2. RIFLESSIONE E RIFRAZIONE

2.1. Le leggi della riflessione

Tutto ciò che è stato detto nel paragrafo 1.9, è utile per trovare la posizione apparente di una sorgente di luce. Tale posizione non è però necessariamente quella effettiva della sorgente. Se i raggi di luce provenienti da essa hanno subito un cambiamento di direzione per *riflessione* o *rifrazione*, prolungandoli all'indietro, il loro punto di intersezione non rappresenterà l'effettivo punto da cui essi hanno avuto origine. Ciò nonostante, vedrete la sorgente apparentemente situata nel punto d'intersezione: vedrete l'immagine della sorgente, non la sorgente.

Nel capitolo 1 abbiamo brevemente discusso le immagini che si vedono negli specchi; è possibile trovare leggi della riflessione tali da giustificare la posizione di tali immagini? La Fig. 2.1 mostra un pennello di luce che cade su di una lastra metallica levigata e pulita: il pennello è reso visibile con fumo. Notiamo subito che il *pennello riflesso PR* è definito altrettanto nettamente quanto il *pennello incidente IP*. I metalli levigati e puliti, le superfici liquide e gli specchi per i quali i pennelli riflessi sono nettamente definiti, sono chiamati *riflettori speculari*. Sostanze come la carta bianca danno invece una *riflessione diffusa* (si veda la Fig. 2.2).

Per studiare la riflessione speculare collochiamo un foglio di cartone bianco in modo che i due pennelli luminosi (quello incidente e quello riflesso) sfiorino appena la sua superficie come nella Fig.2.3. Per questo è necessario mantenere il cartone perpendicolare alla superficie riflettente e se ripetiamo l'esperimento più volte, variando la direzione secondo cui il pennello incidente colpisce la superficie, otteniamo sempre lo stesso risultato: il foglio di cartone (e perciò il piano dei due pennelli) è sempre perpendicolare alla superficie riflettente.

Tracciamo poi a metà del foglio di cartone una retta perpendicolare a uno dei suoi lati e collochiamo il foglio in posizione perpendicolare alla superficie riflettente come prima, facendo coincidere un estremo del segmento rettilineo che abbiamo tracciato con il punto in cui il pennello colpisce la superficie riflettente.

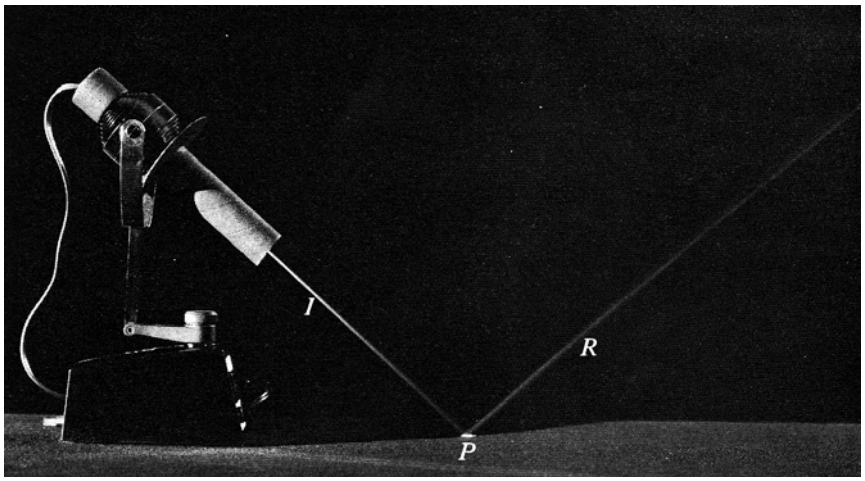

Fig. 2.1. *Riflessione speculare*. Un fascio di luce che colpisce una superficie metallica levigata e pulita dà luogo ad un fascio riflesso nettamente definito.

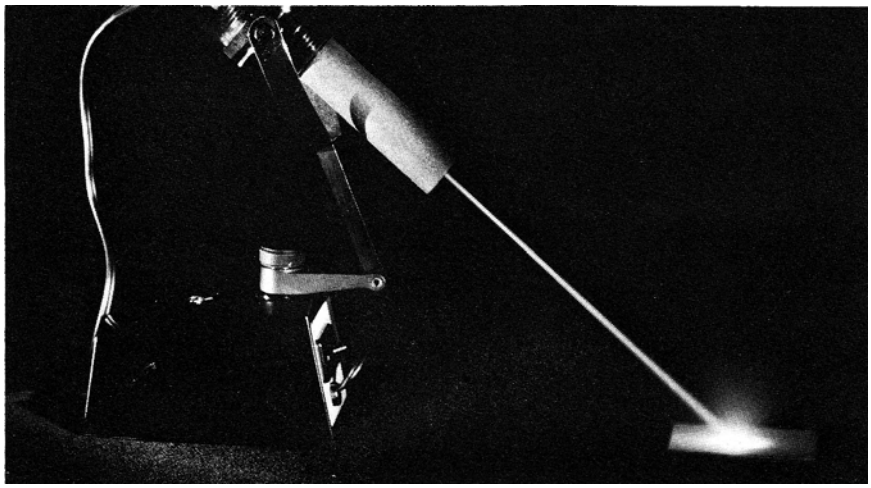

Fig. 2.2. *Riflessione diffusa*. Quando un fascio di luce cade su un foglio di carta bianca, la luce viene riflessa in tutte le direzioni.

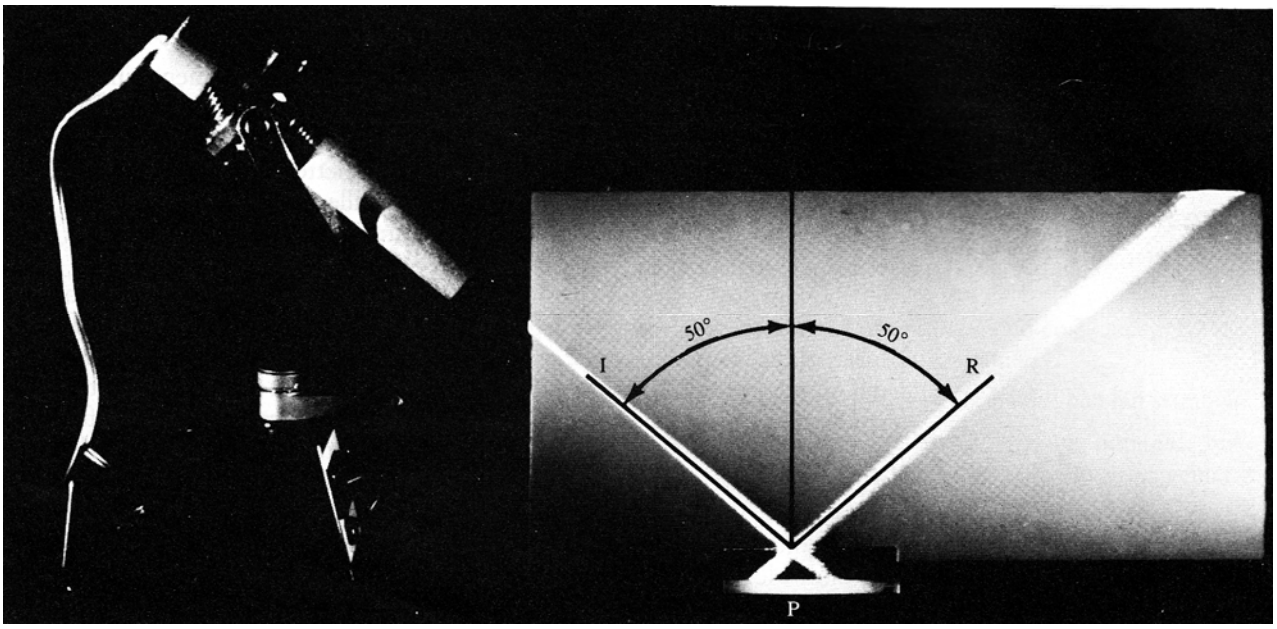

Fig. 2.3. Esperimento dimostrativo della *prima* e della *seconda legge* della *riflessione speculare*. I fasci sembrano incrociarsi perché nello specchio sono visibili anche le riflessioni delle regioni illuminate del cartone.

La retta è stata tracciata sul foglio e giace quindi sullo stesso piano dei due pennelli di luce ed è perpendicolare alla superficie riflettente. Questa osservazione conduce alla ***prima legge della riflessione speculare***:

Quando la luce è riflessa da una superficie speculare piana, il ***raggio incidente****, il* ***raggio riflesso*** *e la* ***normale*** *alla superficie nel punto di incidenza giacciono tutti nello stesso piano.*

Supponiamo ora di misurare gli angoli fra la normale e i due raggi come è indicato nella Fig. 2.3. Troviamo che l'angolo fra il raggio riflesso e la normale, detto *angolo di riflessione*, è uguale all'angolo fra il raggio incidente e la normale, detto *angolo di incidenza*. Questo risultato è confermato quando si confrontano questi due angoli e si può quindi enunciare la ***seconda legge della riflessione speculare***:

*L'****angolo di riflessione*** *è* ***uguale*** *all'****angolo di incidenza****.*

Quesiti

2.1. Nella Fig. A, qual è l'angolo d'incidenza e qual è l'angolo di riflessione?

2.2. Quanti raggi diversi possono colpire uno specchio in uno stesso punto e con lo stesso angolo d'incidenza?

2.3. Per un dato raggio luminoso che incide su uno specchio, quanti sono i possibili raggi riflessi?

2.4. Due specchi sono perpendicolari (Fig. B). Un raggio luminoso *AB* si riflette su entrambi gli specchi come è indicato. Dimostrate che il raggio riflesso *CD* è sempre parallelo e diretto nel verso opposto ad *AB*, indipendentemente dall'angolo di incidenza di *AB*. (Questo risultato è valido anche quando tre specchi sono mutuamente perpendicolari come le tre facce concorrenti nello stesso vertice di un parallelepipedo. La luce emessa da un laser è stata riflessa sulla Luna da un dispositivo del genere, collocato sul nostro satellite da astronauti.)

