CAPITOLO

15

La rifrazione della luce

La cannuccia non si è spezzata: è la luce che, cambiando mezzo, ha cambiato strada.

OBIETTIVI

1. Descrivere la rifrazione, misurando gli angoli di incidenza e di rifrazione dalla normale.
2. Definire l'indice di rifrazione $n = c/v$ e usarlo per calcolare la velocità della luce in un mezzo.
3. Applicare la legge di Snell per prevedere di quanto e verso dove si piega un raggio.
4. Spiegare la profondità apparente e il comportamento di una lastra a facce parallele.
5. Calcolare l'angolo limite e riconoscere quando si ha riflessione totale; spiegare le fibre ottiche.
6. Spiegare la dispersione della luce in un prisma e la formazione dell'arcobaleno, e misurare in laboratorio l'indice di rifrazione con la sua incertezza.

INDICE DEL CAPITOLO

15.1 Che cos'è la rifrazione 2
15.2 L'indice di rifrazione 4
15.3 La legge di Snell 5
15.4 Le conseguenze della rifrazione 8
15.5 La riflessione totale 10
15.6 La dispersione della luce 13

Fisica 2 · Parte V · L'ottica geometrica · versione 1.0
Capitolo 15: La rifrazione della luce · pagine 373–396 del volume completo · estratto per lo studio

Metti una cannuccia in un bicchiere d'acqua e guardalo di lato: la cannuccia sembra spezzata proprio dove entra nell'acqua. Tirala fuori ed è dritta come prima. Guarda il fondo di una piscina dal bordo: sembra più vicino di quanto sia, e chi ci si tuffa lo sa bene. Un diamante brilla molto più di un pezzo di vetro tagliato nello stesso modo, e dopo un temporale, con il Sole alle spalle, a volte compare l'arcobaleno.

Dietro tutti questi fenomeni c'è la stessa legge. Nel capitolo 14 hai visto che cosa succede alla luce quando incontra una superficie che la rimanda indietro: la riflessione. In questo capitolo seguiamo la luce che **attraversa** la superficie di separazione fra due mezzi trasparenti, come l'aria e l'acqua o l'aria e il vetro. Scoprirai che la luce cambia direzione perché cambia velocità, imparerai a calcolare di quanto si piega con la legge di Snell, e vedrai che in certe condizioni la luce non riesce più a uscire da un mezzo: è il principio delle fibre ottiche che portano Internet nelle case.

15.1 Che cos'è la rifrazione

Punta un fascio di luce sottile, per esempio quello di un puntatore laser, sulla superficie dell'acqua contenuta in una vaschetta trasparente, in una stanza un po' in penombra. Se il fascio arriva obliquo, lo vedi entrare nell'acqua cambiando bruscamente direzione proprio sulla superficie (Figura 15.1a). Il cambiamento di direzione che un raggio luminoso subisce quando passa da un mezzo trasparente a un altro si chiama **rifrazione**.

Per descriverla usiamo gli stessi strumenti della riflessione. Nel punto in cui il raggio colpisce la superficie si traccia la normale, la retta perpendicolare alla superficie. Il raggio che arriva è il raggio incidente e forma con la normale l'angolo di incidenza θ_1; il raggio che prosegue nel secondo mezzo è il **raggio rifratto**, e l'angolo θ_2 che forma con la normale è l'**angolo di rifrazione**. Come nella riflessione, gli angoli si misurano sempre **dalla normale**, non dalla superficie.

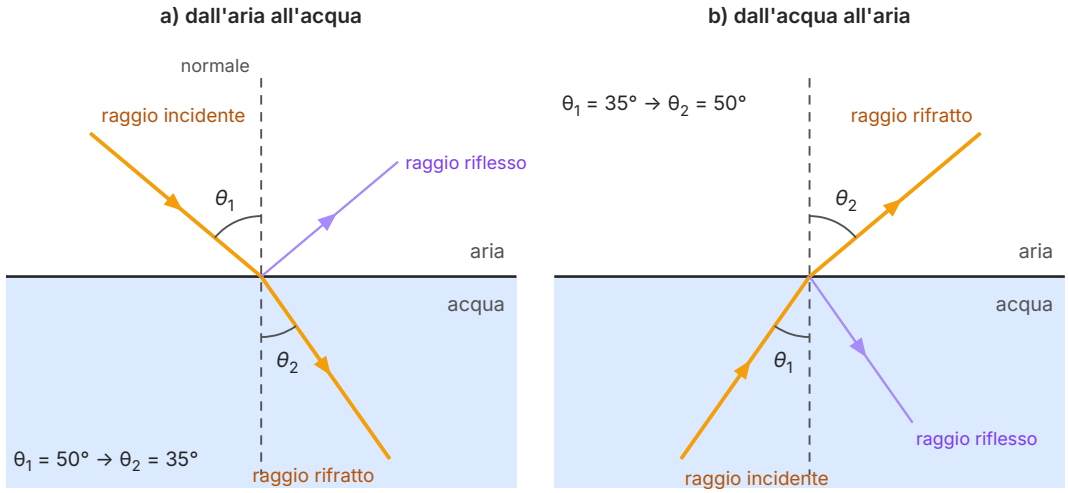


Figura 15.1 Rifrazione fra aria e acqua, con gli angoli calcolati con la legge di Snell (n = 1,33). a) Entrando nell'acqua il raggio si avvicina alla normale. b) Uscendo dall'acqua il raggio percorre la stessa strada al contrario e si allontana dalla normale. In entrambi i casi una parte della luce viene riflessa.

Le esperienze mostrano tre fatti, validi per tutti i mezzi trasparenti.

1. Il raggio incidente, la normale e il raggio rifratto stanno **nello stesso piano**, e il raggio rifratto si trova dalla parte opposta della normale rispetto al raggio incidente.
2. Un raggio che arriva **perpendicolare** alla superficie ($\theta_1 = 0°$) la attraversa senza deviare; quanto più il raggio è obliquo, tanto più è deviato.
3. Insieme alla rifrazione c'è sempre anche una **riflessione parziale**: una parte della luce torna indietro con angolo di riflessione uguale all'angolo di incidenza. Per un raggio perpendicolare a una lastra di vetro la parte riflessa da ciascuna faccia è circa il 4%; diventa molto maggiore per raggi quasi radenti. È per questo che di sera, con la stanza illuminata, la finestra ti restituisce la tua immagine.

Nella Figura 15.1 confronta le due parti. Nella parte a la luce passa dall'aria all'acqua e il raggio rifratto si **avvicina** alla normale: θ_2 è minore di θ_1. Nella parte b la luce percorre lo stesso cammino in senso opposto, dall'acqua all'aria, e si **allontana** dalla normale. Gli angoli sono gli stessi, scambiati. È un caso particolare di una proprietà generale, che nel capitolo 14 hai già visto valere per la riflessione: la **reversibilità del cammino della luce**: se si inverte il verso di un raggio, la luce ripercorre esattamente la stessa strada. Vale per la riflessione e per la rifrazione.

Ora possiamo spiegare la cannuccia. La luce che parte dalla parte immersa esce dall'acqua deviata, allontanandosi dalla normale. Il nostro occhio però non sa che la luce ha piegato: interpreta ogni raggio come se fosse arrivato in linea retta, e quindi vede la parte immersa in una posizione diversa da quella reale, più in alto. La cannuccia sembra spezzata sulla superficie, dove cambia il mezzo.

15.2 L'indice di rifrazione

Perché la luce cambia direzione? La risposta, confermata da misure dirette, è che la luce **cambia velocità** passando da un mezzo all'altro. Nel vuoto viaggia a $c = 299\,792\,458$ m/s, un valore esatto perché, come hai visto nel capitolo 14, definisce il metro; nei calcoli useremo $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s. In tutti i mezzi materiali trasparenti la luce è più lenta: nell'acqua percorre circa $2{,}26 \times 10^8$ m al secondo, nel vetro circa $2{,}0 \times 10^8$ m.

