *secondaria*. Altre sorgenti di luce primaria sono le lampadine a incandescenza, le lampade alogene, le lampade a scarica degli impianti stradali, i tubi fluorescenti delle insegne, i laser.
Tutti i corpi illuminati, invece, sono sorgenti di luce secondaria.

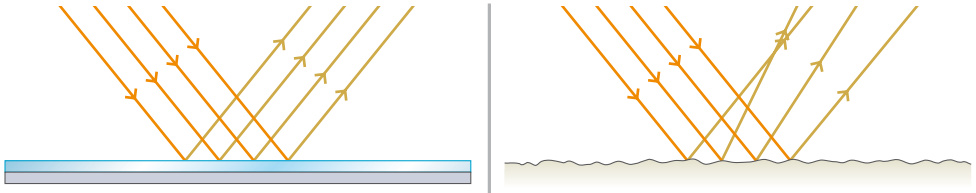
Quando la luce incontra un mezzo (solido, liquido o gassoso), può attraversarlo oppure no. Nel primo caso si dice che il mezzo è *trasparente*, nel secondo che è *opaco*. L'aria, il vetro, l'acqua sono mezzi trasparenti; il legno, il muro sono corpi opachi.

Esistono anche corpi traslucidi: sono quelli che lasciano passare la luce, ma non permettono di vedere la sorgente da cui essa proviene (vetri smerigliati, stoffe leggere ecc.).
Quando la luce incontra un corpo opaco, essa viene riflessa o diffusa:

- se la luce è deviata in una sola direzione, allora si dice che è stata *riflessa* [➜ figura 2*a*];
- se la luce è deviata in molte direzioni, allora si dice che è stata *diffusa* [➜ figura 2*b*].

La maggior parte dei corpi che ci circondano diffondono la luce che ricevono ed è per questo motivo che noi li vediamo. La carta di questo libro illuminata dalla luce diffonde la luce che riceve e ci permette di vedere quello che c'è scritto sopra.

Figura 2
Riflessione e diffusione.



a La luce che incide su uno specchio viene riflessa.

b La luce su una superficie scabra viene diffusa.

L'occhio è il *ricevitore naturale* di luce, così come l'orecchio è il ricevitore naturale del suono. L'occhio vede sia le sorgenti primarie di luce sia quelle secondarie. In entrambi i casi, la luce che ci permette la visione non parte dai nostri occhi, ma vi arriva sopra.

Noi vediamo un oggetto perché da esso arriva la luce sugli occhi.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

online.zanichelli.it/ruffo_fisica

2 FILM E 5 TEST
Raggi luminosi
La luce e le ombre,
La diffusione della luce

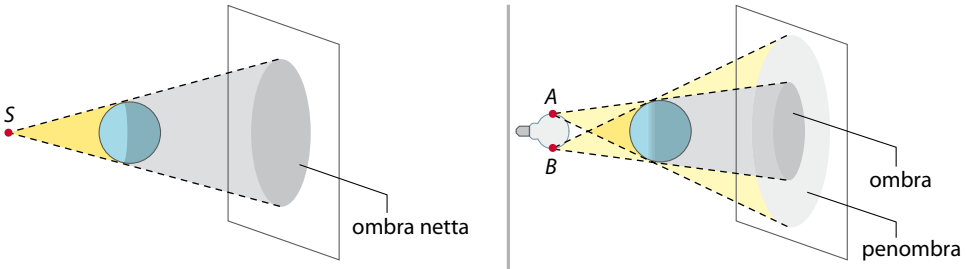
Una delle caratteristiche più importanti della luce è la *propagazione rettilinea* nei mezzi omogenei e trasparenti. Il fatto che la luce si propaghi in linea retta risulta evidente considerando le ombre generate dagli oggetti opachi illuminati.

Una pallina, illuminata da una sorgente puntiforme, proietta su uno schermo un'ombra netta [➜ figura 3*a*]. Per ottenere l'ombra tracciamo dei segmenti che rappresentano i raggi luminosi, fino allo schermo; dove c'è l'ombra non arriva nessun raggio.

Se la sorgente è estesa [➜ figura 3*b*], intorno all'ombra si forma una penombra, in cui arrivano solo alcuni raggi emessi dalla sorgente. Per costruire ombra e penombra si tracciano le tangenti alla pallina dai due punti estremi della sorgente, *A* e *B*.

Le eclissi di Sole e di Luna sono esempi tipici di ombre e penombre.

Figura 3
Ombra e penombra.



a La sorgente *S* produce un'ombra netta della pallina. **b** La lampadina produce ombra e penombra.

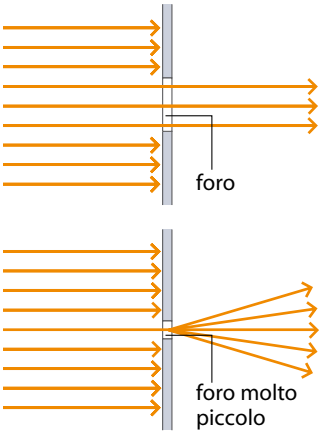
Raggi e fasci di luce

Il *raggio di luce* è un segmento di retta che indica il tragitto della luce per andare da un punto a un altro; il *fascio di luce* è un insieme di raggi emessi dalla stessa sorgente.

Si può isolare un raggio di luce? Dal punto di vista sperimentale possiamo ridurre un fascio luminoso, facendolo passare attraverso una fenditura praticata, per esempio, in un cartone [➜ figura 4]. Della luce che arriva sul cartone, solo quella che attraversa la fenditura passa oltre. Si potrebbe pensare che, diminuendo opportunamente le dimensioni della fenditura, si possa ottenere un singolo raggio molto sottile.

In realtà, non è proprio così: quando la fenditura ha dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda della luce, interviene il fenomeno della *diffrazione*, tipica delle onde: al di là della fenditura, non c'è più un fascio sottile ma un cono di luce. Pertanto, a causa della diffrazione, è impossibile isolare un raggio di luce. Noi però, per semplicità, continueremo a parlare e a rappresentare la luce mediante dei raggi.

Figura 4
Mediante un foro (sopra) si può restringere un fascio di luce; se le dimensioni del foro sono molto piccole (sotto), la luce si sparpaglia.



La velocità della luce

La velocità della luce nel vuoto si indica con la lettera c e il suo valore è circa:

$$c = 3{,}0 \times 10^8 \text{ m/s} = 300\,000 \text{ km/s}$$

Nei mezzi trasparenti, la velocità della luce è minore della velocità nel vuoto.

Il rapporto fra la velocità c della luce nel vuoto e la velocità v della luce nel mezzo si chiama indice di rifrazione del mezzo e si indica con il simbolo n.

indice di rifrazione del mezzo $n = \dfrac{c}{v}$ **velocità della luce nel vuoto** $\left(\dfrac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ **velocità della luce nel mezzo** $\left(\dfrac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

Tabella 1 Indici di rifrazione di alcuni mezzi

Aria	1,00
Acqua	1,33
Glicerina	1,47
Vetro	1,50 ÷ 1,70
Diamante	2,43

ESEMPIO 1 La velocità della luce nella glicerina è:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1{,}47} = 2{,}04 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Altri problemi
a fine unità, p. 25

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

14.2 La riflessione della luce

IDEA-CHIAVE Quando la luce si riflette l'angolo di incidenza è uguale a quello di riflessione; le immagini formate da uno specchio piano sono sempre virtuali.

online.zanichelli.it/ruffo_fisica

1 FILM E 3 TEST
Raggi luminosi
La riflessione della luce

Raggi riflessi e raggi rifratti

Poiché la luce si propaga in linea retta, per descrivere i fenomeni legati alla sua propagazione usiamo i raggi luminosi, anche se sappiamo che sono delle astrazioni.

Quando un raggio di luce incontra la superficie di separazione tra due mezzi trasparenti, per esempio aria e vetro, si verificano due fenomeni diversi [➜figura 1]: la riflessione e la rifrazione. Una parte del raggio si riflette e torna nell'aria (*raggio riflesso*), l'altra prosegue nel vetro cambiando direzione (*raggio rifratto*). Se però il vetro è annerito da una parte, diventa uno specchio e quindi una superficie riflettente: la maggior parte della luce è riflessa.