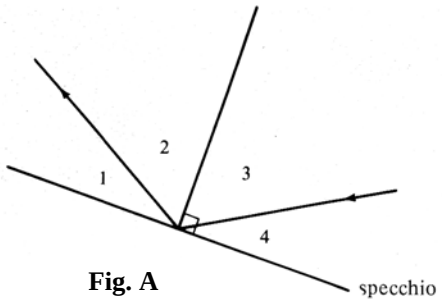

Fig. A

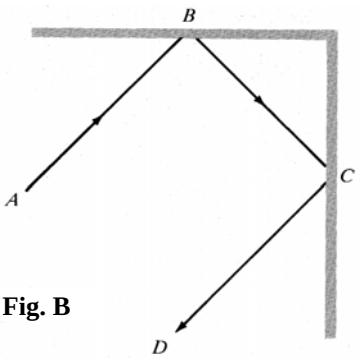

Fig. B

2.2. Rifrazione

Per lo studio sperimentale della riflessione abbiamo fatto uso di un dispositivo con cui osservare pennelli singoli e fasci di luce riflessi da superfici speculari e con osservazioni sistematiche siamo pervenuti alle due leggi della riflessione. Come vedremo nel prossimo capitolo, queste leggi, a loro volta, rendono possibile la spiegazione della formazione delle immagini, sia negli specchi piani sia in quelli curvi. Si vedrà così come il poter ricondurre una lunga serie di fenomeni ad un paio di leggi chiare e semplici costituisca un grande vantaggio e fornisca un potente strumento di previsione.

Uno studio analogo ci darà una spiegazione altrettanto semplice del secondo gruppo di fenomeni ottici discussi nel capitolo 1. In quel capitolo, abbiamo notato che la luce, nell'attraversare la superficie di alcune sostanze, molte volte cambia direzione. Questo piegarsi del fascio di luce nel passaggio da una sostanza ad un'altra è chiamato *rifrazione*. Abbiamo visto anche alcuni esempi di rifrazione nell'illusione ottica della moneta galleggiante (Fig. 1.2) e del bastone piegato (Fig. 1.1). Sebbene l'effetto del cambiamento di direzione della luce sia chiaramente mostrato da tali osservazioni, queste ci dicono ancora poco circa quello che accade ai singoli pennelli di luce. Possiamo semplificare lo studio isolando un singolo pennello di luce rifratto, come nella Fig. 2.4. Questa fotografia mostra un pennello di luce, abbastanza intenso, che dall'aria entra nell'acqua di un acquario. Notate come la direzione del pennello cambi bruscamente alla superficie dell'acqua, e come parte della luce venga riflessa dalla superficie e da questa rinviata nell'aria.

Chiamiamo *pennello incidente* il pennello di luce in arrivo, come è stato fatto nello studio della riflessione. Nella Fig. 2.4, l'angolo che tale pennello forma con la normale alla superficie è detto *angolo di incidenza*. Il pennello di luce che ha subito il piegamento alla superficie dell'acqua, è detto *pennello rifratto*, e l'angolo che esso forma con la normale è detto *angolo di rifrazione*.

Se collochiamo il goniometro di plastica bianca nell'acquario, perpendicolarmente alla superficie dell'acqua come nella Fig. 2.4, i raggi incidenti o i raggi rifratti lambiscono la superficie del goniometro. Possiamo ripetere questo esperimento con differenti angoli d'incidenza e differenti coppie di sostanze: per la massima parte di queste troviamo lo stesso risultato, sintetizzato nella ***prima legge della rifrazione***, nota anche come ***prima legge di Snellius-Cartesio*** (*):

> *Il **raggio incidente**, il **raggio rifratto** e la **normale** alla superficie nel punto di incidenza giacciono nel medesimo piano.* (†)

Notate la somiglianza tra la prima legge della rifrazione e la prima legge della riflessione (Par. 2.1)

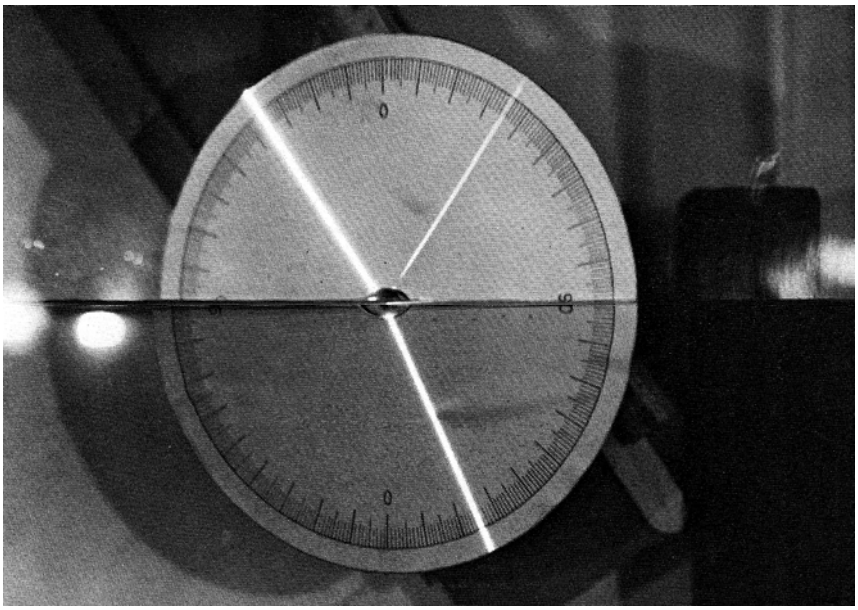

Fig. 2.4. Passaggio della luce dall'aria all'acqua.

(*) Le leggi della rifrazione sono note come *leggi di Snell-Descartes* (o dí *Snellius-Cartesio*) in onore del matematico olandese Willebrord Snell van Royen (1580 o 1591-1626), noto anche con il nome umanistico di Willebrordus Snellius, che le scoprì sperimentalmente circa nel 1621, e del matematico e filosofo francese René Descartes (1596¬1650), noto anche con il nome italianizzato di Renato Cartesio, che giunse alla loro chiara e definitiva formulazione.

(†) In alcune sostanze cristalline, il raggio incidente, la normale alla superficie rifrangente nel punto di incidenza e il raggio rifratto non giacciono nello stesso piano.

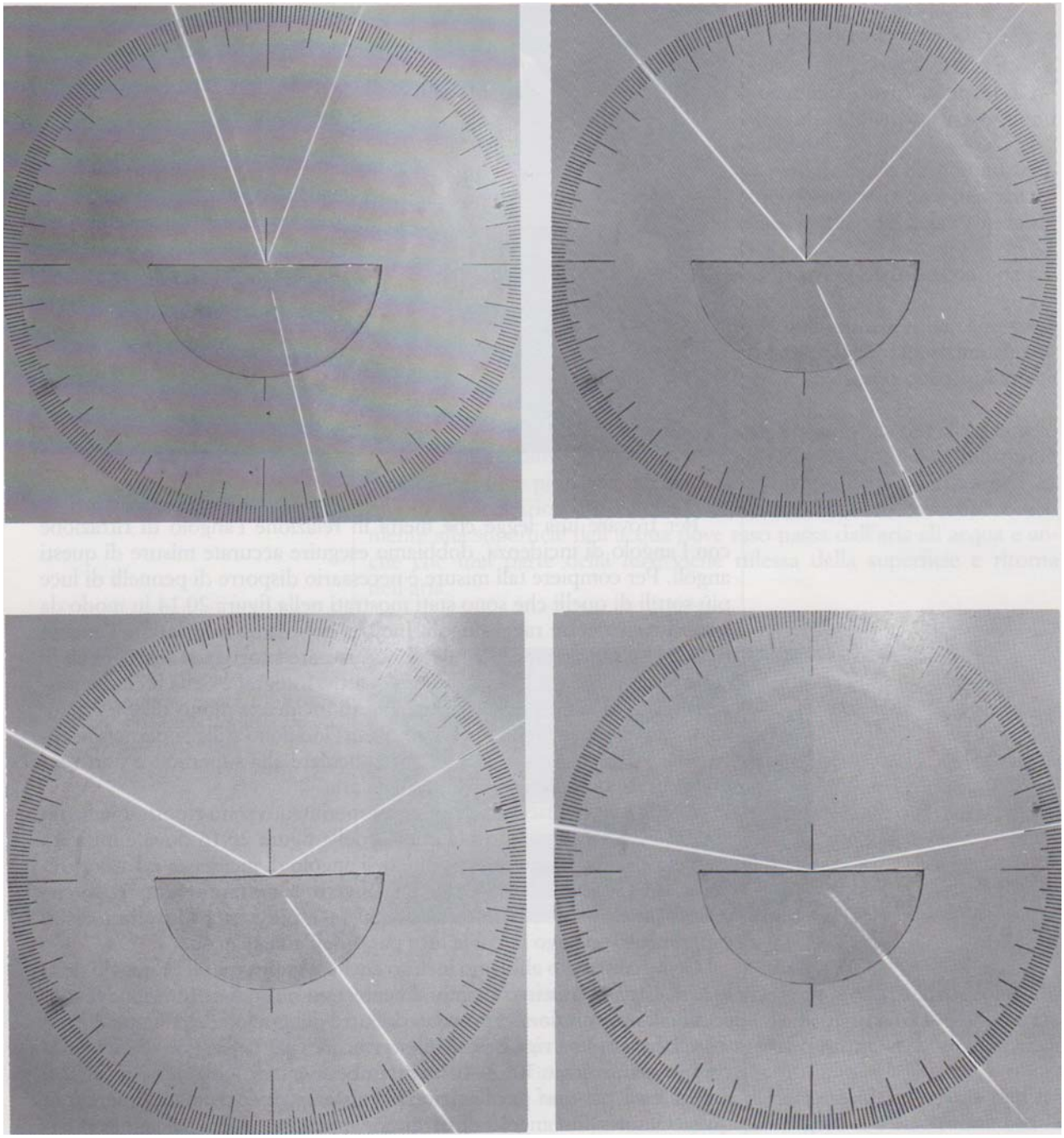

Fig. 2.5. Rifrazione di un pennello di luce che incide sul vetro con angoli di incidenza diversi.

2.3. Esperimenti sugli angoli di rifrazione

La seconda legge della riflessione dice che gli angoli d'incidenza e gli angoli di riflessione sono uguali. Osservazioni sperimentali ci aiuteranno a cercare una relazione simile tra l'angolo d'incidenza e l'angolo di rifrazione. Se desideriamo procedere a misurazioni ragionevolmente precise degli angoli d'incidenza e di rifrazione, occorrono pennelli di luce più sottili di mostrati nella Fig. 2.4, onde poterli trattare, con buona approssimazione. come raggi singoli. Occorre poi far variare l'angolo d'incidenza in un ampio intervallo di valori e misurare i corrispondenti angoli di rifrazione. Dobbiamo infine ripetere l'esperimento con differenti coppie di materiali perché la legge trovata abbia valore generale.