Per confrontare i mezzi si usa il rapporto fra la velocità della luce nel vuoto e quella nel mezzo. Si chiama **indice di rifrazione** n del mezzo:

$$n = \frac{c}{v} \qquad (v \text{ velocità della luce nel mezzo})$$

L'indice di rifrazione è un numero puro, senza unità di misura, perché è il rapporto fra due velocità. Poiché nei mezzi trasparenti ordinari la luce è più lenta che nel vuoto, è sempre $n \geq 1$; per il vuoto $n = 1$ esattamente. L'aria ha un indice così vicino a 1 (1,000 29) che nei problemi la tratteremo come il vuoto. Quanto più n è grande, tanto più la luce è lenta nel mezzo: si dice che il mezzo è **più rifrangente** (o, con un'espressione comune, «otticamente più denso», che però non ha niente a che fare con la densità in kg/m^3: l'olio galleggia sull'acqua ma ha un indice di rifrazione maggiore). La Tabella 15.1 raccoglie alcuni valori.

Tabella 15.1 Indici di rifrazione di alcuni mezzi per la luce gialla (589 nm), velocità della luce nel mezzo calcolata con $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s e angolo limite verso l'aria. Valori dell'appendice, con l'aggiunta di due liquidi.

Mezzo	n	v (10^8 m/s)	Angolo limite θ_L
vuoto	1 (esatto)	3,00	—
aria (0 °C, 1 atm)	1,000 29	3,00	—
ghiaccio	1,31	2,29	49,8°
acqua	1,33	2,26	48,8°
alcol etilico	1,36	2,21	47,3°
glicerina	1,47	2,04	42,9°
plexiglas	1,49	2,01	42,2°
vetro crown	circa 1,52	1,97	41,1°
diamante	2,42	1,24	24,4°

Una precisazione che ritroveremo alla fine del capitolo: l'indice di rifrazione di un mezzo dipende un poco dal colore della luce. Per questo le tabelle indicano il colore usato, di solito una

luce gialla ben precisa. Le differenze fra i colori sono piccole, nel vetro circa due centesimi su 1,5, ma bastano a scomporre la luce bianca in un arcobaleno di colori.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto rallenta la luce?

Problema. Calcola la velocità della luce nell'acqua e nel diamante, e il tempo che la luce impiega ad attraversare una lastra di vetro crown spessa 1,0 cm, perpendicolarmente.

Soluzione. Dalla definizione $n = c/v$ si ricava $v = c/n$. Nell'acqua: $v = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / 1,33 $\approx 2{,}26 \times 10^8$ m/s. Nel diamante: $v = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / 2,42 $\approx 1{,}24 \times 10^8$ m/s, meno della metà che nel vuoto.

Nel vetro $v = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / 1,52 $\approx 1{,}97 \times 10^8$ m/s. Il moto della luce nella lastra è rettilineo uniforme, quindi $t = s/v = 0{,}010$ m / $1{,}97 \times 10^8$ m/s $\approx 5{,}1 \times 10^{-11}$ s.

Controllo. Un indice maggiore di 1 deve dare una velocità minore di c: è così. Il tempo è piccolissimo, come ci si aspetta per la luce, ma è circa una volta e mezza quello che servirebbe nel vuoto per la stessa distanza.

15.3 La legge di Snell

Di quanto si piega un raggio? Se si misurano coppie di angoli θ_1 e θ_2 per un raggio che passa dall'aria all'acqua, si scopre che i due angoli non sono proporzionali: raddoppiando θ_1 non raddoppia θ_2. Sono invece proporzionali i loro **seni**, e la costante di proporzionalità è legata agli indici di rifrazione dei due mezzi. È la **legge di Snell**, detta anche legge di Snell-Cartesio:

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

Qui n_1 è l'indice del mezzo da cui la luce arriva, n_2 quello del mezzo in cui entra, e gli angoli sono misurati dalla normale. In parole: il prodotto dell'indice di rifrazione per il seno dell'angolo con la normale **ha lo stesso valore** nei due mezzi. Ricorda che il seno di un angolo acuto cresce quando l'angolo cresce: lo hai visto nel primo volume come rapporto fra cateto opposto e ipotenusa.

Da questo si legge subito il verso della deviazione. Se la luce entra in un mezzo più rifrangente ($n_2 > n_1$), perché il prodotto resti uguale sen θ_2 deve essere minore di sen θ_1: il raggio rifratto si **avvicina alla normale**. Se invece la luce passa in un mezzo meno rifrangente ($n_2 < n_1$), il raggio si **allontana dalla normale**. Se i due indici sono uguali, la luce non devia affatto: per questo una bacchetta di vetro immersa in un liquido con lo stesso indice diventa quasi invisibile.

Per trovare l'angolo di rifrazione si ricava prima il suo seno, sen $\theta_2 = n_1$ sen θ_1 / n_2, e poi l'angolo con il tasto sen^{-1} della calcolatrice, in modalità gradi, come hai fatto nel capitolo 2 con la tangente.

ESEMPIO SVOLTO

Un laser nell'acquario

Problema. Il fascio di un puntatore laser arriva sulla superficie dell'acqua di un acquario con un angolo di incidenza di 40°. a) Quale angolo forma con la normale il fascio nell'acqua? b) Sul fondo dell'acquario c'è una lastra di vetro crown: con quale angolo il fascio entra nel vetro?

Dati. $n_1 = 1{,}00$ (aria); $n_2 = 1{,}33$ (acqua); $n = 1{,}52$ (vetro); $\theta_1 = 40°$.

a) $\text{sen}\,\theta_2 = n_1\,\text{sen}\,\theta_1 / n_2 = 1{,}00 \times \text{sen}\,40° / 1{,}33 = 0{,}643 / 1{,}33 \approx 0{,}483$; $\theta_2 = \text{sen}^{-1}(0{,}483) \approx 28{,}9°$. Il raggio si è avvicinato alla normale, come deve, perché è entrato in un mezzo più rifrangente.

b) Fondo e superficie sono paralleli, quindi la normale è la stessa e il raggio arriva sul vetro con l'angolo di 28,9°. Fra acqua e vetro: $\text{sen}\,\theta = 1{,}33 \times \text{sen}\,28{,}9° / 1{,}52 \approx 0{,}423$, $\theta \approx 25{,}0°$.

Osservazione. Lo stesso risultato si ottiene saltando l'acqua: $1{,}00 \times \text{sen}\,40° = 1{,}52 \times \text{sen}\,\theta$ dà ancora $\theta \approx 25{,}0°$. Il prodotto $n\,\text{sen}\,\theta$ resta lo stesso in tutti gli strati paralleli, e l'acqua in mezzo cambia soltanto il percorso intermedio.

ERRORE FREQUENTE

«Il raggio forma 30° con la superficie dell'acqua, quindi $\theta_1 = 30°$.» No: nella legge di Snell, come nella legge della riflessione, gli angoli si misurano dalla **normale**. Se il raggio forma 30° con la superficie, forma $90° - 30° = 60°$ con la normale, e $\theta_1 = 60°$. Prima di usare la formula, disegna sempre la normale nel punto di incidenza e segna gli angoli a partire da essa.

Un secondo errore è dimenticare il seno e scrivere $n_1\theta_1 = n_2\theta_2$. Per angoli piccoli il risultato è quasi giusto, perché lì il seno è circa proporzionale all'angolo, ma già a 40° l'errore è evidente: con gli angoli al posto dei seni, l'esempio precedente darebbe 30,1° invece di 28,9°.

ESEMPIO SVOLTO

Riconoscere un liquido dai dati

Problema. Un fascio laser entra dall'aria in un liquido trasparente sconosciuto. Si misurano tre coppie di angoli, con un'incertezza di ± 0,5° su ciascun angolo:

θ_1 (°)	θ_2 (°)	sen θ_1	sen θ_2	sen θ_1 / sen θ_2
20,0	14,6	0,342	0,252	1,357
40,0	28,2	0,643	0,473	1,360
60,0	39,6	0,866	0,637	1,359

Di che liquido potrebbe trattarsi? Che cosa mostrano i dati sulla legge di Snell?