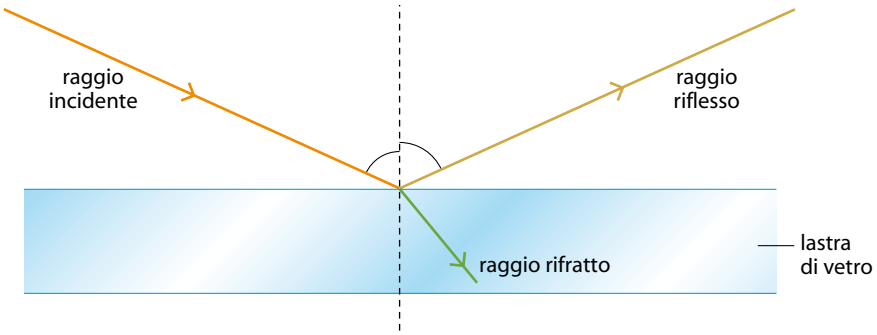


Figura 1
La luce che incide sulla lastra di vetro viene in parte riflessa e in parte rifratta.

Le leggi della riflessione

Nella ➜figura 2, un raggio di luce incide nel punto *I* di uno specchio e viene riflesso. La retta perpendicolare allo specchio nel punto *I* è la *normale* nel punto di incidenza.

L'angolo *i*, formato dal raggio incidente e dalla normale nel punto di incidenza *I*, si chiama *angolo di incidenza*: l'angolo *r*, formato dalla normale e dal raggio riflesso, si chiama *angolo di riflessione*.

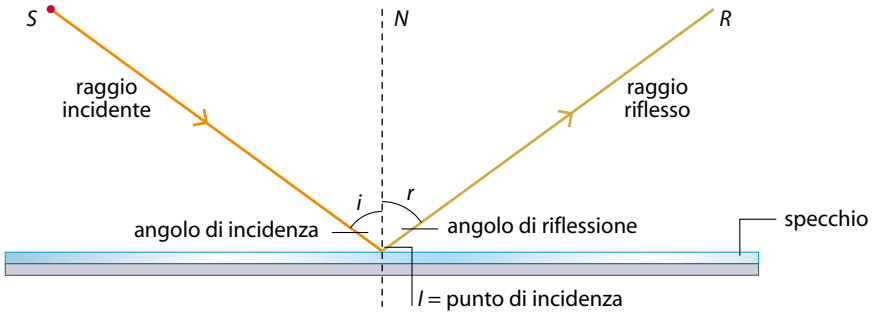


Figura 2
***S* è una sorgente di luce puntiforme. *SI* è il raggio incidente sullo specchio. *NI* è la normale al piano dello specchio nel punto di incidenza *I*. *IR* è il raggio riflesso.**

Le due leggi che regolano la riflessione della luce sono state enunciate dal francese René Descartes (1596-1650).

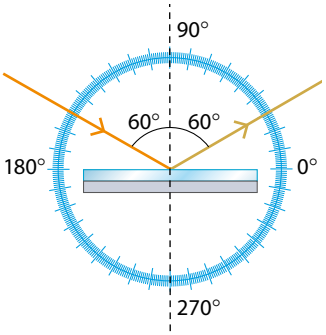
Prima legge della riflessione. Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale nel punto di incidenza sono situati nello stesso piano, detto piano di incidenza.

Seconda legge della riflessione. L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza:

$$i = r$$

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

Figura 3
Il raggio incidente sta sul piano del disco e l'angolo di incidenza è 60°. Anche il raggio riflesso giace sul piano del disco e l'angolo di riflessione è 60°.

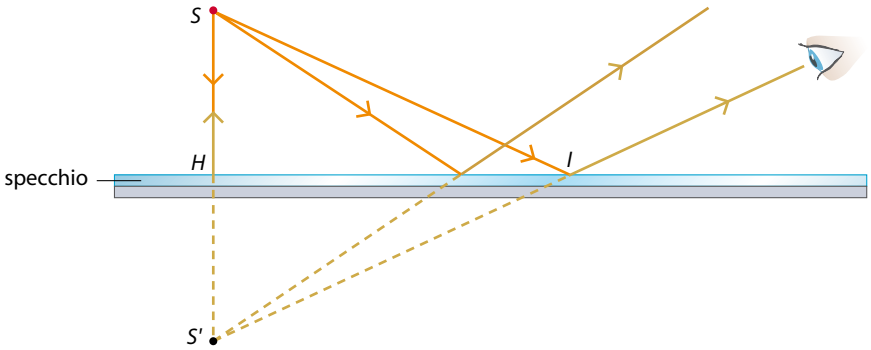


Nella ➜figura 3 è illustrato un dispositivo che permette di verificare le leggi della riflessione. La luce viene inviata su uno specchio piano posto nel centro di un disco di plastica graduato. Il raggio di luce viaggia sulla superficie del disco e il raggio riflesso giace pure sul disco (verifica della prima legge). Misurando l'angolo di incidenza si vede, entro gli errori sperimentali, che esso è uguale all'angolo di riflessione (verifica della seconda legge).

La costruzione dell'immagine

Perché l'immagine formata da uno specchio piano appare posizionata dietro lo specchio? Osserviamo la ➜figura 4. La sorgente puntiforme *S* emette raggi in tutte le direzioni. Consideriamo due di questi raggi che incidono sullo specchio piano. Il raggio *SH* incide con angolo $i = 0$ e quindi torna indietro, il raggio *SI* viene riflesso con un angolo uguale a quello di incidenza. Questo raggio, osservato dall'occhio, sembra provenire dal punto *S'* situato dietro lo specchio. Il punto *S'*, che si trova nell'intersezione dei prolungamenti di due raggi riflessi, si dice *immagine* del punto *S*.

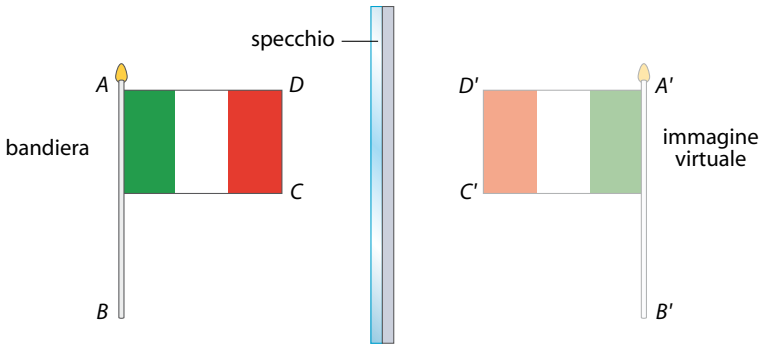
Figura 4
I raggi partono dalla sorgente *S* e vengono riflessi dallo specchio. Il prolungamento di ogni raggio riflesso passa per *S'*.



Qualunque sia il raggio che incide sullo specchio, il prolungamento del raggio riflesso passa per il punto immagine *S'*. Questa immagine non esiste nella realtà; l'occhio la vede nel punto *S'* ma in quel punto non c'è niente perché non vi arriva la luce. Per questo motivo si chiama *immagine virtuale*.

Si può dimostrare, con considerazioni geometriche, che *S'* e *S* hanno la stessa distanza dallo specchio, cioè immagine e sorgente sono *simmetriche* rispetto allo specchio. L'immagine di un oggetto esteso, invece che puntiforme, si ottiene costruendo le immagini di alcuni suoi punti [➜figura 5].

Figura 5
L'immagine di un oggetto esteso posto davanti allo specchio.



Se osserviamo l'immagine di un oggetto data da uno specchio piano notiamo che:

- l'immagine è dietro lo specchio;
- l'immagine è simmetrica dell'oggetto rispetto allo specchio, cioè alla stessa distanza;
- l'immagine ha le stesse dimensioni dell'oggetto;
- la destra è scambiata con la sinistra.