L'esperimento indicato nella Fig. 2.5 è stato effettuato usando aria e vetro. La sorgente di luce d può agevolmente ruotare fino ad un angolo di quasi 90°, ed è regolabile in modo che il sottile pennello di luce che da essa proviene possa sfiorare perfettamente la superficie di un foglio di carta bianca, allo scopo di rendere il pennello visibile. Una lastra di vetro di forma semicircolare, collocata lungo il percorso del pennello di luce, costituisce il secondo materiale. La faccia posteriore di questa lastra è stata molata fino a diventare leggermente ruvida, ed è stata quindi dipinta di bianco, in modo da rendere visibile il pennello che attraversa il vetro.

La lastra di vetro è montata su di una scala circolare, in modo che i centri coincidano e che la normale al diametro del semicerchio passi per lo zero della scala graduata. Il sottile pennello in arrivo viene diretto esattamente nel centro comune; possiamo pertanto misurare l'angolo di incidenza e il corrispondente angolo di rifrazione. Si noti che i pennelli rifratti incidono sulla superficie semicircolare di vetro in direzione perpendicolare alla superficie stessa e non vengono rifratti nel passaggio dal vetro all'aria Nelle fotografie è visibile anche il raggio riflesso. Sono state prese fotografie con tale dispositivo sperimentale, e sono stati considerati angoli di incidenza di 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°. Quattro di queste foto sono riportate nella Fig. 2.5, e tutti i dati ottenuti sono riportati nella Tab. 2.1. Esaminando attentamente questa serie di fotografie si può arrivare alle seguenti conclusioni:

(1) L'angolo di rifrazione per il passaggio della luce dall'aria al vetro è sempre minore dell'angolo d'incidenza, tranne il caso in cui quest'ultimo è 0°.
(2) Il comportamento del pennello riflesso è regolato dalle ordinarie leggi della riflessione speculare.
(3) La luce che passa attraverso il vetro si propaga lungo un raggio, e perciò colpisce perpendicolarmente la superficie curva del vetro; il raggio non viene rifratto da tale superficie di separazione, ma prosegue in linea retta senza piegarsi, uscendo di nuovo nell'aria.

Per ora consideriamo attentamente la prima conclusione studiando più vicino la relazione tra gli angoli di incidenza *i* e di rifrazione *r* i cui valori misurati sono riportati nella Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Relazione tra angolo d'incidenza *i* e angolo dì rifrazione *r*, nel passaggio della luce dall'aria al vetro.

Angolo di incidenza *i* (gradi)	**Angolo di rifrazione *r* (gradi)**	**Rapporto *i/r***
0	0	Indeterminato
10	6.7	1.50
20	13.3	1.50
30	19.6	1.53
40	25.2	1.59
50	30.7	1.63
60	35.1	1.71
70	38.6	1.81
80	40.6	1.97

Da essa vediamo che l'angolo *r* è sempre sicuramente più piccolo del corrispondente angolo *i*. Possiamo studiare il rapporto *i/r* per vedere se esso è costante. Come appare nell'ultima colonna della Tab.2.1, troviamo che i rapporti variano da circa 1.5 per piccoli valori di *i*, sino a un valore maggiore di 1.9 quando *i* = 80°: il rapporto non è dunque costante. Si può vedere ciò anche nella Fig. 2.6. Questa figura mostra il grafico dell'angolo *r* in funzione di *i*, costruito segnando i valori sperimentali con punti e congiungendoli con una curva continua. Possiamo servirci del grafico per trovare il valore dell'angolo di rifrazione per ogni dato angolo di incidenza.

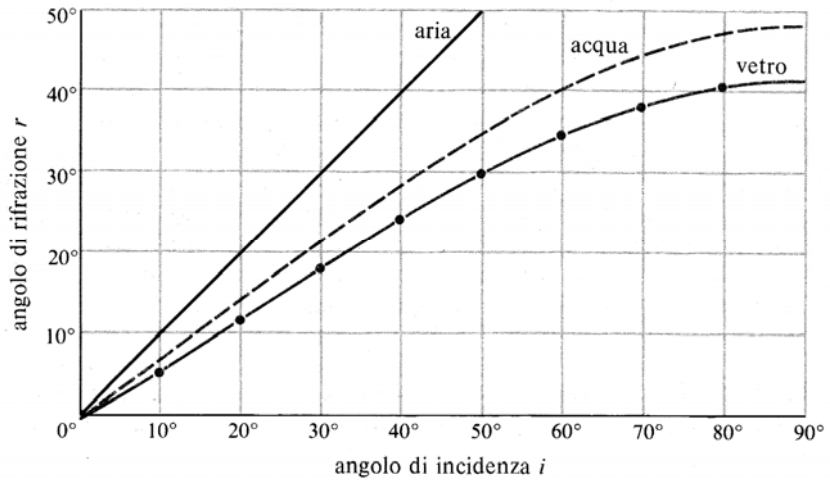

Fig. 2.6. Grafico di *r* in funzione di *i*.

Sorge ora spontanea una prima domanda: il grafico va bene per tutte le coppie di sostanze possibili, oppure esso ha valore soltanto per il passaggio della luce dall'aria al vetro? Per rispondere a tale domanda possiamo effettuare un nuovo esperimento con una diversa coppia di sostanze. La linea tratteggiata della Fig. 2.6 mostra il grafico ottenuto con una serie di misure eseguite facendo passare la luce dall'aria all'acqua. Notate che per un dato angolo di incidenza il corrispondente angolo di rifrazione è sempre maggiore nell'acqua che nel vetro. Inoltre, quando la luce passa semplicemente da aria ad aria della stessa densità, il pennello di luce non piega, e pertanto $r = i$. Tale fatto è rappresentato da una linea retta inclinata di 45°, invece che da una curva. È evidente quindi che coppie differenti di sostanze conducono a differenti grafici di r in funzione di i.

Quesiti

_____:

2.5. Qual è l'angolo d'incidenza nel disegno di Fig. C? Qual è l'angolo di rifrazione?
2.6. Confrontare la Fig. 2.4 con la fotografia in alto a destra nella Fig.2.5. In quale, la luce è piegata di più?
2.7. La Fig. D mostra il percorso della luce che penetra dall'aria nel vetro. Nel disegno, il vetro è a destra o a sinistra?
2.8. Nel tratto quasi rettilineo della curva relativa all'acqua (Fig. 2.6), qual è la relazione approssimata fra r e i?
2.9. Se si raddoppia l'angolo di incidenza quando è nell'intorno di 5°, si raddoppia anche l'angolo di rifrazione? E quando è intorno a 40°? Si guardi la Fig. 2.6.

_____

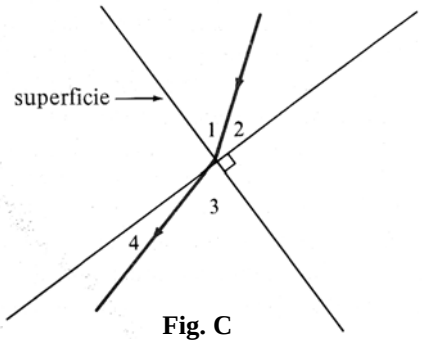

Fig. C

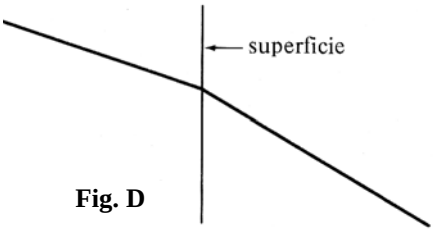

Fig. D

2.4. Indice di rifrazione. Legge di Snell

È sempre possibile effettuare una serie di esperimenti simili, adoperando molte sostanze diverse, e disegnare una intera serie di grafici del tipo indicato nella Fig. 2.6. Un libro pieno di questi grafici sarebbe molto utile per descrivere perfettamente come viene rifratta la luce da qualunque coppia di sostanze; ciò però è meno comodo di un'unica legge.

Abbiamo già provato ad usare la relazione i/r = costante, e abbiamo trovato che essa non è valida per tutti gli angoli; però, come mostra la Fig. 2.7, per piccoli angoli di incidenza la legge i/r = costante è valida e tale costante ha il valore 1.50 per il vetro, e 1.33 per l'acqua. Per angoli di incidenza più grandi questa regolarità si perde e il rapporto i/r va aumentando.

Con l'intento di trovare una rappresentazione comoda della relazione tra r ed i possiamo cercare semplici funzioni di i e di r che mantengano costante il loro rapporto per tutti gli angoli. Vorremmo cioè trovare delle funzioni che siano proporzionali agli angoli quando questi sono piccoli, e che compensino l'aumento del rapporto i/r, quando gli angoli diventano grandi. Che si possano trovare funzioni simili non è chiaro a prima vista. Infatti, dati sulla rifrazione erano conosciuti al tempo di Tolomeo e furono usati per un migliaio di anni senza che si riuscisse a formulare una legge adeguata sulla rifrazione. Finalmente nel 1621

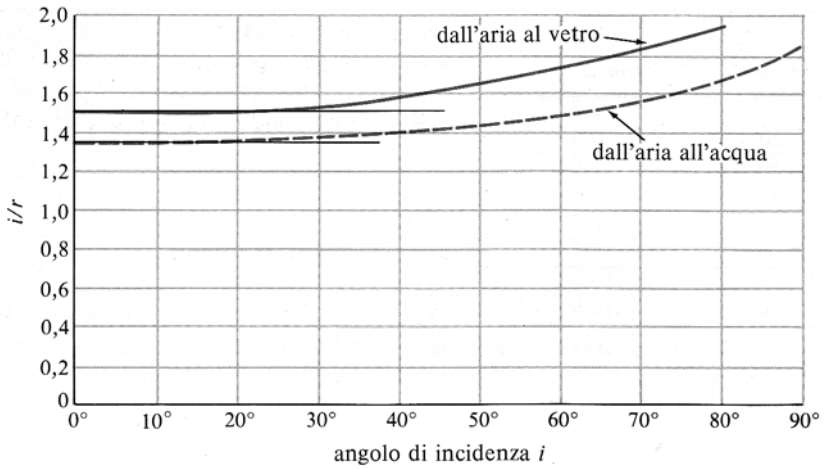

Fig. 2.7. Grafico di i/r in funzione di i.

Willebrand Snell trovò una buona e semplice via per descrivere la relazione tra *i* ed *r*. La stessa relazione venne pubblicata da Descartes nel 1638, nella forma attualmente usata.