Soluzione. Il rapporto θ_1/θ_2 cambia (1,37; 1,42; 1,52): gli angoli non sono proporzionali. Il rapporto dei seni invece è costante entro le incertezze: 1,357, 1,360 e 1,359. Questo è proprio ciò che dice la legge di Snell con $n_1 = 1$: sen θ_1 / sen $\theta_2 = n_2$. La media è $n_2 \approx 1{,}36$.

Conclusione. Nella Tabella 15.1 il valore 1,36 corrisponde all'alcol etilico. Riportando sen θ_2 in funzione di sen θ_1 si otterrebbe una retta passante per l'origine con pendenza $1/1{,}36 \approx 0{,}735$: è il metodo che userai in laboratorio, dove la pendenza si ricava dal grafico di molti punti invece che da tre soli.

APPROFONDIMENTO

Da Ibn al-Haytham a Cartesio

La rifrazione era nota fin dall'antichità, ma la sua legge esatta è stata trovata tardi. All'inizio dell'XI secolo lo scienziato arabo **Ibn al-Haytham**, noto in Europa come Alhazen, scrisse un grande trattato di ottica in cui studiava la visione, la riflessione e la rifrazione con esperimenti accurati. Osservò che la deviazione cresce con l'angolo di incidenza, ma non arrivò a una legge matematica esatta.

Il matematico olandese **Willebrord Snell** trovò la relazione corretta nel 1621, ma non la pubblicò. La legge comparve a stampa nel 1637 nella *Dioptrique* di **René Descartes** (Cartesio), uno dei saggi che accompagnavano il *Discorso sul metodo*; per questo in Italia e in Francia la si chiama spesso legge di Cartesio. Cartesio la ricavò con un modello meccanico in cui la luce sarebbe stata *più veloce* nell'acqua che nell'aria: la legge era giusta, la spiegazione no. Solo a metà dell'Ottocento misure dirette mostrarono che nell'acqua la luce è più lenta, come richiede la definizione di indice di rifrazione che usiamo oggi.

15.4 Le conseguenze della rifrazione

15.4.1 La profondità apparente

Una moneta sul fondo di un bicchiere, o una piastrella sul fondo di una piscina, sembrano più vicine di quanto siano. La Figura 15.2 mostra perché. Dalla moneta partono raggi in tutte le direzioni; consideriamo due raggi vicini che, dopo essere usciti dall'acqua, entrano nell'occhio. Uscendo nell'aria si allontanano dalla normale. L'occhio prolunga all'indietro i raggi che riceve, in linea retta, e li vede provenire dal punto in cui quei prolungamenti si incontrano: un'immagine virtuale della moneta, più in alto della moneta vera.

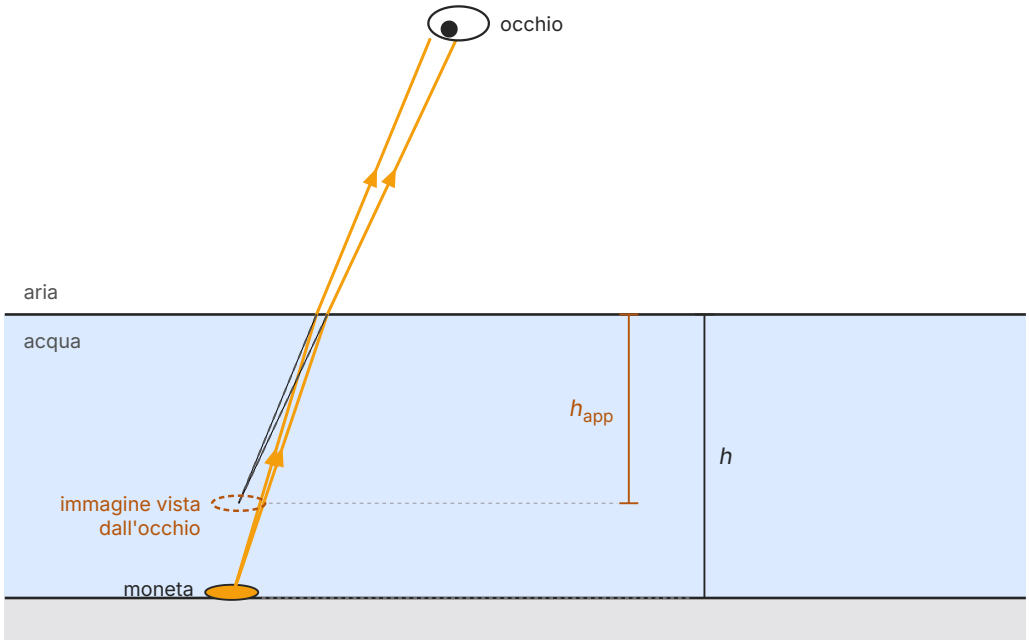


Figura 15.2 La profondità apparente. Due raggi uscenti dalla moneta (a circa 17° e 19° dalla normale nell'acqua) si rifrangono sulla superficie; i loro prolungamenti all'indietro (tratteggiati) si incontrano più in alto: l'occhio vede l'immagine della moneta alla profondità apparente h_{app}. Con lo sguardo obliquo della figura l'immagine è un po' più in alto di quanto dia la formula h/n, che vale per lo sguardo quasi perpendicolare.

La distanza dell'immagine dalla superficie si chiama **profondità apparente** h_{app}. Dipende dalla direzione da cui si guarda: quanto più lo sguardo è obliquo, tanto più il fondo sembra sollevato, ed è per questo che il fondo di una piscina sembra risalire verso il lato opposto della vasca. Per uno sguardo quasi perpendicolare alla superficie si dimostra, con la legge di Snell, un risultato molto semplice che ci limitiamo a enunciare:

$$h_{\text{app}} = \frac{h}{n}$$ (sguardo quasi perpendicolare; n indice del liquido, osservatore in aria)

Nell'acqua, con $n = 1{,}33$, la profondità apparente è circa i tre quarti di quella reale. Lo stesso fenomeno spiega perché le gambe di chi sta in piedi in acqua bassa sembrano più corte, e perché un pescatore che usa l'arpione deve mirare **più in basso** del punto in cui vede il pesce.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto è profonda la piscina?

Problema. Guardando dall'alto, quasi in verticale, il fondo di una piscina sembra a 1,50 m sotto la superficie dell'acqua. Quanto è profonda in realtà la piscina? Un bambino che non sa nuotare, vedendo questa piscina, potrebbe sbagliarsi in modo pericoloso?

Soluzione. Da $h_{\text{app}} = h/n$ si ricava $h = nh_{\text{app}} = 1{,}33 \times 1{,}50\ \text{m} \approx 2{,}00\ \text{m}$.

Commento. L'acqua è profonda mezzo metro più di quanto sembri, e guardando obliquamente dal bordo l'inganno è ancora maggiore. È uno dei motivi per cui nelle piscine la profondità è scritta sul bordo: non bisogna fidarsi dell'occhio.

15.4.2 La lastra a facce parallele

Che cosa succede alla luce che attraversa una lastra di vetro, come quella di una finestra? Il raggio si rifrange due volte: entrando, si avvicina alla normale; uscendo, si allontana (Figura 15.3). Le due facce sono parallele, quindi la normale ha la stessa direzione nei due punti, e l'angolo con cui il raggio arriva sulla seconda faccia è uguale all'angolo di rifrazione θ_2 della prima. Applicando la legge di Snell alle due facce si ottiene che il raggio esce con lo stesso angolo θ_1 con cui era entrato: il **raggio emergente** è **parallelo** al raggio incidente.

Il raggio emergente non è però sulla stessa retta di quello incidente: è spostato di lato di una distanza d che cresce con lo spessore della lastra e con l'inclinazione del raggio. Per una finestra lo spostamento è di pochi millimetri e non ce ne accorgiamo; attraverso un blocco di vetro spesso, guardato di sbieco, una scritta appare invece visibilmente spostata. Una lastra a facce parallele quindi non deforma le immagini e non cambia la direzione da cui vediamo gli oggetti lontani: per questo i vetri delle finestre ci mostrano il mondo così com'è. Per piegare davvero la luce servono superfici non parallele, come quelle di un prisma o di una lente (capitolo 16).