Applica definizioni e leggi a p. 7

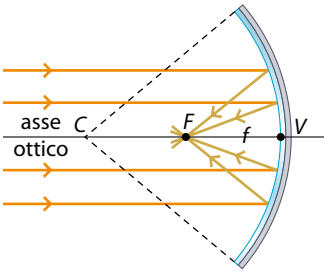
Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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.

Nomenclatura sugli specchi curvi

Figura 1
Elementi dello specchio concavo.



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.

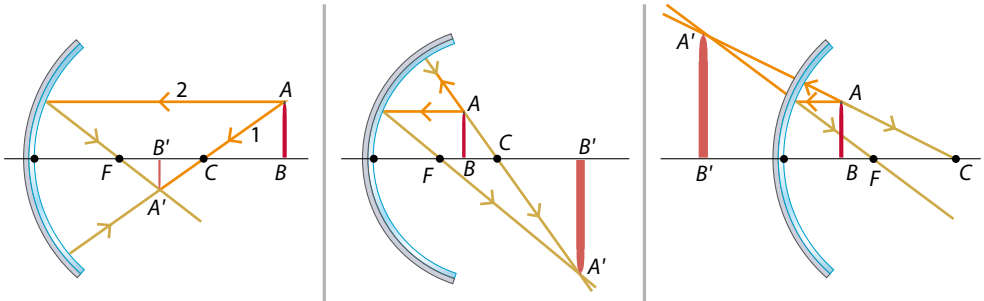
Immagine formata da uno specchio curvo

RICHIAMO
Il raggio è perpendicolare alla circonferenza.

Cerchiamo di costruire l'immagine di una penna. Il raggio 1 [➜figura 2*a*] 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.

Figura 2
Costruzione dell'immagine.



a Il raggio 1 che passa per C torna indietro, il raggio 2 viene riflesso nel fuoco; l'immagine è reale, capovolta, più piccola.

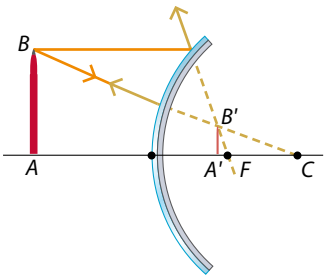
b L'oggetto è posto fra il centro e il fuoco dello specchio: l'immagine è reale, capovolta, più grande.

c L'oggetto è posto tra il fuoco e il vertice dello specchio: l'immagine è virtuale, diritta, più grande.

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 2*b*, 2*c*], 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.

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



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.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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].

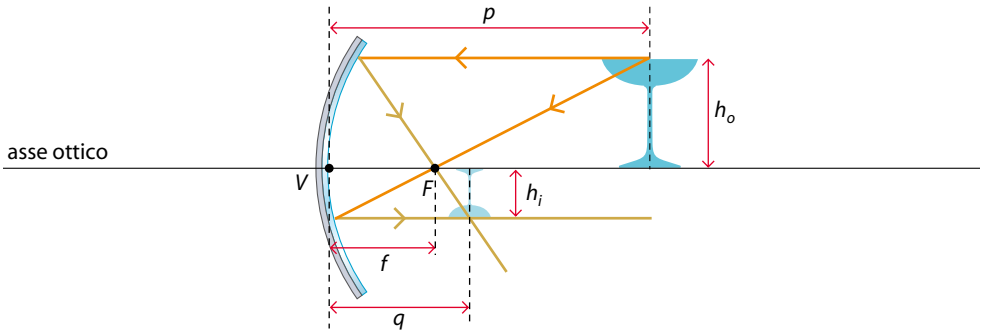


Figura 4
Le grandezze *p*, *q* e *f* sono misurate rispetto al vertice *V* dello specchio.

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.

MATEMATICA
Per risolvere l'equazione rispetto all'incognita f, troviamo il m.c.m. a destra del segno uguale: $\frac{1}{f} = \frac{p+q}{p \cdot q}$; poi uguagliamo i reciproci dei due membri e otteniamo: $f = \frac{p \cdot q}{p+q}$

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: $G = \frac{40 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 4$.

Applica definizioni e leggi a p. 8

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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.

FOUR SEASONS, BRAND X, CULVER CITY, 2001

▶ 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°. 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

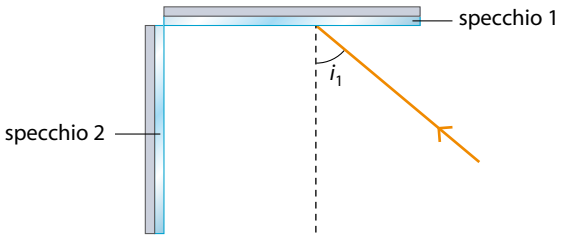
4 Un raggio incide su uno specchio piano con un angolo di 40°.

▶ 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.

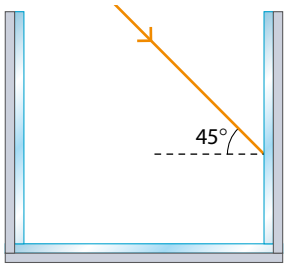
5 Due specchi piani sono perpendicolari. Un raggio di luce incide su uno dei due specchi, come in figura.



▶ 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°.



▶ 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. 25

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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?**

a) In uno specchio curvo, i raggi paralleli all'asse ottico vengono tutti riflessi nel fuoco. V F

b) La distanza focale di uno specchio curvo con una piccola apertura è metà del raggio di curvatura. V F

c) In uno specchio curvo il fuoco si trova sull'asse ottico. V F

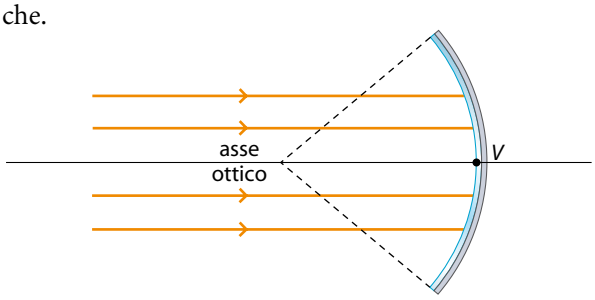
d) L'immagine prodotta da uno specchio convesso è reale e rimpicciolita. V F

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

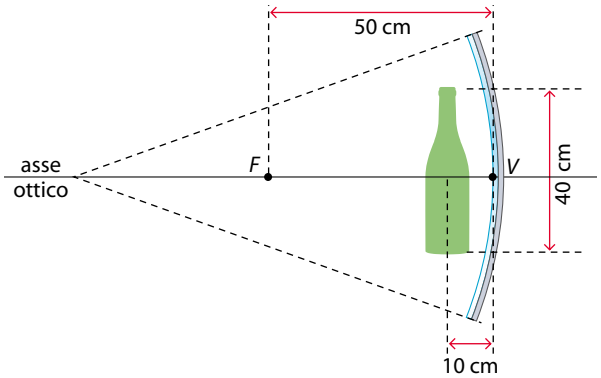
- ▶ Completa la tabella.

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. 26

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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.

Il seno di un angolo

Nel triangolo rettangolo della ➜figura 1, il cateto *BC* è opposto all'angolo acuto α.

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

Indicando il seno dell'angolo α con la scrittura sen α (si legge «seno di α»), possiamo scrivere:

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

Se nello stesso triangolo consideriamo l'angolo β, possiamo scrivere anche l'uguaglianza:

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

perché *AB* è il cateto opposto all'angolo β.

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.