Possiamo spiegare la scoperta di Snell e di Descartes con l'aiuto della Fig. 2.8, nella quale è rappresentato un raggio di luce, proveniente dalla parte superiore sinistra, che penetra nel vetro nel punto *P*, dove viene rifratto. Con centro in *P* si tracci una circonferenza nel piano formato dal raggio incidente e dal raggio rifratto e si tracci anche la normale in *P* alla superficie del vetro. Gli archi *AB* ed *ED* della circonferenza sono proporzionali agli angoli *i* ed *r*. Pertanto:

$$\frac{i}{r} = \frac{AB}{ED}$$

Questo è il rapporto rappresentato in Fig. 2.7, il cui valore è quasi costante per piccoli ma non per grandi angoli.

Ciò che in pratica Descartes e Snell fecero, consistette nel tentare di mettere in relazione *i* ed *r*, esaminando il rapporto delle semicorde *AC* ed *FD*. Cioè, in luogo del rapporto *AB/ED* essi calcolarono il rapporto *AC/FD* per un gran numero di angoli. Per piccoli angoli, tale rapporto eguaglia *i/r*, perché le semicorde e gli archi sono quasi eguali, ma per angoli grandi le semicorde e gli archi differiscono molto, e il rapporto delle semicorde è differente da quello degli archi. Esaminiamo questo rapporto delle semicorde ricavandolo dai dati sperimentali ottenuti per il vetro (Tab. 2.1).

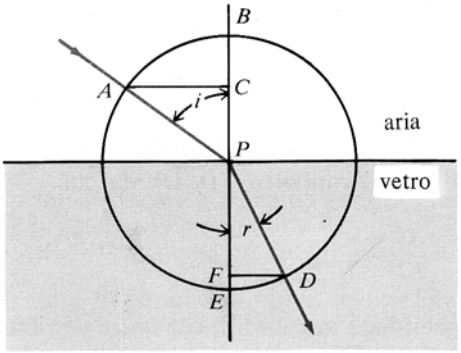

Fig. 2.8. Rappresentazione geometrica della rifrazione dalla quale fu dedotta la legge di Snell.

Possiamo calcolare *AC/FD* misurando le semicorde in una serie di disegni come quello della Fig.2.8 e usando i dati della Tab. 2.1. Le misure delle semicorde e il calcolo del loro rapporto danno i risultati della Tab. 2.2.

Tab. 2.2. Rapporto fra le semicorde per la rifrazione della luce nel vetro (si veda la Fig.2.8). La costanza del rapporto fra le semicorde (ultima colonna) illustra la legge di Snell.

Angolo di incidenza *i* (gradi)	**Semicorda *AC* (cm)**	**Angolo di rifrazione *r* (gradi)**	**Semicorda *FD* (cm)**	**Rapporto *AC/FD***
10	3.47	6.7	2.30	1.50
20	6.84	13.3	4.60	1.49
30	10.00	19.6	6.71	1.49
40	12.83	25.2	8.52	1.51
50	15.32	30.7	10.20	1.50
60	17.32	35.1	11.50	1.51
70	18.79	38.6	12.50	1.50
80	19.69	40.6	13.02	1.51

Le misure di *i*, *r*, *AC* ed *FD* non sono esatte, l'ultima cifra di ogni risultato è infatti suscettibile di errore. Ciò nonostante, i valori del rapporto *AC/FD* sono molto vicini ad un valore unico per tutti gli angoli di incidenza, per cui sembra molto verosimile che il rapporto *AC/FD* sia uguale ad una costante. Il valore di tale costante per il tipo particolare di vetro usato è chiaramente compreso tra 1.49 e 1.51 ed è probabilmente molto vicino ad 1.50. Esperimenti migliori, condotti in condizioni di minori incertezze sperimentali, confermano la conclusione in favore di una costante il cui valore è assai prossimo a 1.50.

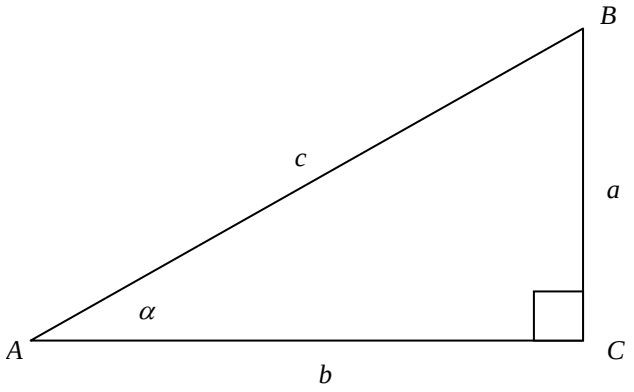

Fig. 2.9. Il seno dell'angolo α è *a/c*.

Possiamo ottenere lo stesso risultato se ci serviamo di quelle funzioni note come seni degli angoli. In un triangolo rettangolo (Fig. 2.9) definiamo seno di uno degli angoli acuti il rapporto fra il lato opposto a questo angolo e l'ipotenusa:

$$\sin\alpha = \frac{a}{c}$$

I seni di tutti gli angoli sono riportati in tavole o possono essere calcolati con una calcolatrice tascabile. Ritornando alla Fig. 2.8, vediamo che:

$$\sin i = \frac{AC}{AP} \qquad \text{e} \qquad \sin r = \frac{FD}{PD}.$$

Poiché *AP* e *PD* sono entrambi raggi della stessa circonferenza, si ha che

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{AC/AP}{FD/PD} = \frac{AC}{FD}.$$

Il rapporto dei seni degli angoli di incidenza e di rifrazione è uguale al rapporto delle semicorde. Abbiamo trovato, sperimentalmente, che questo rapporto, passando dall'aria al vetro, è:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = 1.50$$

La seconda domanda è ovvia: quando la luce passa dall'aria entro altre sostanze, il rapporto $\sin i/\sin r$ è ancora una costante indipendente dall'angolo di incidenza? Per molte sostanze la risposta sperimentale è affermativa. Per l'acqua, ad esempio, $\sin i/\sin r$ è costante, e il valore della costante è 1.33. Per altre sostanze, la costante che esprime il rapporto $\sin i/\sin r$ assume differenti valori e costituisce per ciascuna sostanza una particolare proprietà come lo sono la temperatura d'ebollizione o la temperatura di fusione. Esso può anche esser d'aiuto per l'identificazione di una sostanza. La costante è detta *indice di rifrazione* della sostanza, oppure, se si vuole essere più precisi, indice di rifrazione per il passaggio della luce dall'aria nella sostanza. Nella Tab. 2.3 sono elencati alcuni di questi indici. La legge secondo cui il rapporto $\sin i/\sin r$ è costante per tutti gli angoli d'incidenza è la legge di Snell.

Tab. 2.3. Indici di rifrazione assoluti di alcune sostanze.

Sostanza	**Indice di rifrazione**
Vetro (*)	1.5 ÷ 1.9
Diamante	2.42
Quarzo fuso	1.46
Quarzo (cristallo)	1.54
Glicerina	1.47
Bisolfuro di carbonio (**)	1.63
Acido oleico	1.46
Acqua	1.33

(*) L'indice di rifrazione del vetro dipende dalla sua composizione. La maggior parte dei vetri più comuni ha un indice di rifrazione lievemente maggiore di 1.5.

(**) Avvertenza: è altamente infiammabile.

Finora tutte le fotografie sulla rifrazione della luce riguardavano casi in cui la luce passava dall'aria al vetro, o all'acqua, ecc. Che indice di rifrazione troveremmo se la luce passasse nel vetro provenendo dal vuoto? In pratica, con la limitata precisione dei dispositivi sperimentali illustrati, non noteremmo differenza alcuna: otterremmo lo stesso valore per l'indice di rifrazione; ma misure di grande precisione rivelano di fatto un indice leggermente maggiore per la luce che passa dal vuoto al vetro rispetto a quello per la luce che passa dall'aria al vetro. Per un campione di vetro il cui indice relativo all'aria è 1.50000, l'indice relativo al vuoto è 1.50044.

L'indice di rifrazione di qualunque sostanza relativo al vuoto è detto indice assoluto di rifrazione. Il valore dell'indice della sostanza relativo all'aria è però così prossimo al valore dell'indice assoluto, che raramente occorre far distinzione tra l'uno e l'altro.

Quesiti

2.10. Facendo riferimento alla Fig. 2.8.
(*a*) Nel triangolo *ACP*, qual è il lato opposto all'angolo *i*? Quale lato è l'ipotenusa?
(*b*) Nel triangolo *PDF*, qual è il lato opposto all'angolo *r*? Quale lato è l'ipotenusa?
(*c*) Misurate i lati necessari e trovate i seni di ciascun angolo.
(*d*) Quanto vale il rapporto $\frac{\sin i}{\sin r}$?

2.11. Una lastra di vetro al piombo di forma semicircolare è stata impiegata nel dispositivo di Fig. 2.5. Ad un angolo di incidenza di 30° corrisponde un angolo di rifrazione di 17.6°. Tracciate la curva che otterreste per questo tipo di vetro, se disegnaste molti valori di *r* in funzione di *i* nel grafico di Fig.2.6.

2.12. Se la dimostrazione della «moneta galleggiante» di Fig. 1.2 venisse ripetuta usando glicerina al posto dell'acqua, la moneta apparirebbe più grande o più piccola?

2.13. (*a*) Quali sono i seni dei seguenti angoli: 4°; 30°; 45°; 60°; 73°; 17.8°; 37.3°; 90°?
(*b*) Quali sono gli angoli che hanno i seguenti seni: 0.1045; 0.0000; 0.3090; 0.8660; 1.000; 0.5000; 0.5225; 0.9636?
(*c*) Disegnare il grafico di $\sin i$ in funzione di *i* da 0° a 90°.

2.14. Nella Fig. E, qual è l'indice di rifrazione per la luce che passa dall'aria alla sostanza *X*?

2.15. Per un dato angolo d'incidenza (diverso da zero), quale sostanza elencata nella Tab. 2.3 produce la massima variazione nella direzione della luce che penetra in essa?

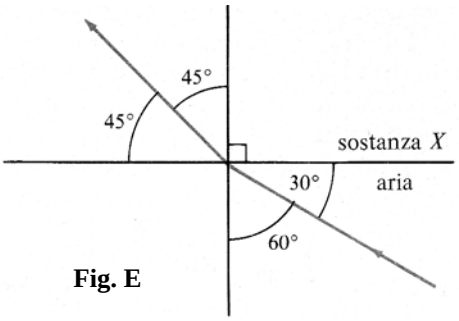

Fig. E

2.16. Come si potrebbe prevedere, in base alla Fig. 2.7, che l'indice di rifrazione dell'acqua è vicino a 1.33?

2.17. L'indice di rifrazione dell'acqua relativo all'aria a 20 °C è 1.33299. Prevedete che l'indice di rifrazione assoluto dell'acqua a questa temperatura sia leggermente superiore o leggermente inferiore a questo valore?