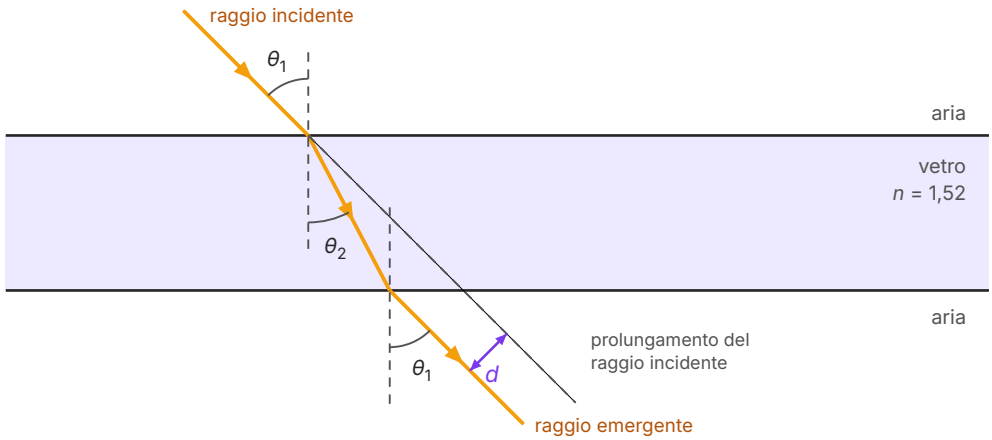


Figura 15.3 Un raggio che attraversa una lastra di vetro a facce parallele (n = 1,52), con angoli calcolati. Il raggio emergente è parallelo al raggio incidente ma spostato lateralmente della distanza d, misurata perpendicolarmente ai due raggi.

15.5 La riflessione totale

Torniamo alla luce che passa da un mezzo più rifrangente a uno meno rifrangente, per esempio dall'acqua all'aria. Il raggio rifratto si allontana dalla normale, quindi θ_2 è sempre maggiore di θ_1. Immagina di inclinare sempre di più il raggio incidente: θ_2 cresce più in fretta di θ_1 e a un certo punto raggiunge 90°. Il raggio rifratto allora esce **radente** alla superficie (Figura 15.4, raggio 2).

L'angolo di incidenza per cui l'angolo di rifrazione vale 90° si chiama **angolo limite** θ_L. Ponendo $\theta_2 = 90°$ nella legge di Snell, e ricordando che sen 90° = 1, si ottiene:

$$\text{sen}\,\theta_L = \frac{n_2}{n_1} \qquad (\text{solo se } n_1 > n_2)$$

Per l'acqua verso l'aria: sen θ_L = 1,00/1,33 ≈ 0,752, quindi $\theta_L \approx 48{,}8°$. Per il vetro crown $\theta_L \approx 41{,}1°$, per il diamante appena 24,4° (ultima colonna della Tabella 15.1).

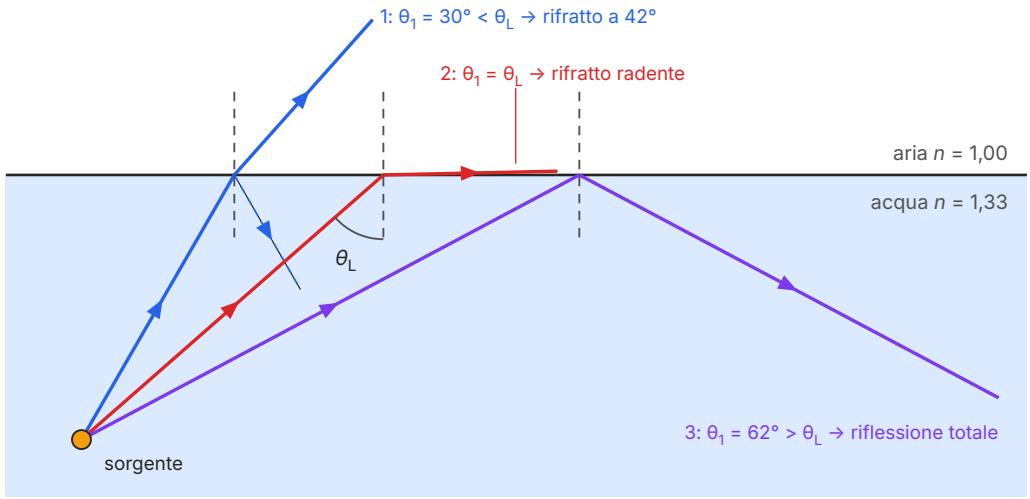


Figura 15.4 Tre raggi che partono da una sorgente sott'acqua verso la superficie. 1) Con un angolo di incidenza minore dell'angolo limite il raggio si rifrange nell'aria (in parte si riflette, tratteggio). 2) All'angolo limite, 48,8° per l'acqua, il raggio rifratto è radente. 3) Oltre l'angolo limite tutta la luce viene riflessa nell'acqua.

Che succede se l'angolo di incidenza supera θ_L? La legge di Snell chiederebbe un seno maggiore di 1, che non esiste: non c'è nessun raggio rifratto. Tutta la luce viene riflessa all'interno del primo mezzo, secondo la legge della riflessione (Figura 15.4, raggio 3). Questo fenomeno si chiama **riflessione totale**. A differenza di uno specchio metallico, che assorbe sempre una parte della luce, la riflessione totale rimanda indietro praticamente tutta la luce: è molto più efficiente di qualunque specchio metallico.

Avvicinandosi all'angolo limite, del resto, la luce riflessa cresce gradualmente e quella rifratta diminuisce: la riflessione totale è il punto d'arrivo di questo passaggio. Prova a guardare dal basso la superficie dell'acqua in un acquario: oltre una certa inclinazione la superficie appare come uno specchio argenteo, e vi si vedono riflessi i pesci.

ERRORE FREQUENTE

«Se l'angolo è abbastanza grande, la luce si riflette totalmente anche entrando nell'acqua.» No. La riflessione totale è possibile **solo** quando la luce passa da un mezzo con indice maggiore a uno con indice minore ($n_1 > n_2$). Entrando dall'aria nell'acqua il raggio si avvicina alla normale e trova sempre un angolo di rifrazione, anche per incidenza quasi radente: al massimo $\theta_2 = \theta_L = 48{,}8°$.

Un indizio utile durante i calcoli: se la calcolatrice dà errore quando premi sen^{-1}, perché il seno che hai ottenuto è maggiore di 1, non hai necessariamente sbagliato i conti. Forse il raggio ha superato l'angolo limite e c'è riflessione totale.

ESEMPIO SVOLTO

L'angolo limite e il diamante

Problema. a) Calcola l'angolo limite per il passaggio dal diamante ($n = 2{,}42$) all'aria. b) Un raggio, all'interno di una gemma, arriva su una faccetta con un angolo di incidenza di 30°: esce dalla gemma? c) Che cosa succederebbe allo stesso raggio in una gemma di vetro crown?

a) $\text{sen}\,\theta_L = n_2/n_1 = 1{,}00/2{,}42 \approx 0{,}413$; $\theta_L = \text{sen}^{-1}(0{,}413) \approx 24{,}4°$.

b) $30° > 24{,}4°$: il raggio subisce riflessione totale e resta nella gemma.

c) Nel vetro $\theta_L \approx 41{,}1°$ e 30° è minore: il raggio esce, con $\text{sen}\,\theta_2 = 1{,}52 \times \text{sen}\,30° = 0{,}760$, cioè $\theta_2 \approx 49{,}5°$.

Commento. Nel diamante, con un angolo limite così piccolo, la luce che entra dall'alto viene riflessa totalmente più volte sulle faccette inferiori e torna verso chi guarda: il taglio a brillante è progettato proprio per questo. Il vetro, con un angolo limite più grande, lascia uscire dal fondo molta più luce, e brilla meno.