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

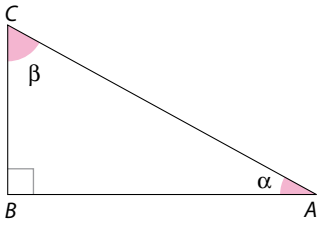


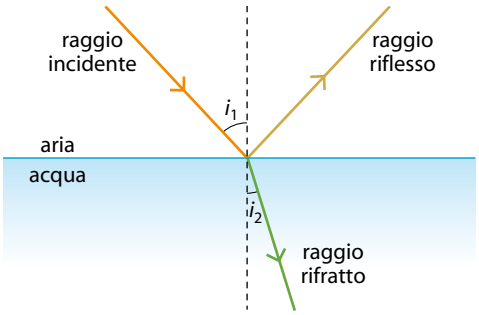
Tabella 1
Seno di alcuni angoli

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

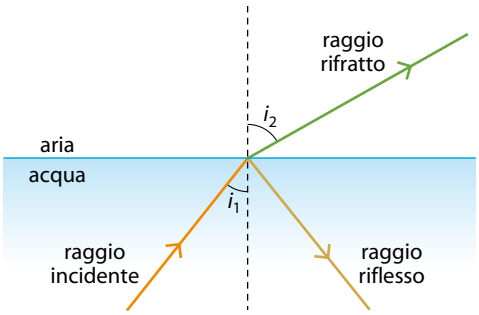
La prima legge della rifrazione

Nelle ➜figure 2*a* e 2*b* 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 2*a*] si avvicina alla normale; viceversa, se il raggio passa da un mezzo più denso a uno meno denso [➜figura 2*b*], si allontana dalla normale.

Figura 2
Percorso del raggio rifratto.



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*.

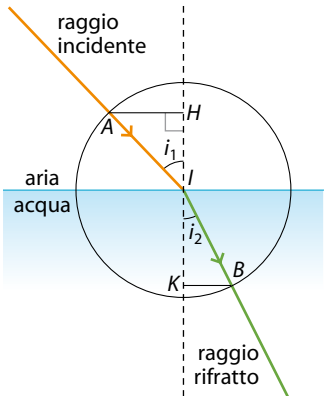
Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale nel punto di incidenza appartengono a uno stesso piano (**prima legge della rifrazione**).

online.zanichelli.it/ruffo_fisica
1 FILM E 3 TEST
Raggi luminosi
La rifrazione della luce

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

La seconda legge della rifrazione

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



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.

Figura 4
Renè Descartes.

Civica Raccolta delle Stampe A. Bertarelli

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

ESEMPIO 1 L'angolo di incidenza è $i_1 = 40°$ e quello di rifrazione $i_2 = 26°$. Risulta: sen $i_1 = 0{,}643$ e 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*.

Applica definizioni e leggi a p. 13

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

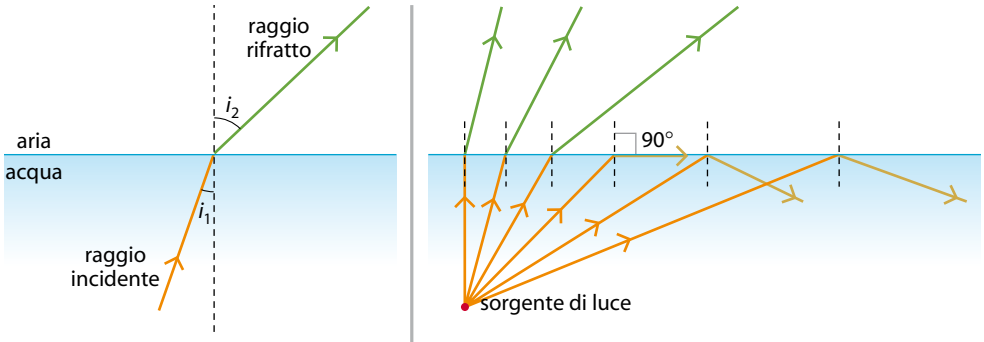
14.5 La riflessione totale

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.

L'angolo limite

Quando la luce passa da un mezzo più denso a un mezzo meno denso ($n_2 < n_1$), il raggio rifratto si allontana dalla normale, perciò l'angolo di rifrazione è maggiore dell'angolo di incidenza [➜figura 1*a*]. Se aumentiamo progressivamente l'angolo di incidenza i_1, anche l'angolo di rifrazione aumenta. A un certo punto il raggio rifratto sarà radente alla superficie di separazione dei due mezzi e l'angolo di rifrazione assume il valore di 90° [➜figura 1*b*]. L'angolo di incidenza a cui corrisponde un angolo di rifrazione di 90° si chiama **angolo limite**.

Figura 1
Riflessione totale.



a Il raggio incidente proveniente dall'acqua si rifrange nell'aria, allontanandosi dalla normale.

b Esiste un angolo di incidenza in corrispondenza del quale il raggio rifratto è parallelo alla superficie dell'acqua.

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

$$\text{sen } i_2 = \text{sen } 90° = 1$$

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

$$\frac{\text{sen } i_L}{\text{sen } 90°} = \frac{n_2}{n_1}$$

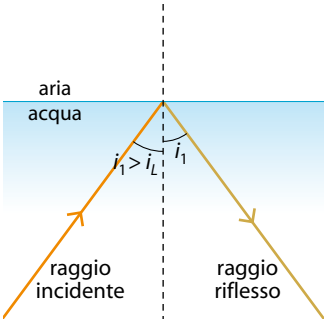
$$\text{sen } i_L = \frac{n_2}{n_1}$$

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

$$\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = \frac{1}{1{,}5} = 0{,}67$$

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

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.



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.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

Prismi ottici

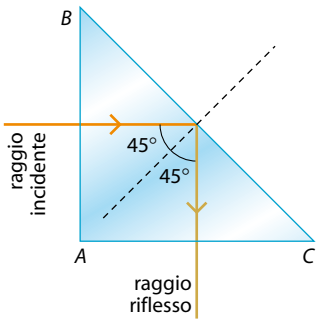
MATEMATICA
In un triangolo rettangolo isoscele, gli angoli alla base misurano ognuno 45°.

Nella ➜figura 3 è disegnato un prisma di vetro avente per sezione un triangolo rettangolo isoscele. Il raggio che incide sulla superficie *AB* prosegue diritto 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°.

Poiché questo angolo è maggiore di 42° (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°.

Figura 3
Il prisma cambia di 90° la direzione di un raggio luminoso.

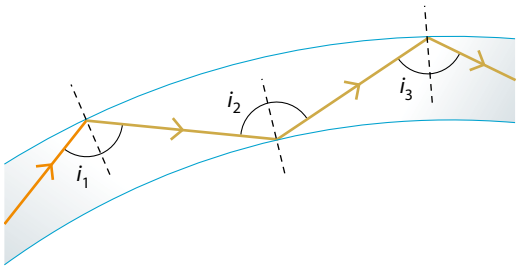


Le fibre ottiche

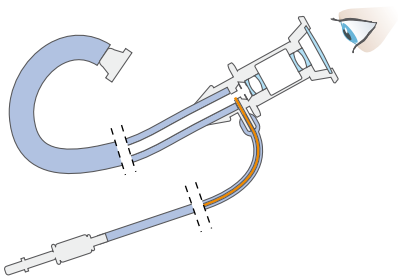
Le *fibre ottiche* costituiscono una delle più interessanti applicazioni della riflessione totale. Una fibra ottica è costituita da un materiale trasparente rivestito da una guaina opaca. La luce penetra nella fibra con un angolo di incidenza maggiore dell'angolo limite [➜figura 4*a*], perciò viene riflessa 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 4*b*]. 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.

Figura 4
Le fibre ottiche.



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.

Figura 5
Fibre ottiche usate nelle telecomunicazioni.

TECHNOLOGY AND INDUSTRY, BRAND X, CULVER CITY 2002

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 kilometri senza bisogno di amplificarlo.

Applica definizioni e leggi a p. 14

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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°, 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.

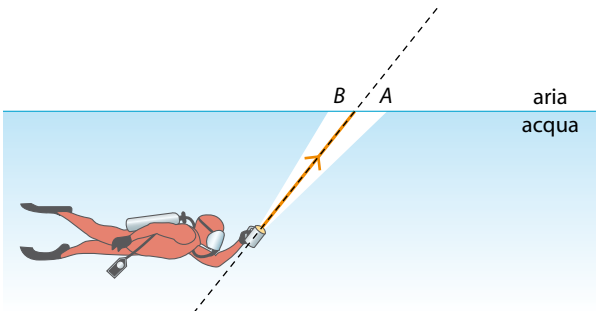
▶ Quanto vale l'angolo di incidenza?

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 $\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = 1{,}4$.