2.5. Passaggio della luce dal vetro (o dall'acqua) all'aria: reversibilità

Sin qui abbiamo rivolto la nostra attenzione a ciò che succede alla luce quando passa dall'aria al vetro o in qualche altra sostanza. Che cosa succede quando la luce si dirige nel verso opposto, dal vetro all'aria? Abbiamo già trovato che quando la luce raggiunge la superficie di separazione propagandosi in una direzione perpendicolare alla superficie stessa, il raggio che emerge passa di nuovo nell'aria senza piegarsi. Per scoprire che cosa accade quando la luce si avvicina alla superficie vetro-aria con angoli d'incidenza diversi, possiamo usare un blocchetto di vetro a facce parallele. Come si vede nella Fig. 2.10, un pennello di luce incidente su di una faccia del blocchetto di vetro, emerge dall'altra faccia di questo parallelamente alla direzione incidente. La rifrazione per il passaggio della luce dal vetro all'aria è pertanto esattamente inversa alla rifrazione per il passaggio dall'aria al vetro.

Tale situazione è illustrata dalla rappresentazione mediante raggi della Fig. 2.11. In essa la luce segue il verso indicato dalle frecce. Nel passaggio dall'aria al vetro, l'angolo d'incidenza è θ_{aria} e l'angolo di rifrazione è θ_{vetro}. La relazione fra i due angoli è, secondo la legge di Snell, espressa da:

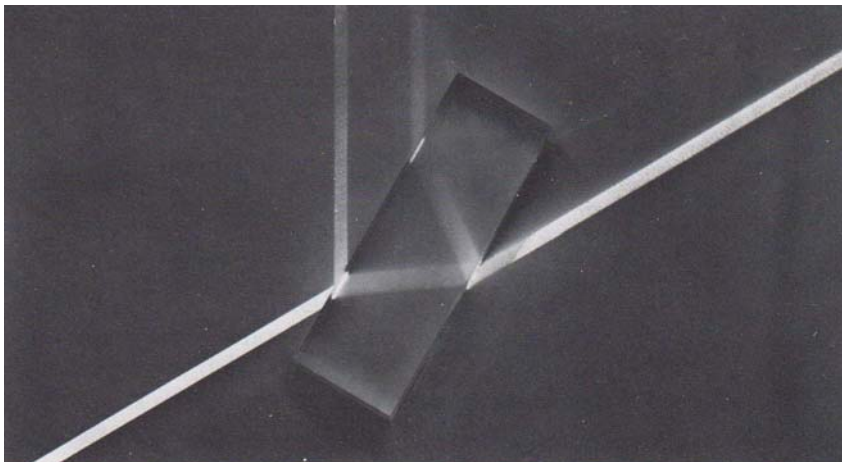

Fig. 2.10. Passaggio della luce attraverso un blocchetto di vetro a facce piane e parallele

$$\frac{\sin\theta_{\text{aria}}}{\sin\theta_{\text{vetro}}} = n_{\text{vetro}}$$

dove n_{vetro} è l'indice di rifrazione della luce nel passaggio dall'aria al vetro (molto vicino all'indice assoluto del vetro). Quando la luce, nel suo cammino dal vetro all'aria, raggiunge la seconda superficie, l'angolo d'incidenza è l'angolo θ_{vetro} perché le due superfici sono parallele. Inoltre abbiamo trovato sperimentalmente che i raggi che entrano nel vetro e quelli che ne emergono sono paralleli; e giacché le due normali sono parallele, i due angoli di incidenza e di emergenza nell'aria, sono eguali. Pertanto i raggi emergono dal vetro sotto l'angolo θ_{aria}. Possiamo perciò concludere che, per quanto concerne la rifrazione vetro-aria, gli angoli d'incidenza e di rifrazione sono legati dalla seguente relazione

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin\theta_{\text{vetro}}}{\sin\theta_{\text{aria}}} = \frac{1}{n_{\text{vetro}}}$$

Questa è ancora la legge di Snell; cioè il rapporto tra $\sin i$ e $\sin r$ è una costante e l'indice di rifrazione per la luce che passa dal vetro all'aria è esattamente uguale all'inverso dell'indice di rifrazione per la luce che si propaga nel verso opposto. Poiché un indice è l'inverso dell'altro, non occorrono due indici di rifrazione, uno dall'aria al vetro e l'altro dal vetro all'aria, ma possiamo usare l'indice di rifrazione dall'aria al vetro, ed esprimere la relazione tra gli angoli, sia nel passaggio dall'aria al vetro sia dal vetro all'aria, sotto la forma:

$$\sin\theta_{\text{aria}} = n_{\text{vetro}} \cdot \sin\theta_{\text{vetro}} .$$

In base agli esperimenti nei quali la luce passa da altre sostanze all'aria, concludiamo che la legge di Snell può applicarsi altrettanto bene sia alla luce che entra in una sostanza sia alla luce che ne emerge. È perciò comodo esprimere la legge nella forma generale:

$$\sin\theta_{\text{aria}} = n_{\text{m}} \cdot \sin\theta_{\text{m}} ,$$

dove n_{m}, è l'indice di rifrazione per la luce nel passaggio dall'aria alla sostanza *m*, e θ_{m}, è l'angolo tra la normale alla superficie di separazione e la direzione del raggio che si propaga all'interno di quella sostanza. Per esempio, nel caso di luce che passa dall'aria al diamante o dal diamante all'aria, si avrà:

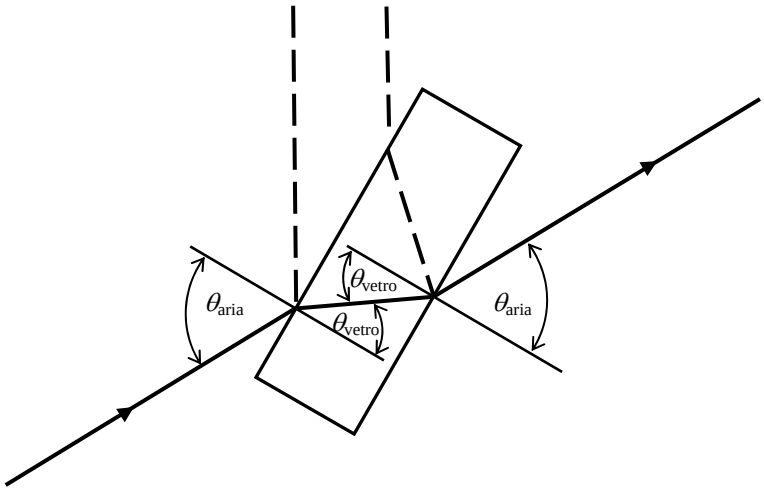

Fig. 2.11. Gli angoli e le loro relazioni reciproche nel passaggio della luce attraverso un blocchetto di vetro a facce piane e parallele.

$$\sin\theta_{\text{aria}} = n_{\text{diamante}} \cdot \sin\theta_{\text{diamante}} = 2.42 \cdot \sin\theta_{\text{diamante}} .$$

La relazione generale, $\sin\theta_{\text{aria}} = n_{\text{m}} \cdot \sin\theta_{\text{m}}$, implica che i percorsi della luce descritti dalla legge di Snell sono reversibili. Sotto questo riguardo essi si comportano esattamente come i percorsi della luce soggetti a riflessione speculare. Ci si può facilmente convincere di tale reversibilità con esperimenti come il seguente: una persona si trova sott'acqua mentre un'altra persona sta al di sopra; le due persone si stanno guardando negli occhi. Dalla forma generale della legge di Snell, il percorso dei raggi di luce che passano attraverso la superficie dell'acqua è regolato dalla relazione

$$\sin\theta_{\text{aria}} = 1.33 \cdot \sin\theta_{\text{acqua}} ,$$

senza tener conto se l'angolo d'incidenza sia θ_{aria} o θ_{acqua}; pertanto, i raggi di luce provenienti dalla persona sott'acqua e diretti all'occhio della persona fuori dell'acqua dovrebbero seguire lo stesso percorso dei raggi provenienti dalla persona fuori dell'acqua e diretti all'occhio della persona sott'acqua. Per assicurarcene procuriamoci uno schermo avente un piccolo foro in modo che attraverso di esso la persona fuori dell'acqua possa vedere solo l'occhio della persona sott'acqua (Fig. 2.12). Scopriremo allora che questa posizione dello schermo è proprio quella che permette alla persona sott'acqua di vedere l'occhio della persona fuori dell'acqua. Molti esperimenti effettuati con molte sostanze differenti confermano la reversibilità dei percorsi della luce secondo quanto prevedono la legge di Snell e le leggi della riflessione.

Quesiti

2.18. La Fig. 2.4 mostra un pennello di luce incidente dall'alto sulla superficie dell'acqua. La figura andrebbe bene anche se il pennello di luce provenisse dall'acqua e passasse nell'aria?

2.19. Fate un disegno schematico delle fotografie di Fig. 2.5 e, per mezzo di raggi muniti di frecce, mostrate come apparirebbe la figura se la luce provenisse da sotto.

2.20. Nella Fig. 2.11, se il raggio incidente venisse prolungato sarebbe parallelo al raggio emergente. Se il blocchetto venisse sostituito con un altro blocchetto avente lo stesso spessore ma indice di rifrazione maggiore, il prolungamento del raggio incidente ed il raggio emergente sarebbero più vicini o più distanti?

2.21. Il subacqueo di Fig. 2.12 potrebbe avvicinarsi al pontile tanto da poter ancora vedere gli occhi della ragazza, mentre lei non lo riesce più a vedere?

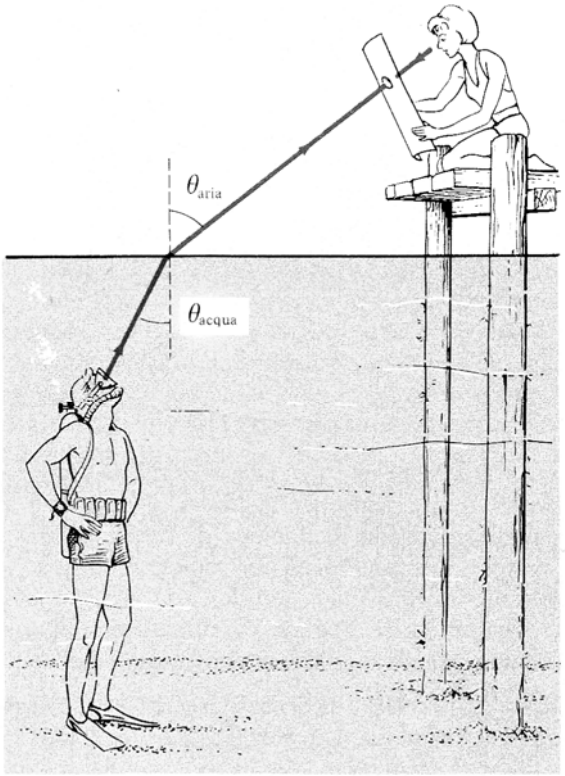

Fig. 2.12. Reversibilità dei cammini ottici.