15.5.1 Le fibre ottiche

Una **fibra ottica** è un filo sottilissimo di vetro o di plastica trasparente che guida la luce anche lungo un percorso curvo. È formata da un **nucleo** centrale, con indice di rifrazione maggiore, circondato da un **mantello** con indice minore, il tutto protetto da una guaina (Figura 15.5). La luce che entra in un'estremità colpisce la superficie fra nucleo e mantello con un angolo di incidenza maggiore dell'angolo limite e viene riflessa totalmente; poi colpisce la parete opposta, e così via, migliaia di volte, fino all'altra estremità. Poiché a ogni riflessione totale non si perde luce, il segnale può percorrere distanze lunghissime.

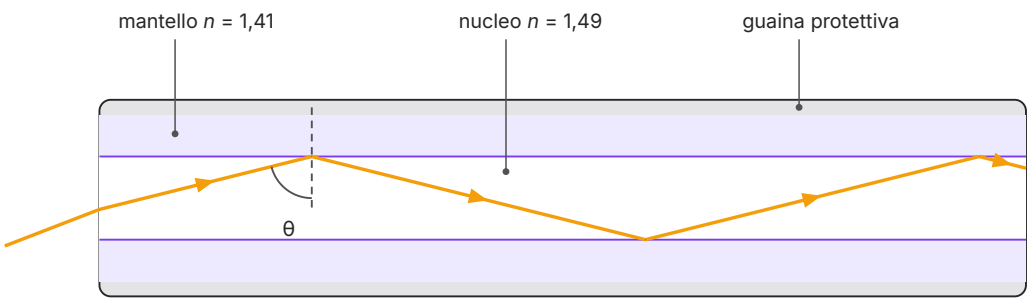


Figura 15.5 Schema di una fibra ottica di plastica, in sezione longitudinale (non in scala: un nucleo reale è molto più sottile e lungo). Con nucleo $n = 1{,}49$ e mantello $n = 1{,}41$, valori tipici, l'angolo limite è 71°: il raggio, che incide sulla superficie di separazione a 76°, viene riflesso totalmente a ogni urto.

Il mantello serve a proteggere la superficie su cui avviene la riflessione: se il nucleo fosse a contatto con l'aria, la polvere, i graffi o un dito appoggiato sulla fibra lascerebbero sfuggire la luce. Una fibra può anche essere piegata, purché la curva non sia troppo stretta: se lo fosse, alcuni raggi arriverebbero sulla parete con un angolo minore dell'angolo limite e uscirebbero dalla fibra.

COLLEGAMENTI

Fibre ottiche: dalla rete Internet alla medicina

Le telecomunicazioni sono l'uso più importante delle fibre ottiche. I dati viaggiano come impulsi di luce, emessi da un laser e accesi e spenti moltissime volte al secondo; una sola fibra di vetro, sottile come un capello, trasporta molte più informazioni di un cavo di rame. Le fibre collegano le centrali telefoniche, attraversano gli oceani sul fondo del mare e, con la «fibra fino a casa», arrivano fino al modem.

In medicina l'**endoscopio** usa un fascio di molte fibre: alcune portano la luce dentro il corpo, per esempio nello stomaco, e un fascio ordinato di fibre riporta all'esterno l'immagine, punto per punto. Il medico può così osservare un organo senza un'operazione chirurgica. Oggi molti endoscopi hanno una piccola telecamera in punta, ma l'illuminazione viaggia ancora nelle fibre.

15.5.2 Prismi, gemme e miraggi

La riflessione totale si usa anche al posto degli specchi. Nei binocoli la luce attraversa prismi di vetro e colpisce le loro facce interne con un angolo di incidenza di 45°, maggiore dell'angolo limite del vetro (circa 41°): ogni faccia funziona come uno specchio perfetto, che non si ossida e non si appanna. Due prismi così ripiegano il percorso della luce, rendendo lo strumento più corto, e raddrizzano l'immagine.

I **miraggi** sono un effetto della rifrazione graduale. In una giornata calda e senza vento, l'aria a contatto con l'asfalto è molto più calda di quella sovrastante, e l'aria calda ha un indice di rifrazione leggermente minore. La luce che scende obliquamente dal cielo verso la strada attraversa strati d'aria con indice sempre più piccolo: si allontana a poco a poco dalla normale, fino a curvare verso l'alto, come in una riflessione totale distribuita fra gli strati. Chi guida vede allora un'immagine del cielo «sulla» strada, che sembra una pozza d'acqua e che si allontana via via che ci si avvicina.

15.6 La dispersione della luce

Fai passare un fascio sottile di luce bianca, per esempio quella del Sole, attraverso un prisma di vetro. Dall'altra parte non esce un fascio bianco, ma un ventaglio di colori: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, blu e violetto, sempre in questo ordine (Figura 15.6). La scomposizione

della luce bianca nei suoi colori si chiama **dispersione**, e la striscia di colori che si ottiene è lo **spettro** della luce bianca.

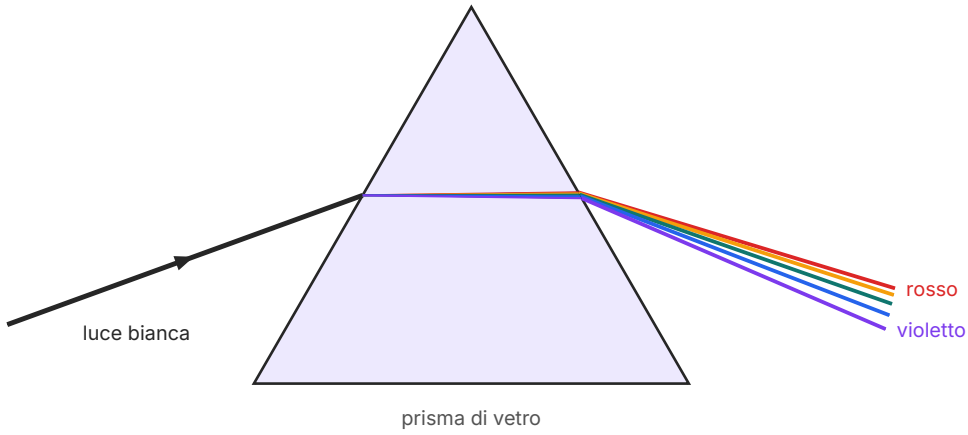


Figura 15.6 Dispersione della luce bianca in un prisma di vetro con angoli di 60°, per un raggio che incide sulla prima faccia a 50° dalla normale. I percorsi sono calcolati con la legge di Snell, ma la separazione fra i colori è ingrandita per renderla visibile: con gli indici reali di un vetro crown il rosso è deviato di circa 38,4° e il violetto di circa 40,0°. Il rosso è il colore meno deviato, il violetto il più deviato.

La spiegazione sta nella piccola dipendenza dell'indice di rifrazione dal colore che abbiamo anticipato. In un vetro crown, per esempio, l'indice vale circa 1,51 per la luce rossa e circa 1,53 per quella violetta. A ogni faccia del **prisma** i diversi colori si rifrangono quindi con angoli leggermente diversi: il violetto, che ha l'indice maggiore, è il più deviato, il rosso il meno deviato. Le due rifrazioni, entrando e uscendo, si sommano perché le facce non sono parallele, e i colori si separano. In una lastra a facce parallele, invece, la seconda rifrazione annulla la prima e i colori escono di nuovo sovrapposti: per questo una finestra non colora la luce.

Fu Isaac **Newton** a interpretare correttamente questo fenomeno, con esperimenti descritti nell'*Opticks* (1704). Prima di lui si pensava spesso che il prisma «aggiungesse» i colori alla luce bianca. Newton mostrò che un singolo colore, isolato con una fenditura e mandato in un secondo prisma, viene deviato ma non si scompone più, e che i colori ricombinati da una lente o da un prisma capovolto ridanno luce bianca. Concluse che la luce bianca è una **miscela** di colori, che il prisma si limita a separare.

L'**arcobaleno** è la dispersione prodotta da milioni di gocce di pioggia. La luce del Sole entra in una goccia rifrangendosi, si riflette sulla parete interna opposta ed esce rifrangendosi di nuovo; poiché l'indice dell'acqua dipende dal colore, ogni colore esce in una direzione leggermente diversa. Per questo l'arcobaleno si vede solo con il Sole **alle spalle** e la pioggia davanti: i colori ci arrivano dalle gocce che si trovano a circa 42° dalla direzione opposta al Sole, e perciò

l'arco è una parte di circonferenza. Il rosso sta all'esterno, il violetto all'interno. A volte si vede anche un secondo arco, più esterno e più debole, con i colori in ordine inverso, prodotto dalla luce che si riflette due volte dentro le gocce.