▶ Utilizzando una calcolatrice completa la tabella seguente:

i_1	25°	50°
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 $\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = 1{,}1$, 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° e viene deviato di 15,0° 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. 27

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

L'angolo limite

1 Un raggio luminoso che si propaga in aria incide su un diamante.

▶ Sapendo che l'angolo limite è 24,4°, calcola l'indice di rifrazione del diamante.

2 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.

3 L'angolo limite di un pezzo di plastica in aria è 38,5°.

▶ 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

4 Un raggio di luce che si propaga nel vetro (n = 1,50) incide sulla superficie di separazione vetro-aria con un angolo di 45°.

▶ Qual è l'angolo di rifrazione? Perché?

5 **Vero o falso?** Le affermazioni sono riferite alla riflessione totale.

a) La riflessione totale si ha quando l'angolo di incidenza è superiore all'angolo limite. V F

b) Se un raggio luminoso passa da un mezzo più denso a uno meno denso si ha sempre riflessione totale. V F

c) Se la luce passa dall'acqua al plexiglas, si ha sempre riflessione totale. V F

d) Con un angolo di incidenza di 90° si ha sempre riflessione totale. V F

6 L'angolo limite per la rifrazione vetro-aria vale circa 42°. Due raggi che si stanno propagando in un blocco di vetro incidono sulla superficie di separazione vetro-aria con angoli rispettivamente di 30° e 45°.

▶ Che cosa succede a questi due raggi?

7 Un raggio luminoso colpisce un fermacarte cubico di plastica (n = 1,49) che poggia su un tavolo.

▶ Calcola l'angolo limite.

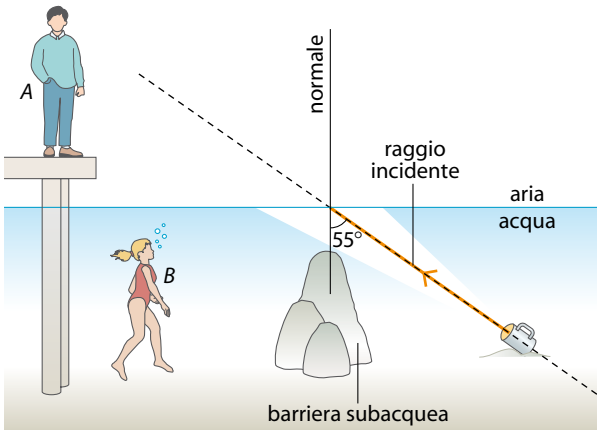
▶ Se l'angolo di incidenza del raggio luminoso è 60°, disegna il percorso del raggio.

8 La tabella che segue è relativa al passaggio di un raggio di luce dal vetro all'aria.

i_1	sen (i_1)	n_1	n_2	sen (i_2)	i_2
30°	.....	1,5	1	.....	.....
45°	.....			.....	.....

▶ Completala nelle parti mancanti.

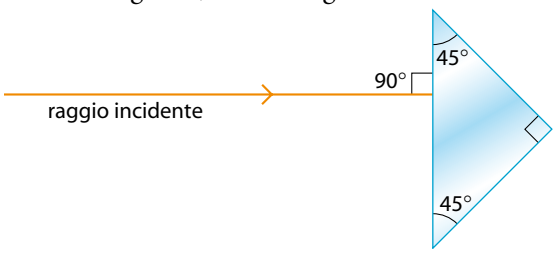
9 Un fascio di luce incide sulla superficie di separazione acqua-aria come in figura.



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

Prismi ottici

10 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?

11 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

12 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. 28

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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

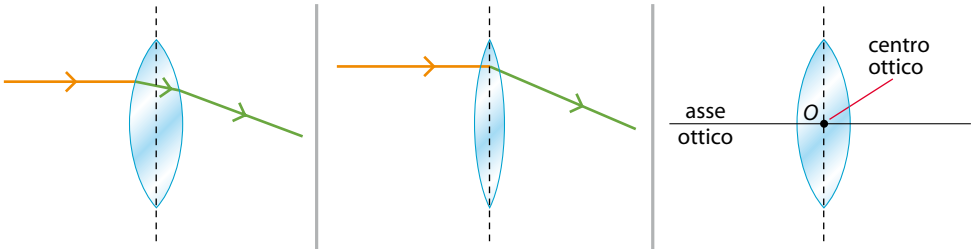
Nomenclatura sulle lenti

Una lente è un corpo trasparente. Un raggio di luce che attraversa una lente subisce due rifrazioni [➜figura 1*a*]: 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 1*b*].

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

Figura 1
Lenti sottili.



a La luce che attraversa una lente subisce due rifrazioni.

b Se la lente è sottile, si può considerare una sola rifrazione.

c Asse ottico e centro ottico della lente.

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 2*a*]. 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 2*b*]; il raggio 2 che passa per il centro ottico della lente e la attraversa senza cambiare direzione.

Figura 2
Lente convergente.

a In una lente convergente, i raggi paralleli all'asse ottico attraversano la lente e vengono rifratti nel fuoco.

b Bastano due soli raggi, uscenti dalla sorgente puntiforme *S*, per determinare la posizione dell'immagine *S'*.

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.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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].

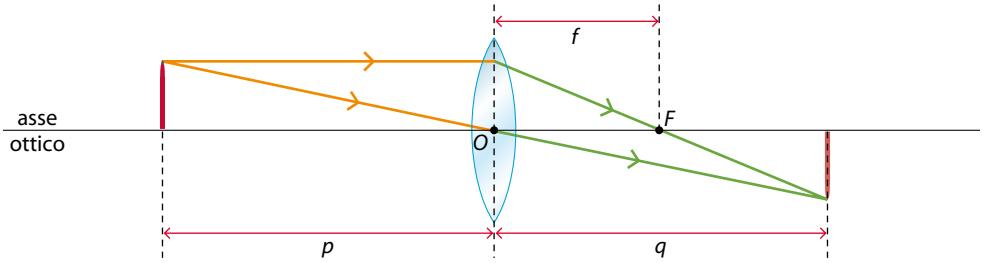


Figura 3
L'oggetto è a distanza *p* dal centro ottico. L'immagine si forma alla distanza *q* dal centro ottico; *f* è la distanza focale.

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:

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

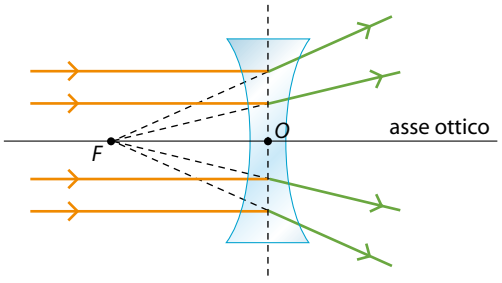
che risolta dà il valore $f = 7{,}5$ cm.

Lenti divergenti

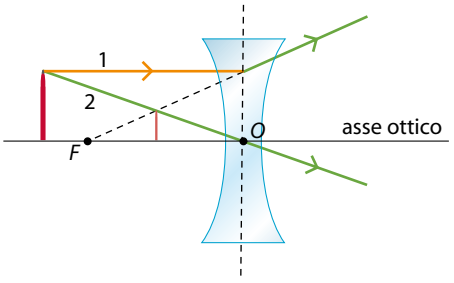
La lente divergente, contrariamente a quella convergente, fa divergere i raggi paralleli all'asse ottico [➔ figura 4*a*]. I raggi rifratti non si incontrano, però i loro prolungamenti si incontrano nel punto F che rappresenta il fuoco della lente. La luce si propaga come se provenisse dal fuoco, in realtà 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 4*b*]. L'immagine si trova nell'intersezione dei prolungamenti dei due raggi rifratti ed è sempre virtuale.

Figura 4
Lente divergente.



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.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

online.zanichelli.it/ruffo_fisica

BIOLOGIA

L'occhio, 2 pagine

Se l'oggetto è esteso, come la penna della [➜figura 4*b*], 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

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

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

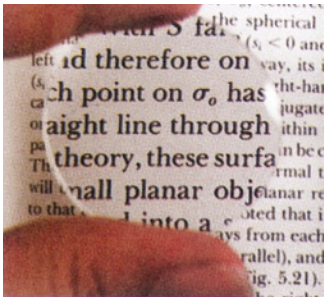
Come nel caso degli specchi curvi, anche l'ingrandimento di una lente [➜figura 5] si calcola con la formula:

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

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:

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

Figura 5
Una lente di ingrandimento.