2.6. Passaggio della luce dal vetro all'acqua

Siamo in grado ora di prevedere che cosa succede quando la luce passa dal vetro all'acqua. Supponiamo per un momento che tra due superfici parallele di vetro ed acqua vi sia uno strato di aria, come nella Fig. 2.13. Allora, quando la luce lascia il vetro, essa entra nell'aria sotto l'angolo θ_{aria} tale che:

$$\sin\theta_{\text{aria}} = n_{\text{vetro}} \cdot \sin\theta_{\text{vetro}} .$$

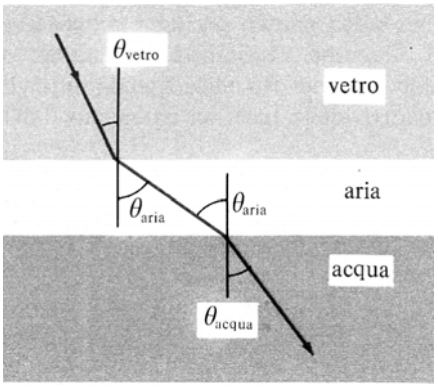

Fig. 2.13. Luce che passa dal vetro all'acqua attraversando uno strato d'aria.

Essa entra poi nell'acqua e procede sotto l'angolo θ_{acqua}, tale che:

$$\sin\theta_{\text{aria}} = n_{\text{acqua}} \cdot \sin\theta_{\text{acqua}} .$$

Perciò:

$$n_{\text{vetro}} \cdot \sin\theta_{\text{vetro}} = n_{\text{acqua}} \cdot \sin\theta_{\text{acqua}} .$$

Tale relazione lega θ_{acqua} a θ_{vetro} ed è indipendente dallo spessore di aria compreso tra vetro e acqua. Di conseguenza possiamo pensare che essa metta in relazione θ_{vetro} con θ_{acqua} nel caso particolare in cui lo spessore dello strato d'aria sia nullo, cioè quando acqua e vetro si toccano. Verificando questa relazione, trovereste che è valida anche in questo caso e che non è limitata al vetro e all'acqua. In generale, per due sostanze 1 e 2 per le quali è valida la legge di Snell, si ha:

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2 ,$$

indipendentemente dal verso del percorso della luce. La simmetria di questa forma della legge di Snell esprime la reversibilità dei percorsi della luce nel passaggio attraverso qualsiasi superficie per la quale la legge sia valida.

Può sembrare che, passando dalla forma $\sin i / \sin r = \text{costante}$ alla forma $n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$, la legge di Snell sia stata sostanzialmente modificata, ma ciò non è vero, come è possibile vedere con una rielaborazione della relazione sopra scritta. Consideriamo il passaggio della sostanza 1 alla sostanza 2: θ_1 sia l'angolo di incidenza e θ_2 l'angolo di rifrazione. La relazione generale può venire dunque espressa nella forma:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

e dice sempre che il rapporto dei seni degli angoli di incidenza e di rifrazione è costante, giacché è costante il rapporto n_2 / n_1. Questa costante è detta *indice di rifrazione relativo* delle due sostanze, o indice di rifrazione della luce nel passaggio dalla sostanza 1 alla sostanza 2. Essa viene sovente espressa nel forma n_{12} (si legge $n_{\text{uuo due}}$).

La relazione

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} ,$$

ci riporta pertanto all'enunciato fondamentale della legge.

E ancora, poiché:

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} ,$$

è possibile trovare gli indici relativi per ogni coppia di sostanze in funzione dei loro indici di rifrazione assoluti. Dai relativamente pochi indici di rifrazione assoluti, si possono calcolare quindi tutti gli indici relativi. Pei esempio, l'indice relativo della luce nel passaggio dall'acqua al vetro è:

$$n_{\text{av}} = \frac{n_{\text{v}}}{n_{\text{a}}} = \frac{1.50}{1.33} = 1.13 .$$

Quesiti

2.22. Nella Fig. F, l'indice di rifrazione relativo per il passaggio della luce dal mezzo *A* al mezzo *B* è maggiore o minore di 1?

2.23. Se l'indice di rifrazione relativo per la luce che passa dal vetro al diamante è 1.61, e l'indice di *rifrazione assoluto* del vetro è 1.50, qual è l'indice di *rifrazione assoluto* del diamante?

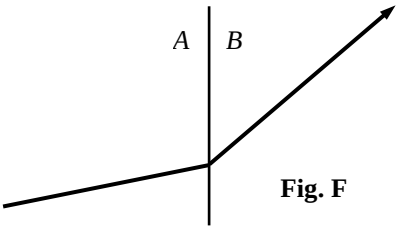

Fig. F

2.7. Riflessione totale

Se si applica la legge di Snell ciecamente a tutti i casi possibili, si incontrano subito delle difficoltà. Una di esse sorge quando si tenta di stabilire la direzione del raggio rifratto nel caso di luce che passa da un mezzo con indice di rifrazione assoluto più alto ad un mezzo con indice di rifrazione assoluto più basso. Per esempio, considerate la luce che passa dal vetro ($n = 1.50$) all'aria, con il particolare angolo di incidenza di 41.8°. Il seno di questo angolo è 0.667. Il seno dell'angolo di rifrazione è dato, per la legge di Snell, dal valore:

$$\sin\theta_{\text{aria}} = n_{\text{vetro}} \cdot \sin\theta_{\text{vetro}} ,$$

da cui

$$\sin\theta_{\text{aria}} = 1.50 \times 0.667 = 1.00 .$$

Quando $\sin\theta = 1$, $\theta = 90°$, e perciò $\theta_{\text{aria}} = 90°$. In altre parole, il raggio rifratto emerge dal vetro in una direzione parallela alla superficie; esso non fa altro che lambirla. Questo è il più grande angolo di rifrazione possibile. Che cosa succede se un fascio di luce colpisce la superficie con un angolo di incidenza maggiore di 41.8°?

Un esperimento dirà quello che realmente accade. Disponiamo le cose come è indicato nella Fig.2.14, in cui un fascio di pennelli di luce, divergenti l'uno dall'altro, penetrano in un prisma di vetro attraverso la faccia di sinistra. Dopo essere stati rifratti in corrispondenza della prima superficie, essi incontrano la superficie superiore sotto angoli diversi. Si può notare che due pennelli della parte destra del fascio non danno luogo ad alcun pennello rifratto, ma sono invece totalmente riflessi entro il vetro. Questo fenomeno è detto *riflessione totale*. Il più piccolo angolo d'incidenza per cui si verifica la riflessione totale è detto *angolo limite* (indicato con θ^*). Se si misurano gli angoli d'incidenza per gli ultimi due pennelli di destra, si trova che essi sono maggiori di 41.8°.

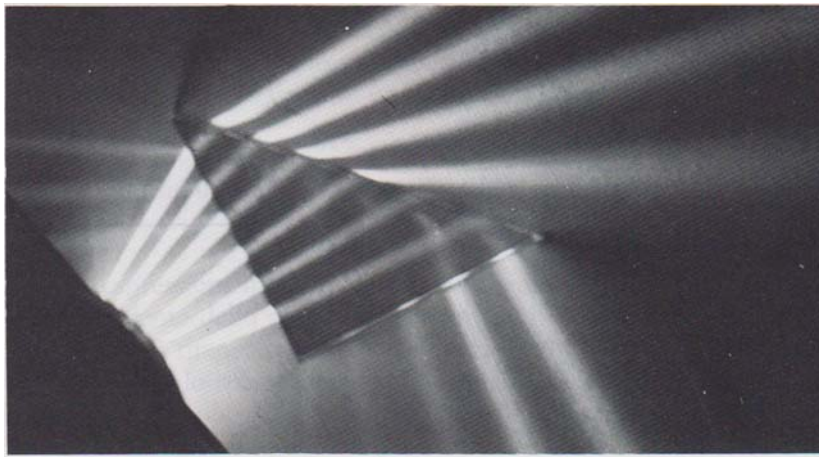

Fig. 2.14. Pennelli di luce che penetrano in un prisma di vetro dal basso a sinistra. I due pennelli incidenti nella parte più bassa subiscono la *riflessione totale* sulla superficie orizzontale vetro-aria; gli altri quattro pennelli si riflettono parzialmente su questa superficie.

In generale, nel caso di luce che passa dal mezzo 1 al mezzo 2 come nella Fig. 2.14, si ha l'angolo limite θ_1^* nel mezzo 1 quando $\theta_2 = 90°$; quindi, dalla legge di Snell

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

si ha

$$n_1 \cdot \sin\theta_1^* = n_2$$

oppure

$$\sin\theta_1^* = \frac{n_2}{n_1}.$$

È chiaro che la riflessione totale può avvenire soltanto quando n_1 è maggiore di n_2.

Può sembrare strano il fatto che la luce cessi improvvisamente di essere rifratta e sia totalmente riflessa quando viene raggiunto l'angolo limite. Non vi è, in realtà, alcun cambiamento subitaneo. Come si può vedere nella Fig. 2.14, quando l'angolo d'incidenza aumenta, maggior quantità di luce (un fascio più luminoso) viene riflessa, e minor quantità di luce (un fascio più attenuato) viene rifratta; finché avvicinandosi all'angolo limite, si arriva al punto in cui tutta la luce viene riflessa e niente ne viene trasmessa.

Talora la luce viene convogliata lungo apposite guide di luce (fibre ottiche) mediante riflessioni totali. La «guida di luce» consiste per esempio in un cilindro di sostanza trasparente. La luce entra da una estremità del cilindro presso a poco perpendicolarmente alla superficie terminale. Ogni raggio di luce, raggiungendo le pareti laterali, avrà un angolo d'incidenza maggiore dell'angolo limite, e pertanto non sfuggirà nell'aria circostante, ma subirà invece una successione di riflessioni totali che lo convoglieranno nell'interno del cilindro, finché emergerà all'altra estremità.