Il fatto che a ogni colore corrisponda una diversa velocità della luce nella materia è un indizio di qualcosa di più profondo: la luce ha anche una natura ondulatoria, che studierai negli anni successivi. In questo volume ci basta il modello dei raggi, che descrive correttamente tutti i fenomeni che abbiamo incontrato.

DA RICORDARE

Nella rifrazione il prodotto n sen θ è lo stesso nei due mezzi; nella riflessione totale il raggio resta nel mezzo da cui arriva. Le due cose si leggono in un'unica regola: **entrando in un mezzo più rifrangente il raggio si avvicina alla normale e trova sempre un angolo di rifrazione; uscendo verso un mezzo meno rifrangente si allontana dalla normale, e oltre l'angolo limite non esce più**. In tutti i casi gli angoli si misurano dalla normale.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: l'indice di rifrazione del plexiglas

Materiali. Un blocco semicircolare di plexiglas; una sorgente di luce che produca un raggio sottile (un «ray box» o un puntatore laser di classe 2 con un piccolo cilindro che allarga il fascio in un piano); un foglio con un goniometro circolare stampato (risoluzione 1°).

Procedimento. 1) Si pone il blocco sul foglio con il centro della faccia piana nel centro del goniometro e la faccia piana lungo la linea 90°–90°: la normale è la linea 0°–0°. 2) Si invia il raggio, dalla parte della faccia piana, verso il centro, con angoli di incidenza da 10° a 70°. Nel blocco il raggio procede lungo un raggio del semicerchio, quindi esce dalla faccia curva perpendicolarmente e senza deviare: l'angolo di rifrazione si legge direttamente sul goniometro. 3) Si gira il blocco e si invia il raggio dalla parte curva, sempre verso il centro: ora la luce passa dal plexiglas all'aria. Si aumenta l'angolo fino a che il raggio rifratto diventa radente e si legge l'angolo limite.

Tabella 15.2 Angoli di incidenza (aria) e di rifrazione (plexiglas) misurati; incertezza ± 1° su ogni angolo (dati tipici).

θ_1 (°)	θ_2 (°)	sen θ_1	sen θ_2
10	7	0,174	0,122
20	13	0,342	0,225
30	20	0,500	0,342
40	26	0,643	0,438
50	31	0,766	0,515
60	36	0,866	0,588
70	39	0,940	0,629

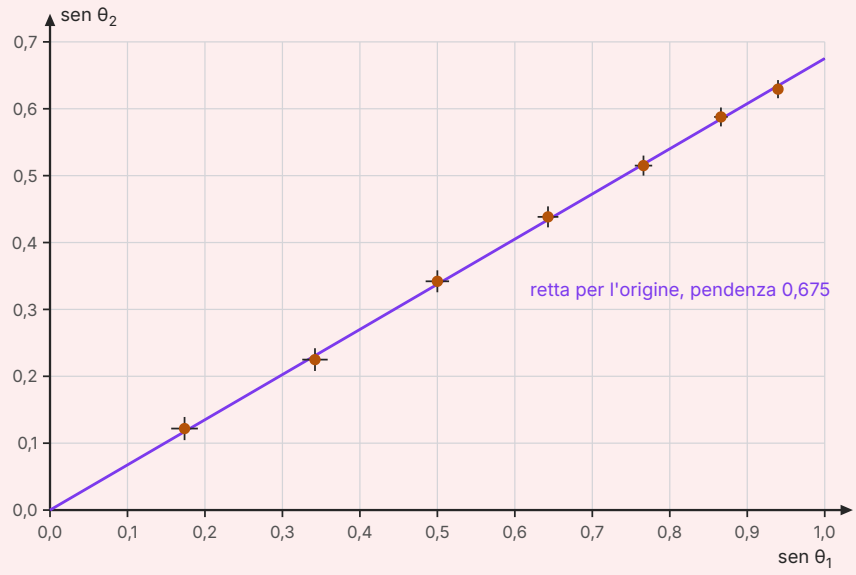


Figura 15.7 I dati della tabella nel grafico di sen θ_2 in funzione di sen θ_1, con le barre d'errore corrispondenti a ± 1°. I punti si dispongono lungo una retta per l'origine; la pendenza della retta che meglio li approssima è $1/n$.

Che cosa concludere. Nel grafico della Figura 15.7 i punti stanno su una retta passante per l'origine, come prevede la legge di Snell scritta nella forma sen $\theta_2 = (1/n)$ sen θ_1. La retta migliore ha pendenza 0,675; le rette di massima e di minima pendenza che passano per tutte le barre d'errore hanno pendenze 0,689 e 0,656. Quindi $1/n = 0{,}675 \pm 0{,}017$ e $n = 1{,}48 \pm 0{,}04$. L'angolo limite misurato è $\theta_L = (42 \pm 1)°$: da sen $\theta_L = 1/n$ si ottiene $n = 1/\text{sen } 42° \approx 1{,}49$, con un intervallo da 1,47 a 1,52 se l'angolo varia di 1°. Le due misure sono compatibili fra loro e con il valore di riferimento 1,49.

Sicurezza. Non puntare mai il laser verso gli occhi, né direttamente né dopo una riflessione sul blocco o sul tavolo: usa solo puntatori di classe 2, tieni il fascio basso, sul piano del foglio, e non chinarti all'altezza del fascio.

Per la relazione. Segui lo schema di *Fisica 1*, capitolo 5. Spiega perché la faccia curva non devia il raggio. Riporta la tabella con le incertezze e il grafico di sen θ_2 in funzione di sen θ_1; ricava la pendenza con le rette di massima e minima pendenza e da essa n con la sua incertezza. Confronta il risultato con quello ottenuto dall'angolo limite e con il valore di riferimento, discutendo la compatibilità. Discuti gli errori sistematici: il centro del blocco non perfettamente sul centro del goniometro, la larghezza del raggio, la difficoltà di stabilire quando il raggio rifratto è davvero radente (vicino all'angolo limite diventa molto debole). Spiega infine perché i punti a piccolo angolo pesano poco nella determinazione della pendenza.

IN SINTESI

Le formule della rifrazione

$n = c/v$ — indice di rifrazione: numero puro, ≥ 1; $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s nel vuoto, v velocità della luce nel mezzo (m/s). Più grande è n, più lenta è la luce.

$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$ — legge di Snell: angoli dalla normale; il raggio si avvicina alla normale se $n_2 > n_1$, si allontana se $n_2 < n_1$. L'angolo si ricava con sen^{-1} (calcolatrice in gradi).

$\text{sen } \theta_L = n_2/n_1$ — angolo limite, solo per $n_1 > n_2$: per $\theta_1 > \theta_L$ c'è riflessione totale e nessun raggio rifratto.

$h_{app} = h/n$ — profondità apparente di un oggetto immerso, vista dall'aria quasi in verticale (m).

Lastra a facce parallele: il raggio emergente è parallelo a quello incidente, spostato lateralmente. Prisma: il violetto è deviato più del rosso, perché n cresce dal rosso al violetto.