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:

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

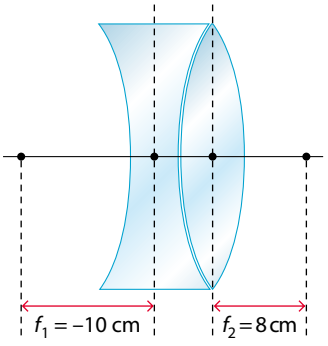
Nel SI il potere diottrico si esprime in m^{-1} (si legge «metro alla meno 1»); nella pratica si misura in **diottrie**.

ESEMPIO 4 Una lente ha una distanza focale di 20 cm. Poiché 20 cm = 0,2 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.

Figura 6
Due lenti sottili affiancate.



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:

$$d = d_1 + d_2$$

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

Lenti convergenti

1 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?

2 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?

3 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?

4 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

5 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?

6 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.

7 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

8 Un tuo amico vuol bruciare un foglio con i raggi del sole. Sceglie allo scopo una lente divergente.
- Perché non approvi la sua scelta?

9 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?**

a) Una lente divergente ha la distanza focale negativa. V F

b) L'immagine prodotta da una lente divergente è sempre reale. V F

c) L'immagine prodotta da una lente divergente è sempre ingrandita. V F

d) L'immagine di un oggetto che si trova tra il fuoco e il centro di una lente divergente è capovolta e rimpicciolita. V F

L'ingrandimento

11 Un orefice 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?

12 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 rimpicciolita di 2/3?

13 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

14 Un miope corregge la vista con delle lenti da –7 diottrie.
- Qual è la distanza focale delle lenti?

15 Completa la tabella seguente.

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

16 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. 28

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

14.7 Cenni di ottica ondulatoria

IDEA-CHIAVE Fenomeni come la dispersione, la diffrazione e l'interferenza si spiegano con la teoria ondulatoria della luce.

Che cos'è la luce?

Figura 1
Lo scienziato danese Christiaan Huygens (1629-1695).

Per molto tempo i fisici hanno discusso sulla natura della luce e sui fenomeni connessi, passando da un modello corpuscolare a un modello ondulatorio.

Il modello corpuscolare era sostenuto da Newton. Secondo questo modello la luce è un insieme di particelle microscopiche, emesse dalle sorgenti luminose. Le particelle di luce si muovono in linea retta, rimbalzano sui corpi opachi, attraversano i mezzi trasparenti cambiando direzione e raggiungono i nostri occhi provocando la visione.

Il modello ondulatorio era sostenuto da Christiaan Huygens (1629-1695) [➜figura 1]. Secondo questo modello la luce si propaga come un'onda e con le proprietà delle onde: si riflette sui corpi opachi, si propaga nei mezzi, viene assorbita e così via.

Entrambi i modelli spiegano bene alcuni fenomeni luminosi. Sulla velocità di propagazione della luce in un mezzo, invece, sono in completo disaccordo. Infatti, mentre il modello corpuscolare prevede una velocità della luce maggiore in un mezzo che nel vuoto, quello ondulatorio prevede il contrario.

La disputa sulla natura della luce andò avanti finché nel 1801 il fisico e medico inglese Thomas Young (1773-1829) ideò e realizzò un esperimento che convinse gli scienziati del carattere ondulatorio della luce. Egli riuscì a mettere in evidenza che la luce è soggetta all'interferenza, fenomeno caratteristico ed esclusivo delle onde.

Nel 1849 il francese Armand Louis Fizeau (1819-1896) diede una conferma sperimentale al modello ondulatorio, dimostrando che la velocità della luce è maggiore nel vuoto che in un qualsiasi altro mezzo. Infine il fisico inglese James Clerk Maxwell (1831-1879) confermò teoricamente la validità del modello ondulatorio.

Pertanto la luce si propaga come un'onda e quindi è caratterizzata da una lunghezza d'onda λ e una frequenza f, legate fra loro dalla velocità di propagazione c:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

La dispersione della luce

Figura 2
Il fascio attraversa la fenditura e viene rifratto due volte dal prisma (all'entrata e all'uscita). Sullo schermo il fascio risulta disperso, cioè suddiviso nei sette colori che formano la luce bianca.

Un fascio di luce bianca, incidente su un prisma [➜figura 2], viene scomposto in sette fasci (non perfettamente distinti) che hanno colori diversi: rosso, arancio, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto. Questo fenomeno si chiama **dispersione** della luce e fu studiato da Newton, che chiamò **spettro** la distribuzione dei colori.

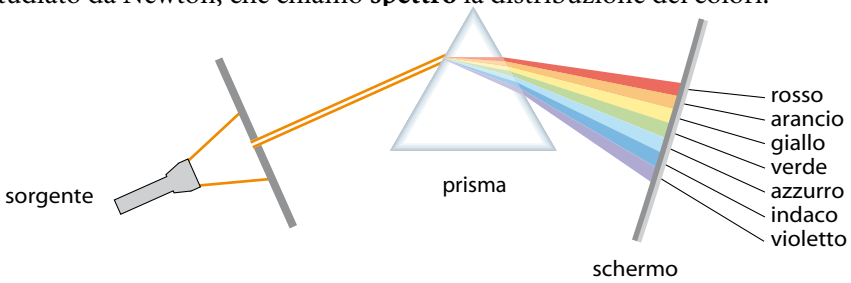


Tabella 1 Indici di rifrazione del vetro flint

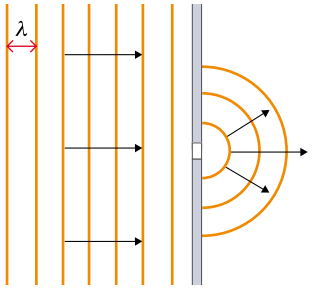
Colore	Indice di rifrazione
Violetto	1,607
Azzurro	1,594
Verde	1,581
Giallo	1,575
Arancione	1,571
Rosso	1,569

Sappiamo che la deviazione del fascio di luce incidente prodotta dal prisma dipende dall'indice di rifrazione del vetro. Perciò il fatto che ci sia una dispersione dei colori, cioè che ogni colore ha una deviazione diversa, ci permette di affermare che l'indice di rifrazione dipende dal colore della luce incidente.

In particolare, il violetto viene deviato più degli altri e quindi rispetto a questo colore il vetro presenta l'indice di rifrazione maggiore [➜tabella 1].

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

Figura 3
Quando la fenditura è molto stretta, la luce si diffrange, cioè si propaga anche ai lati della fenditura.



La diffrazione della luce

Secondo il modello ondulatorio, la luce è un'onda e quindi una perturbazione che si propaga nello spazio. Ne deriva che non possiamo rappresentarla con i raggi come fatto finora, ma mediante il **fronte d'onda**, cioè l'insieme delle posizioni raggiunte dalla perturbazione nello stesso istante. In pratica con i raggi si indica solamente la direzione di propagazione delle onde luminose.

Quando la luce attraversa una fenditura molto grande rispetto alla sua lunghezza d'onda λ, prosegue in linea retta. Al di là della fenditura passano solo i raggi che non sono intercettati dallo schermo. Quando invece la luce attraversa una fenditura molto stretta, di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda, il fascio di luce si apre a ventaglio e si propaga anche dietro la fenditura, dove ci dovrebbe essere buio [➜figura 3]. Il fenomeno si verifica anche quando la luce incontra sul suo cammino un ostacolo di dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della luce.

L'interferenza della luce

Per le onde luminose vale il principio di sovrapposizione: due onde che passano nello stesso istante in un punto si sovrappongono, dando origine al fenomeno dell'**interferenza**. L'ampiezza dell'onda risultante dipende dalla distanza percorsa dalle due onde e quindi nel punto ci può essere interferenza costruttiva (luce) o distruttiva (buio).