Un esempio interessante di riflessione totale può essere il punto di vista di un pesce che guardi all'insù attraverso la superficie di un grande lago, o stagno, con acqua tranquilla (Fig. 2.15). Il pesce vedrà gli alberi sulla riva del lago raccolti in una piccola circonferenza pendenti sopra di lui e circondati da uno specchio riflettente. Tale specchio mostrerebbe un uomo che nuota in prossimità della superficie, come se nuotasse ad una certa altezza fuori dell'acqua.

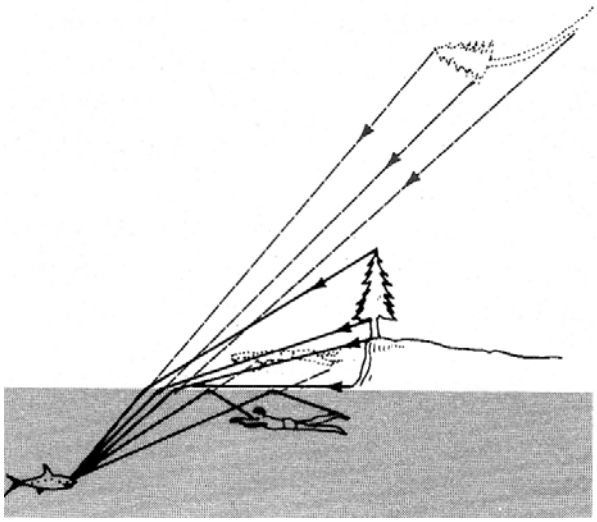

Fig. 2.15. Effetto della rifrazione e della riflessione totale sulle immagini viste da un pesce. I raggi di luce provenienti dall'albero sembrano provenire dall'immagine virtuale in alto nel cielo. Poiché questa immagine è lontana, il pesce può anche non notare che il tronco dell'albero si perde a distanza infinita: dal suo punto di vista risulta disegnato in prospettiva. Il pesce può a malapena vedere il terreno perché nell'immagine è compreso entro un angolo piccolo. (Le immagini del nuotatore e dell'albero sono state disegnate servendosi di alcuni raggi provenienti da punti diversi, quali la cima dell'albero, la sua base, e così via. In figura è disegnato un solo raggio.)

Quesiti

2.24. Qual è l'angolo limite per il passaggio della luce dal vetro all'acqua?

2.25. (*a*) Qual è approssimativamente l'intervallo di angoli secondo i quali la luce può entrare nel vetro, provenendo dall'aria?

(*b*) Qual è approssimativamente l'intervallo di angoli secondo i quali la luce può entrare nell'aria, provenendo dal vetro?

2.8. Miraggio e Fata Morgana

Generalmente gli strati dell'aria atmosferica più vicini alla terra sono anche quelli più densi e gli strati superiori sono invece meno densi.
Se però la terra è molto calda può accadere che gli strati più bassi, che sono a più diretto contatto col suolo, siano meno densi degli strati superiori. Questo avviene nelle giornate molto calde d'estate e più frequentemente nei deserti.

Consideriamo allora (Fig. 2.16) un raggio luminoso che parte dalla cima *S* di un albero propagandosi verso il suolo. Esso nel suo percorso incontra strati d'aria sempre meno rifrangenti e quindi si rifrange allontanandosi dalla normale e diventando sempre meno obliquo. Siccome la ritrazione avviene sempre da uno strato più rifrangente ad uno strato meno rifrangente l'angolo d'incidenza cresce sempre di più e ad un certo momento supererà il valore dell'angolo limite. In tali condizioni, per quanto già sappiamo, avviene il fenomeno della riflessione totale e di conseguenza il raggio si allontana dal suolo. Se il raggio riflesso totalmente incontra l'occhio di un osservatore, per l'osservatore è come se avesse avuto sempre la stessa direzione, come se fosse partito cioè da *S'* e non da *S*.

Di conseguenza l'osservatore vede in *S'* l'immagine di *S*, proprio come se l'albero si fosse riflesso in uno specchio d'acqua. In ciò consiste il fenomeno del *miraggio* nel fatto cioè che l'osservatore vede insieme sia l'oggetto che la sua immagine.

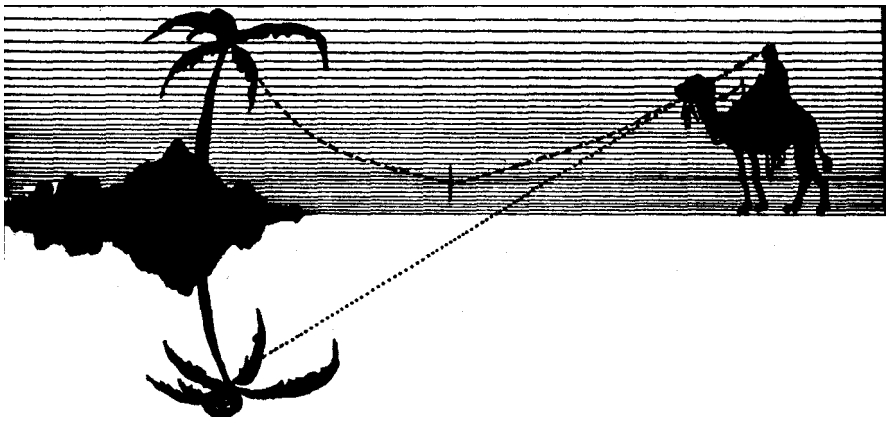

Fig. 2.16. *Miraggio*. Un raggio luminoso che proviene dalla cima di un albero, se incontra strati d'aria più caldi si allontana dalla normale finché si riflette totalmente. L'osservatore vede così sia l'albero che la sua immagine.

Viceversa se gli strati d'aria più alti sono molto meno densi di quelli più bassi, un raggio luminoso che va verso l'alto segue un percorso curvilineo allontanandosi sempre più dalla normale. Ad un certo punto avviene la riflessione totale e il raggio ritorna nuovamente verso il basso. In Fig. 2.17 viene considerato un raggio luminoso che parte da una nave. L'osservatore che intercetta il raggio vede la nave in alto capovolta, come se volasse. È questo il fenomeno della *fata morgana*.

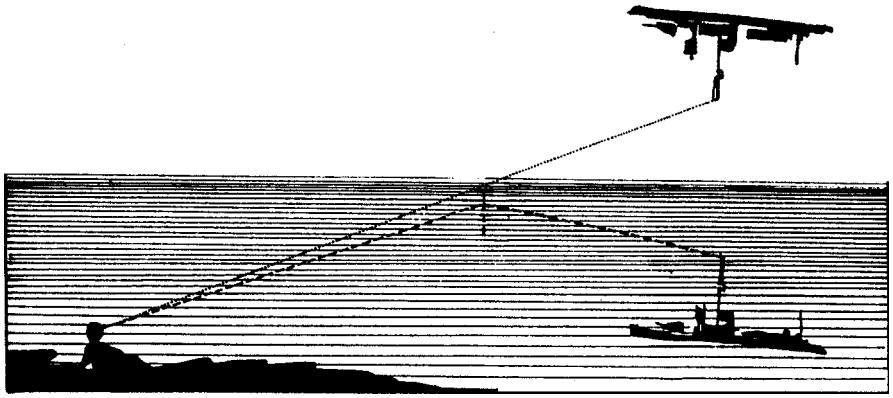

Fig. 2.17. *Fata morgana*. Un raggio luminoso che parte da una nave, se incontra strati d'aria meno densi. si rifrange allontanandosi dalla normale finché si riflette totalmente. L'osservatore che lo intercetta vede la nave in alto.

2.9. Rifrazione da parte di prismi; dispersione

Quando un fascio di raggi luminosi incide su una lastra di vetro a facce piane e parallele, i raggi emergenti sono paralleli ai raggi incidenti. Possiamo però variare la direzione di un fascio di luce con un pezzo di vetro avente due facce non parallele (Fig. 2.18). Infatti quando le due facce non sono parallele, la luce emerge in una nuova direzione.

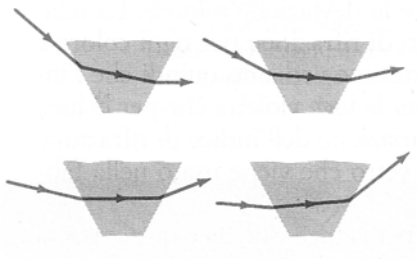

Fig. 2.18. La luce viene deviata nell'attraversare una lastra di vetro a facce piane non parallele

Un esame accurato rivela che, anche quando il fascio incidente è costituito da pennelli di luce paralleli, il fascio che emerge dal prisma è divergente (Fig. 2.19). Per esaminare questo fatto che non sembra accordarsi con le leggi della rifrazione, faremo percorrere alla luce una distanza notevole oltre la sua uscita dal prisma e poi la osserveremo. Useremo un pennello incidente piuttosto sottile in modo da ottenere una divergenza molto grande rispetto allo spessore del pennello.

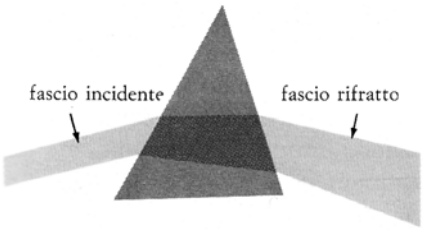

Fig. 2.19. Un fascio di luce bianca che diverge dopo avere attraversato un prisma. La divergenza è stata accentuata.

Nella Fig. 2.20(*a*) è illustrato un semplice dispositivo adatto a questo scopo. Facciamo passare attraverso una stretta apertura la luce proveniente da una lontana sorgente di luce bianca, come il Sole e una lampada a incandescenza, in modo da produrre un sottile fascio di luce; se questo fascio cade su uno schermo, si può osservare che la luce non è più «bianca», ma è formata da un brillante spettro di colori: violetto, azzurro, verde, giallo, arancio e rosso. Questi colori sono simili a quelli che si osservano nell'arcobaleno con il rosso a un estremo e il violetto all'altro estremo. Il rosso è il colore che devia meno rispetto alla direzione iniziale, il violetto quello che devia maggiormente.

La deviazione prodotta da un prisma è determinata dall'angolo formato dalle facce del prisma attraversate dalla luce, dalla direzione di incidenza sulla prima faccia e dall'indice dì rifrazione del prisma. Di questi parametri l'unico che può cambiare a seconda dei diversi colori della luce è l'indice di rifrazione e dobbiamo quindi rinunciare a una parte della semplicità che avevamo raggiunto nella sintesi dei nostri precedenti esperimenti. Dopo avere stabilito che le proprietà rifrangenti di qualsiasi sostanza possono essere determinate per mezzo di un unico numero, l'indice di rifrazione, ora scopriamo che l'indice di rifrazione dipende dal colore della luce! A quanto pare la luce bianca è costituita da differenti colori e una sostanza come il vetro ha diversi indici di rifrazione per differenti colori.