SINTESI

- La **rifrazione** è il cambiamento di direzione della luce che passa da un mezzo trasparente a un altro; raggio incidente, normale e raggio rifratto stanno nello stesso piano, e c'è sempre anche una riflessione parziale.
- Gli angoli di incidenza e di rifrazione si misurano dalla **normale** alla superficie; un raggio perpendicolare non devia.
- La luce cambia direzione perché cambia velocità. L'**indice di rifrazione** $n = c/v$ è un numero puro, ≥ 1: acqua 1,33, vetro circa 1,52, diamante 2,42.
- La **legge di Snell**, $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$, dice di quanto il raggio devia: verso la normale se entra in un mezzo più rifrangente, lontano dalla normale nel caso opposto.
- Il cammino della luce è **reversibile**: invertendo il verso di un raggio, la luce ripercorre la stessa strada.
- Un oggetto immerso appare meno profondo: guardando quasi in verticale, $h_{app} = h/n$; la cannuccia sembra spezzata per lo stesso motivo.
- Una **lastra a facce parallele** sposta lateralmente il raggio ma non ne cambia la direzione.
- Passando da un mezzo più rifrangente a uno meno rifrangente, oltre l'**angolo limite** θ_L (sen $\theta_L = n_2/n_1$) non c'è raggio rifratto: si ha **riflessione totale**. Acqua 48,8°, vetro 41,1°, diamante 24,4°.
- Sulla riflessione totale si basano le **fibre ottiche** (telecomunicazioni, endoscopi), i prismi dei binocoli e la brillantezza del diamante; i miraggi nascono dalla rifrazione graduale nell'aria calda.
- L'indice di rifrazione dipende dal colore: un prisma **disperde** la luce bianca nello spettro, con il violetto più deviato del rosso (Newton, *Opticks*, 1704).
- L'**arcobaleno** nasce da rifrazione, riflessione interna e dispersione nelle gocce di pioggia; si vede con il Sole alle spalle, a circa 42° dalla direzione opposta al Sole.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● L'indice di rifrazione di un mezzo trasparente è definito come:
   A. v/c
   B. c/v
   C. $c \cdot v$
   D. il rapporto fra angolo di incidenza e angolo di rifrazione

2. ● Nella legge di Snell gli angoli si misurano rispetto:
   A. alla normale alla superficie di separazione
   B. alla superficie di separazione
   C. al raggio riflesso
   D. all'orizzontale

3. ● Un raggio passa obliquamente dall'aria all'acqua. Il raggio rifratto:
   A. si allontana dalla normale
   B. si avvicina alla normale
   C. prosegue senza deviare
   D. viene riflesso totalmente

4. ●● Nel diamante ($n = 2{,}42$) la luce viaggia a circa:
   A. $7{,}3 \times 10^8$ m/s
   B. $3{,}0 \times 10^8$ m/s
   C. $1{,}2 \times 10^8$ m/s
   D. $2{,}4 \times 10^8$ m/s

5. ● Un raggio arriva perpendicolare alla superficie dell'acqua. L'angolo di rifrazione è:
   A. 90°
   B. 48,8°
   C. diverso per ogni liquido
   D. 0°

6. ●● La riflessione totale può avvenire quando la luce passa:
   A. dall'aria al vetro
   B. dall'acqua al vetro
   C. dal vetro all'aria
   D. dall'aria all'acqua

7. ●● L'angolo limite per il passaggio dall'acqua all'aria è circa:
   A. 48,8°
   B. 41,1°
   C. 24,4°
   D. 90°

8. ● Un fascio di luce bianca attraversa un prisma di vetro. Il colore deviato di più è:
   A. il rosso
   B. il giallo
   C. il verde
   D. il violetto

9. ●●● Un raggio passa dal vetro (n = 1,52) all'acqua (n = 1,33) con un angolo di incidenza di 70°. Il raggio:
   - **A.** si rifrange avvicinandosi alla normale
   - **B.** si rifrange allontanandosi dalla normale
   - **C.** subisce riflessione totale
   - **D.** prosegue senza deviare

Vero o falso

10. ● Quando la luce passa da un mezzo trasparente a un altro, una parte di essa viene anche riflessa. V / F

11. ● Esistono mezzi trasparenti ordinari con indice di rifrazione minore di 1. V / F

12. ●● Un raggio che passa obliquamente dall'acqua al vetro si avvicina alla normale. V / F

13. ● Entrando dall'aria nell'acqua con incidenza quasi radente, la luce subisce riflessione totale. V / F

14. ●● Il fondo di una piscina, visto dal bordo, sembra meno profondo di quanto sia. V / F

Applicare

15. ● Calcola la velocità della luce nel plexiglas (n = 1,49).

16. ● In un liquido trasparente la luce viaggia a $2{,}21 \times 10^8$ m/s. Calcola l'indice di rifrazione e, con la Tabella 15.1, riconosci il liquido.

17. ● Un raggio passa dall'aria al vetro crown (n = 1,52) con un angolo di incidenza di 30°. Calcola l'angolo di rifrazione.

18. ●● Un raggio luminoso che viaggia nell'acqua arriva sulla superficie con un angolo di 30° rispetto alla normale ed esce nell'aria. Calcola l'angolo di rifrazione.

19. ●● Un raggio di luce forma un angolo di 60° con la superficie dell'acqua (non con la normale) ed entra nell'acqua dall'aria. Calcola l'angolo di rifrazione, misurato dalla normale.

20. ● Calcola l'angolo limite per il passaggio dal ghiaccio (n = 1,31) all'aria.

21. ● Completa. L'indice di rifrazione è il rapporto fra la velocità della luce nel _____ e quella nel mezzo. Entrando in un mezzo più rifrangente, il raggio si _____ alla normale. La riflessione totale avviene solo passando da un mezzo con indice _____ a uno con indice _____ , con angolo di incidenza maggiore dell' _____ .

22. ●● Usa il grafico della Figura 15.7. Quanto vale sen θ_2 sulla retta quando sen $\theta_1 = 0{,}80$? Ricava da questa lettura l'indice di rifrazione del plexiglas.

Problemi

23. ●● Un fascio laser colpisce la superficie dell'acqua di una vasca con un angolo di incidenza di 55°. Una parte della luce si rifrange, una parte si riflette. a) Calcola l'angolo di rifrazione. b) Calcola l'angolo fra il raggio riflesso e il raggio rifratto (usa la legge della riflessione del capitolo 14).

24. ●●● Un raggio colpisce una lastra di vetro crown ($n = 1{,}52$) spessa 1,0 cm con un angolo di incidenza di 35°. a) Calcola l'angolo di rifrazione nel vetro. b) Con quale angolo il raggio esce dall'altra faccia? c) Di quanto si sposta il raggio, parallelamente alla superficie, mentre attraversa la lastra? (Usa la tangente, capitolo 2.)

25. ●● Un segnale luminoso percorre 2,0 km lungo una fibra ottica il cui nucleo ha $n = 1{,}49$. Supponi, per semplicità, che la luce viaggi lungo l'asse della fibra. a) Quanto tempo impiega? b) Quanto tempo impiegherebbe nel vuoto? c) Perché, nella fibra reale, il tempo è un po' maggiore di quello calcolato in a)? (Moto rettilineo uniforme: *Fisica 1*, capitolo 15.)

26. ●●● Una piscina è profonda 1,80 m. a) A quale profondità sembra il fondo a chi guarda quasi in verticale dall'alto? b) Sul fondo c'è un faro che emette luce in tutte le direzioni. Spiega perché la luce esce dalla superficie solo da un cerchio luminoso, e calcola il raggio del cerchio (usa la tangente). c) Qual è l'area del cerchio?

27. ●●● In una fibra di plastica il nucleo ha $n = 1{,}49$ e il mantello $n = 1{,}41$. a) Calcola l'angolo limite sulla superficie fra nucleo e mantello. b) Qual è il massimo angolo che un raggio, nel nucleo, può formare con l'asse della fibra per essere guidato? c) Il raggio entra nella fibra dall'aria attraverso la faccia d'ingresso, perpendicolare all'asse. Qual è il massimo angolo di incidenza su questa faccia?

28. ●● Un fascio laser entra dall'aria in un liquido con un angolo di incidenza di 45,0° e si rifrange a 28,8°. a) Calcola l'indice di rifrazione del liquido e, con la Tabella 15.1, riconoscilo. b) Calcola la velocità della luce nel liquido. c) Calcola l'angolo limite per il passaggio dal liquido all'aria.

29. ●●● All'interno di un oggetto trasparente un raggio arriva su una faccia con un angolo di incidenza di 30°, verso l'aria. a) Che cosa succede se l'oggetto è di vetro crown? b) E se è di diamante? c) Spiega con questi risultati perché un diamante brilla più di un vetro tagliato nello stesso modo.