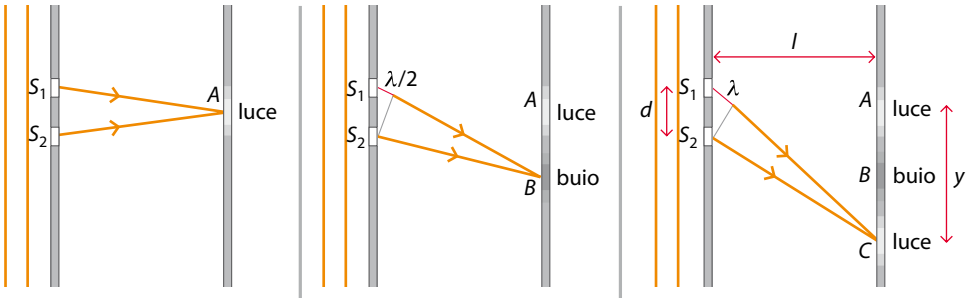
Per ottenere interferenza sono necessarie due sorgenti. Nel caso delle onde luminose si usa una sola sorgente e si fa passare la luce attraverso una doppia fenditura.

Nella ➜figura 4*a* le onde che attraversano le due fenditure arrivano nel punto *A* dello schermo dopo aver percorso la stessa distanza. Se sulle fenditure le due onde presentavano due creste (cioè erano in fase), le due creste arrivano nel punto *A* nello stesso istante, le ampiezze si sommano, l'interferenza è *costruttiva*.

Nella ➜figura 4*b* le onde arrivano in *B* dopo aver percorso distanze che differiscono per mezza lunghezza d'onda, quindi una ci arriva con la cresta, l'altra con il ventre (sono sfasate). L'ampiezza risultante è nulla e l'interferenza è *distruttiva*.

Nella ➜figura 4*c*, pur percorrendo distanze diverse, le due onde giungono in *C* ancora in fase e una cresta si sovrappone all'altra. L'interferenza è di nuovo costruttiva e così via. In pratica, sullo schermo si ottengono zone luminose e zone buie che si chiamano **frange di interferenza**.

Figura 4
Interferenza costruttiva e distruttiva.



a In *A* arrivano due onde in fase, l'interferenza è costruttiva.

b In *B* arrivano due onde sfasate di mezza lunghezza d'onda, l'interferenza è distruttiva.

c In *C* arrivano due onde in fase, l'interferenza è di nuovo costruttiva.

L'interferenza attraverso due fenditure permette di misurare la lunghezza d'onda della luce. Infatti, si può dimostrare che vale la seguente relazione:

$$\lambda = \frac{yd}{l}$$

dove l indica la distanza tra il piano delle fenditure e lo schermo, d la distanza tra le fenditure e y la distanza della prima zona luminosa da quella centrale.

Misurando y, d e l si calcola il valore della lunghezza d'onda.

online.zanichelli.it/ruffo_fisica
Applica definizioni e leggi, 1 pagina

Altri problemi a fine unità, p. 30

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

La riflessione della luce

▶ È possibile tracciare il percorso dei raggi luminosi, in modo da studiare sperimentalmente le leggi della propagazione della luce?

Il problema

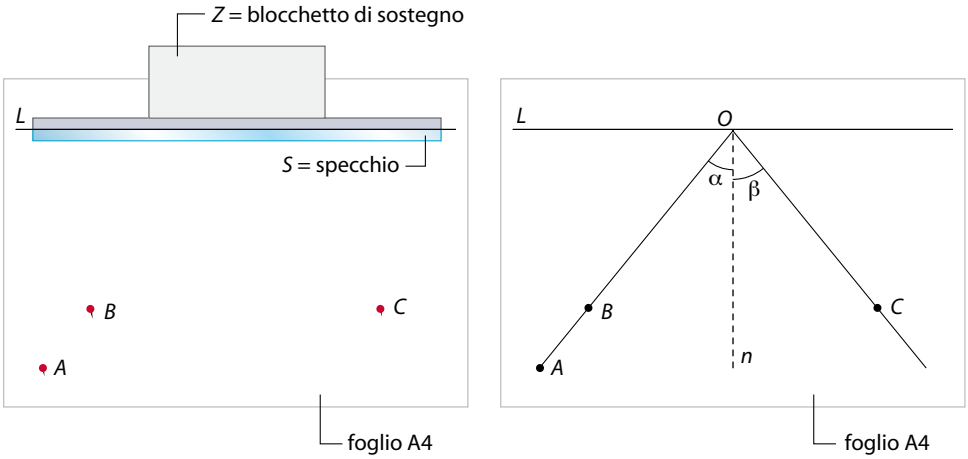
Quando osserviamo un oggetto e la sua immagine riflessa in uno specchio, non vediamo i raggi luminosi che vanno dall'oggetto allo specchio e quelli riflessi, ma soltanto il loro effetto.

Possiamo ricostruire il percorso di un raggio incidente sulla superficie di uno specchio e di quello riflesso dallo specchio stesso?

Una strategia

I raggi luminosi si propagano in linea retta. Appoggiamo un foglio di carta su uno spessore di cartone o di polistirolo e piantiamo uno spillo in modo che rimanga in posizione verticale. Poi, tenendo un occhio chiuso, piantiamo un secondo spillo in modo che esso copra l'immagine del primo spillo. Questo è possibile perché i raggi luminosi si propagano in linea retta e le posizioni dei due spilli individuano il raggio che va dal primo spillo al nostro occhio.

Applichiamo questa semplice tecnica di tracciamento alla riflessione da parte di uno specchio piano. Sul foglio di carta tracciamo una linea L. Sul retro di uno specchietto piano (S) fissiamo un blocchetto (Z) in modo che lo specchio si regga verticalmente, poi disponiamo lo specchietto sopra la linea L in modo che la linea tagli a metà lo spessore dello specchio. Di fronte allo specchio fissiamo verticalmente due spilli A e B [➜ figura 1].



Osserviamo nello specchio le immagini riflesse di A e B. In una posizione qualsiasi le due immagini saranno distinte, ma se fissiamo lo specchio con un occhio chiuso e muoviamo la testa a destra e a sinistra, troviamo una posizione nella quale l'immagine dello spillo B copre esattamente quella dello spillo A. Che cosa accade ai raggi luminosi provenienti da A e da B in questo caso?

Nella posizione in cui ci troviamo, i raggi riflessi che osserviamo, provenienti dai due spilli, coincidono, perciò devono coincidere anche i raggi incidenti che generano i due raggi riflessi. Il raggio incidente proveniente da A è, in questo caso, quello passante per B [➜ figura 2].

Sempre in questa posizione, fissiamo uno spillo C in modo da coprire l'immagine comune di A e di B [➜ figura 2]. Dallo spillo A partono infiniti raggi in tutte le direzioni;

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

il raggio incidente che ci interessa è quello passante per B (raggio AB), che incide sullo specchio nel punto O. Come possiamo trovare O?

Togliamo lo specchio e gli spilli, tracciamo la retta AB e prolunghiamola fino a incontrare la linea L: in questo modo troviamo il punto O. Da O parte anche il raggio riflesso; possiamo tracciare questo raggio?

Il raggio riflesso nel punto O deve passare per lo spillo C, perché l'immagine comune di A e di B è coperta da C. Perciò possiamo tracciare la retta OC, corrispondente al raggio riflesso. Abbiamo così costruito il raggio riflesso e il raggio incidente.

Per le leggi della riflessione, il raggio incidente e il raggio riflesso formano angoli uguali con la normale alla superficie di riflessione nel punto di incidenza. Possiamo tracciare la perpendicolare n alla linea L in O, e misurare gli angoli α e β. Se la previsione teorica è corretta, questi angoli devono risultare uguali entro gli errori sperimentali.

Riassumendo

Osservazioni

- Possiamo ricostruire un raggio luminoso particolare proveniente da un oggetto occultando quell'oggetto dietro altri oggetti.
- Posizionando due spilli individuiamo il raggio luminoso proveniente dal primo oggetto e bloccato dal secondo.

Interpretazioni

- I raggi luminosi si propagano in linea retta.
- I raggi si comportano come rette, quindi per due punti passa un solo raggio.