Se questa interpretazione fosse corretta, avremmo dovuto trovare un'analoga scomposizione della luce bianca nei colori dello spettro in alcuni dei nostri precedenti esperimenti sulla diffrazione. In realtà, da un attento esame del fascio rifratto, si può osservare una lieve separazione dei colori sia nell'esperimento illustrato nella Fig. 2.5 che in quello raffigurato nella Fig. 2.10.

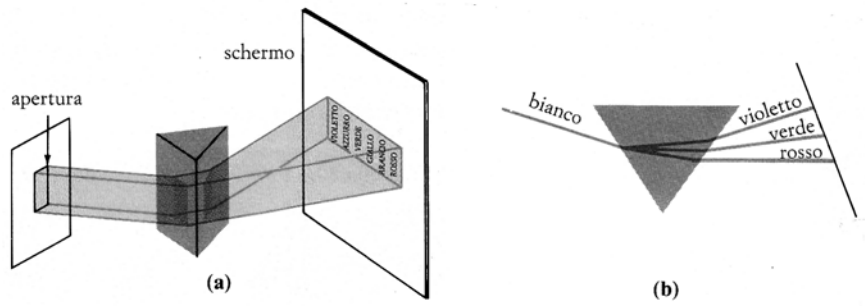

Fig. 2.20. La dispersione della luce bianca con un prisma e formazione dello spettro dei colori

Nel primo caso si deve esaminare la luce a una distanza notevole dalla lastra semicircolare di vetro, nel secondo si deve usare una lastra di vetro molto spessa; in entrambi i casi l'effetto è massimo per angoli di incidenza grandi. Ma è importante che l'effetto sia presente e sembri correlato con la natura dell'indice di rifrazione e non con qualche proprietà di un prisma. Il prisma ha semplicemente la forma appropriata per amplificare l'effetto trasformandolo in modo da renderlo facilmente visibile.

Quando un fascio di luce bianca colpisce il prisma come è indicato nella Fig. 2.20(*b*), la luce violetta è la luce che devia maggiormente, mentre la luce rossa è quella che subisce la deviazione minore. La relazione tra l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione per ogni colore è data dalla seconda legge di Snellius-Cartesio e vediamo quindi che l'indice di rifrazione del vetro è maggiore per la luce violetta che per la luce rossa. Nella Tab. 2.4 è riportata la variazione dell'indice di rifrazione con il colore per un particolare tipo di vetro che viene usato nella fabbricazione di molti tipi di lenti.

Tab. 2.4. Indice di rifrazione del vetro *crown*.

Colore:	Violetto	Azzurro	Verde	Giallo	Arancio	Rosso
Indice:	1.532	1.528	1.519	1.517	1.514	1.513

La differenza tra l'indice di rifrazione per la luce violetta e quello per la luce rossa in base alla tabella è soltanto 0.019, poco più dell'uno per cento dell'indice di rifrazione medio 1.52. Non sorprende perciò che sia stato difficile rilevare una variazione così piccola nei nostri precedenti esperimenti. In pratica, salvo che non si sia particolarmente interessati a questi effetti cromatici, si possono spesso ottenere risultati in stretto accordo con i dati sperimentali usando un unico indice di rifrazione per tutti i colori.

La scomposizione della luce in uno spettro di colori è detta *dispersione*. Questo fenomeno fu studiato per la prima volta nel XVII secolo da René Descartes (Renato Cartesio) e Isaac Newton. Newton eseguì un ulteriore esperimento tentando di scomporre una parte dello spettro inserendo un prisma nel cammino della luce di un particolare colore, per esempio della luce rossa. Tutto ciò che avviene in un esperimento come questo è che il rosso viene disperso ulteriormente in lieve misura, ma rimane rosso: a differenza della luce bianca originale, non si scompone in uno spettro di colori.

Quesiti

2.26. Perché è più facile osservare la dispersione in un prisma anziché nel dispositivo illustrato nella Fig.2.5?

2.27. Supponete che il vetro della Fig.2.5 sia vetro crown.

(*a*) Usando la Tab. 2.4, calcolate la separazione angolare della luce rossa e della luce violetta nel fascio emergente nella parte inferiore destra della Fig. 2.5.

(*b*) Qual è la distanza tra il fascio rosso e il fascio violetto se essi colpiscono uno schermo posto a una distanza di 20 cm dal centro del disco?

Problemi di fine capitolo

2.28. Se riuscite a vedere gli occhi di una persona in un sistema di specchi abbastanza complesso, quella persona può vedere i vostri occhi? Spiegate.

2.29. Quando di notte in una stanza illuminata vedete gli oggetti riflessi dai vetri spessi delle finestre, essi di solito appaiono sdoppiati. In base a questa osservazione che cosa potete dire della riflessione della luce sul vetro?

2.30. Che cosa vedete guardando un pezzo di quarzo fuso immerso in acido oleico? (Si faccia riferimento alla Tab. 2.3)

2.31. La luce che proviene dal Sole che sta tramontando giunge ai nostri occhi lungo una traiettoria curva attraverso l'atmosfera terrestre cosicché il Sole appare più alto nel cielo di quanto sia in realtà. Come spiegate questa variazione apparente? Illustrate la risposta con un disegno.

2.32. Perché si continua a vedere la Luna durante un'eclissi totale di Luna?

2.33. Se l'angolo di incidenza venisse variato nella Fig. 2.10, i due raggi corrispondenti a quelli situati alla sommità della fotografia continuerebbero a essere paralleli?

2.34. Nella Fig. 2.10 potete vedere che i due raggi riflessi sono separati all'incirca dalla stessa distanza che separa il prolungamento del raggio incidente e il raggio rifratto. (Ricordate che la distanza fra due rette parallele è la lunghezza del segmento dì perpendicolare abbassato da un punto dell'una all'altra.) È sempre così? Potete verificare la vostra risposta in laboratorio.

2.35. Un recipiente a forma di parallelepipedo, profondo 8 cm, è pieno d'acqua. Un raggio luminoso incide sulla superficie superiore dell'acqua in un punto a contatto con il lato del recipiente. Dopo la rifrazione, il raggio colpisce un punto sul fondo del recipiente a una distanza di 3 cm dallo stesso lato.

(*a*) Qual è il seno dell'angolo di rifrazione? Qual è l'angolo di rifrazione?

(*b*) Qual è il seno dell'angolo di incidenza? Qual è l'angolo di incidenza del raggio che entra nell'acqua?

(*c*) Supponete che lo stesso recipiente sia pieno di un liquido diverso dall'acqua e che il raggio dopo la rifrazione colpisca lo stesso punto a 3 cm dal lato del recipiente. Qual è l'indice di rifrazione del liquido se il raggio incidente colpisce la superficie dell'acqua con un angolo dì incidenza di 31°?

2.36. Nella Fig. G tracciate il cammino del raggio luminoso finché non esce dal vetro.

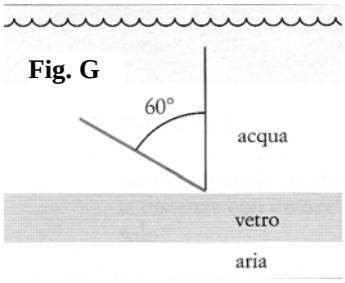

Fig. G

2.37. Il bisolfuro di carbonio, l'acqua e il cherosene possono essere sovrapposti in strati separati in questo ordine dato che non si mescolano tra loro. Un recipiente che contiene questi liquidi in strati di uguale spessore ha sul fondo una sorgente di luce che proietta un pennello luminoso verso l'alto attraverso i liquidi, con un angolo iniziale di 5° rispetto alla verticale.

(*a*) Calcolate l'angolo di rifrazione del raggio che emerge dal cherosene.

(*b*) Potrebbe un raggio luminoso propagarsi lungo lo stesso cammino, ma in verso opposto dal cherosene all'acqua al bisolfuro di carbonio?

(*c*) Supponete che il recipiente sia stato riempito soltanto di acqua. Confrontate l'angolo di rifrazione del raggio emergente con quello calcolato precedentemente.

2.38. Il colore del Sole appare variare e sembra più rosso al tramonto che a mezzogiorno. Quale conclusione si può trarre da questo fenomeno per quanto riguarda la propagazione della luce di differenti colori attraverso l'aria? Potete mettere in relazione questo fenomeno con il fatto che il cielo è azzurro

2.39. Nella Fig. H un fascio parallelo di luce *monocromatica* (di un unico colore) entra in ciascuna scatola da sinistra. Disegnate quale deve essere il contenuto di ciascuna scatola in grado di produrre gli effetti indicati. La freccia singola e la freccia doppia sul fascio emergente indicano i contorni corrispondenti del fascio entrante. Le linee senza frecce indicano gli altri contorni del fascio emergente.

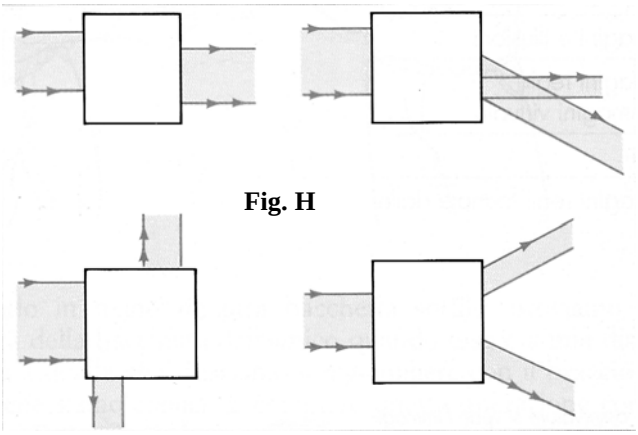
Fig. H

Tab. 2.4. Indici di rifrazione di alcuni idrocarburi saturi.

Idrocarburo	Indice di rifrazione
C_3H_8	1.2898
C_4H_{10}	1.3543
C_5H_{12}	1.3575
C_6H_{14}	1.3751
C_7H_{16}	1.3878
C_8H_{18}	1.3974

2.40. Gli indici di rifrazione di alcuni idrocarburi saturi sono indicati nella Tab. 2.4. Rappresentando graficamente il numero di atomi di carbonio in ciascuna sostanza in funzione del suo indice di rifrazione, fate un'ipotesi sugli indici di rifrazione di C_2H_6 e $C_{10}H_{22}$. Quali ipotesi avete fatto?