Le misure

Consideriamo una serie di coppie raggio incidente-raggio riflesso spostando ogni volta lo spillo B e determinando la nuova posizione in cui lo spillo C copre l'immagine riflessa di A e B. Misuriamo ogni volta gli angoli α e β.

- Raccogliamo i dati sugli angoli in una tabella:

	esperienza 1	esperienza 2	esperienza 3	esperienza 4
angolo α	30°	42°	36°	25°
angolo β	28°	41°	36°	27°

Nonostante la difficoltà a tracciare le rette e a misurare gli angoli con precisione, l'angolo d'incidenza e l'angolo di riflessione hanno valori simili, se non uguali.

- Ripeti l'esperienza e compila la tabella:

	esperienza 1	esperienza 2	esperienza 3	esperienza 4
angolo α				
angolo β				

Domande

- Perché è importante che lo specchio sia perpendicolare al foglio?
- Che cosa succede se $\alpha = 0$?
- Come si potrebbe ripetere l'esperienza utilizzando uno specchio curvo?

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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?

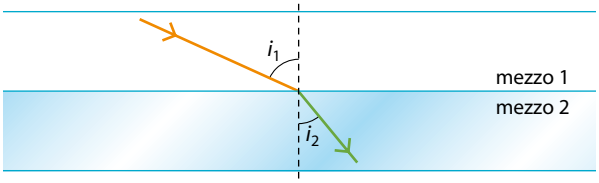
- L'ingrandimento G si calcola con la formula:

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

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:

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



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°.
- 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 λ, 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:

$$\lambda = \frac{yd}{l}$$

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.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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:
$\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = \text{costante}$; $\frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } i_2} = \frac{n_2}{n_1}$; $n_1 \cdot \text{sen } i_1 = n_2 \cdot \text{sen } i_2$.
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?

online.zanichelli.it/ruffo_fisica
TEST INTERATTIVI, 30 minuti (20 test)
TEST E QUESITI, 1 pagina

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

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: $t = 2{,}51$ 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:

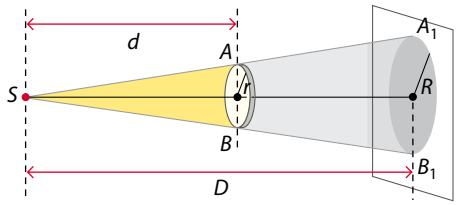
$$2d = (300\,000 \text{ km/s}) \times (2{,}51 \text{ s}) = 7{,}53 \times 10^5 \text{ km}$$

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

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 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^2]



14.2 La riflessione della luce

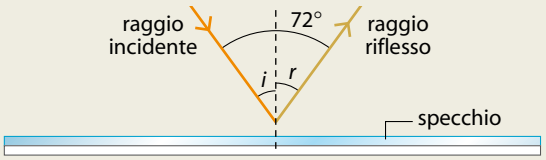
3 PROBLEMA SVOLTO
Specchio piano

Un raggio incide su uno specchio piano e il raggio riflesso viene deviato di 72°.

▶ 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° (figura). Poiché i due angoli sono uguali, l'angolo di incidenza sarà 72° : 2 = 36°.



Osservazione

Con quale angolo deve incidere il raggio per essere deviato di 90°?

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°. Una luce colpisce lo specchio 1 con un angolo di 57°.

▶ 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° 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°.

▶ Disegna il raggio riflesso.

▶ Disegna lo specchio ruotato di un angolo α.

▶ Dimostra che il raggio riflesso è ruotato di 2α.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

8 Un triangolo rettangolo di cateti $AB = 5$ cm e $AC = 5$ 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° 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° 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: $p = 30$ cm Raggio di curvatura: $r = 20$ 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:

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

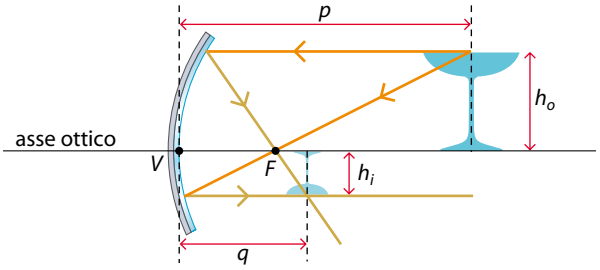
- Sostituiamo i valori numerici:

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

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]

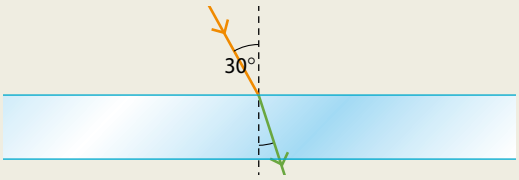
Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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°.

▶ Calcoliamo l'angolo di rifrazione.



Analisi e soluzione

Dati	Incognite
Indice di rifrazione del vetro: $n_2 = 1{,}52$ Angolo di incidenza: $i_1 = 30°$	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: $n_1 \cdot \text{sen}\, i_1 = n_2 \cdot \text{sen}\, i_2$.

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

- Poiché $\text{sen}\, i_2 = 0{,}329$, l'angolo di rifrazione è $i_2 = 19°$.

Osservazione

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

17 Un raggio luminoso incide su una lastra di vetro ($n = 1{,}5$), a facce piane e parallele, con un angolo di 40°. 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°; 25°; 25°]

18 Un raggio di luce penetra in un diamante e colpisce una sua faccia con un angolo di incidenza di 30°.

▶ 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°.

▶ Sapendo che l'angolo di rifrazione è 35,8°, 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°]

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

▶ Sapendo che l'indice di rifrazione della soluzione è 1,25, determina l'angolo di incidenza.

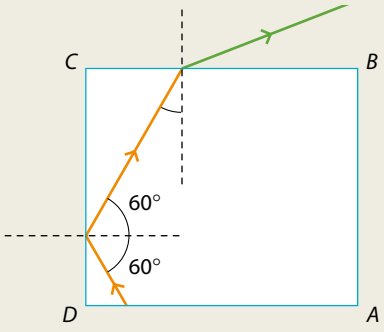
▶ Qual è la velocità di propagazione della luce nella soluzione? [62,1°; $2{,}40 \times 10^8$ m/s]

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° sulla superficie di separazione blocco-aria (indicata nella figura con *DC*).

▶ Disegniamo il percorso del raggio.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

Analisi e soluzione

- Calcoliamo l'angolo limite

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

da cui si ottiene

$$i_L = 40{,}5°$$

- 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° ed esce dal blocco allontanandosi dalla normale.

Che succede se… L'angolo di incidenza iniziale è minore di 40°?

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°.

▶ 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:

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

- 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.

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

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^{-1}; -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 focale: $f = -6{,}0$ cm	Distanza immagine: $q = ?$ 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^{-1}]

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]

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

SCHEMATIZZA E RISOLVI UN PROBLEMA

38 Due lenti sottili affiancate hanno distanza focale $f_1 = 8$ cm e $f_2 = -12$ 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: $\lambda = 6000$ Å	Frequenza: $f = ?$ Velocità: $v = ?$

- 1 Å corrisponde a 10^{-10} 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.

[$1{,}9 \times 10^5$ km/s; $3{,}8 \times 10^{14}$ 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? [$1{,}3 \times 10^{-5}$ s]

43 Attraverso due sottili fenditure, che distano tra loro $d = 1{,}2 \times 10^{-5}$ 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 $y = 22$ mm da quella centrale.

▶ Quanto vale la lunghezza d'onda della luce utilizzata? [$4{,}4 \times 10^{-7}$ 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?

[$5{,}0 \times 10^{-7}$ m; 5000 Å]

online.zanichelli.it/ruffo_fisica
PROBLEMI RIASSUNTIVI, 1 pagina

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010

UNITÀ 14

14.2 La riflessione della luce [p. 7]

3 a) F; b) V; c) F; d) V
4 50°; 80°
7 6,0 m
13 3,0 cm, 6,0 cm

14.3 La riflessione sugli specchi curvi [p. 8]

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. 13]

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

14.5 La riflessione totale [p. 14]

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

14.6 Le lenti [p. 18]

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

Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6321]
Questo file è parte del corso G. Ruffo, *Fisica: lezioni e problemi*, © Zanichelli 2010