Ragionare e argomentare

30. ●● Un pescatore con l'arpione vede un pesce nell'acqua bassa, davanti a sé. Deve mirare al punto in cui vede il pesce, più in alto o più in basso? Spiega con un disegno dei raggi.

31. ●●● Trova l'errore. Un compagno scrive: «Un raggio va dall'acqua all'aria con $\theta_1 = 50°$. sen $\theta_2 = 1{,}33 \times \text{sen } 50° = 1{,}02$. La calcolatrice dà errore: devo aver sbagliato i dati, quindi prendo $\theta_2 = 90°$.» Che cosa succede davvero?

32. ●● Progetta un esperimento per misurare l'indice di rifrazione dell'acqua con un puntatore laser, una vaschetta di plastica trasparente, un goniometro e un righello. Indica che cosa misuri, come ricavi n e quali precauzioni prendi.

33. ●● In una giornata calda, guidando su una strada dritta, vedi in lontananza una «pozza d'acqua» sull'asfalto che scompare quando ti avvicini. Spiega il fenomeno usando l'indice di rifrazione e la riflessione totale.

PER APPROFONDIRE

- [HEC] E. Hecht, *Optics*: i capitoli sulla propagazione della luce e sull'ottica geometrica, con la legge di Snell, la riflessione totale e le fibre ottiche trattate in modo completo.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo sulla rifrazione, ricco di esempi quotidiani (miraggi, arcobaleno, diamanti) spiegati senza calcoli.
- [QED] R. P. Feynman, *QED. La strana teoria della luce e della materia*: un libro divulgativo che, partendo dalla riflessione e dalla rifrazione, mostra che cosa c'è sotto il modello dei raggi.

Glossario del capitolo

Angolo di rifrazione
Angolo fra il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione.

Angolo limite
Angolo di incidenza θ_L per cui il raggio rifratto è radente (90°); sen $\theta_L = n_2/n_1$, con $n_1 > n_2$.

Arcobaleno
Arco colorato prodotto da rifrazione, riflessione interna e dispersione della luce solare nelle gocce di pioggia; si vede con il Sole alle spalle.

Dispersione
Scomposizione della luce bianca nei suoi colori, dovuta alla dipendenza dell'indice di rifrazione dal colore.

Fibra ottica
Filo sottile di vetro o di plastica che guida la luce per riflessioni totali successive fra nucleo e mantello.

Indice di rifrazione
Rapporto $n = c/v$ fra la velocità della luce nel vuoto e quella nel mezzo; numero puro, maggiore o uguale a 1.

Legge di Snell
Legge della rifrazione: n_1 sen $\theta_1 = n_2$ sen θ_2, con gli angoli misurati dalla normale; detta anche legge di Snell-Cartesio.

Mantello
Strato che avvolge il nucleo di una fibra ottica, con indice di rifrazione minore; protegge la superficie su cui avviene la riflessione totale.

Mezzo più rifrangente
Fra due mezzi, quello con l'indice di rifrazione maggiore, nel quale la luce è più lenta.

Miraggio
Immagine apparente, per esempio del cielo sull'asfalto, prodotta dalla rifrazione graduale della luce in strati d'aria a temperatura diversa.

Nucleo
Parte centrale di una fibra ottica, con indice di rifrazione maggiore, in cui viaggia la luce.

Prisma
Blocco trasparente con facce piane non parallele; devia la luce e la disperde nei suoi colori.

Profondità apparente
Distanza dalla superficie dell'immagine di un oggetto immerso, vista dall'esterno; per sguardo quasi perpendicolare vale h/n.

Raggio emergente
Raggio che esce da un corpo trasparente; per una lastra a facce parallele è parallelo al raggio incidente.

Raggio rifratto
Raggio che prosegue nel secondo mezzo dopo aver attraversato la superficie di separazione.

Reversibilità del cammino della luce
Proprietà per cui un raggio di verso invertito ripercorre la stessa strada, nella riflessione come nella rifrazione.

Riflessione totale
Riflessione di tutta la luce all'interno di un mezzo, quando passa verso un mezzo meno rifrangente con angolo di incidenza maggiore dell'angolo limite.

Rifrazione
Cambiamento di direzione di un raggio luminoso che passa da un mezzo trasparente a un altro, dovuto al cambiamento di velocità della luce.

Spettro
Striscia ordinata di colori, dal rosso al violetto, in cui la dispersione scompone la luce bianca.

Soluzioni

1. B. $n = c/v$, il rapporto fra la velocità della luce nel vuoto e quella nel mezzo.

2. A. Come nella riflessione, gli angoli si misurano dalla normale nel punto di incidenza.

3. B. L'acqua è più rifrangente dell'aria (1,33 > 1,00), quindi sen θ_2 < sen θ_1.

4. C. $v = c/n = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / 2,42 ≈ $1{,}24 \times 10^8$ m/s.

5. D. Con $\theta_1 = 0°$ la legge di Snell dà sen $\theta_2 = 0$: il raggio non devia.

6. C. Solo passando da un mezzo più rifrangente a uno meno rifrangente: il vetro (1,52) verso l'aria (1,00).

7. A. sen $\theta_L = 1{,}00/1{,}33 \approx 0{,}752$, $\theta_L \approx 48{,}8°$.

8. D. Il vetro ha l'indice maggiore per il violetto, che quindi è il più deviato.

9. C. Vetro → acqua: sen $\theta_L = 1{,}33/1{,}52 \approx 0{,}875$, $\theta_L \approx 61{,}0°$. Poiché 70° > 61,0°, c'è riflessione totale (infatti 1,52 × sen 70°/1,33 ≈ 1,07 > 1).

10. V. Insieme alla rifrazione c'è sempre una riflessione parziale.

11. F. In tutti i mezzi trasparenti ordinari la luce è più lenta che nel vuoto, quindi $n = c/v \geq 1$.

12. V. Il vetro (1,52) è più rifrangente dell'acqua (1,33).

13. F. La riflessione totale richiede $n_1 > n_2$; dall'aria all'acqua c'è sempre un raggio rifratto, con θ_2 al massimo 48,8°.

14. V. È la profondità apparente: la luce uscendo dall'acqua si allontana dalla normale e l'occhio vede l'immagine più in alto.

15. $v = c/n = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / 1,49 ≈ $2{,}01 \times 10^8$ m/s.

16. $n = c/v = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / $2{,}21 \times 10^8$ m/s ≈ 1,36: alcol etilico.

17. sen $\theta_2 = 1{,}00 \times$ sen 30° / 1,52 = 0,500/1,52 ≈ 0,329; $\theta_2 \approx 19{,}2°$.

18. sen $\theta_2 = 1{,}33 \times$ sen 30° / 1,00 ≈ 0,665; $\theta_2 \approx 41{,}7°$: il raggio si allontana dalla normale. Poiché 30° è minore dell'angolo limite (48,8°), il raggio esce.

19. L'angolo con la normale è $\theta_1 = 90° - 60° = 30°$. sen θ_2 = sen 30° / 1,33 ≈ 0,376; $\theta_2 \approx 22{,}1°$.

20. sen $\theta_L = 1{,}00/1{,}31 \approx 0{,}763$; $\theta_L \approx 49{,}8°$.

21. vuoto; avvicina; maggiore; minore; angolo limite.

22. Sulla retta, per sen $\theta_1 = 0{,}80$ si legge sen $\theta_2 \approx 0{,}54$. Con $n_1 = 1$: n = sen θ_1/sen $\theta_2 \approx 0{,}80/0{,}54 \approx 1{,}48$, in accordo con la pendenza 0,675 della retta (1/0,675 ≈ 1,48).

23. a) sen θ_2 = sen 55° / 1,33 ≈ 0,616; $\theta_2 \approx 38{,}0°$. b) Il raggio riflesso forma 55° con la normale, dalla parte dell'aria; il rifratto forma 38,0° con la normale, dalla parte dell'acqua. Entrambi i raggi vanno dalla stessa parte della normale. Misurando dalla normale rivolta verso l'aria, il riflesso sta a 55° e il rifratto a 180° − 38,0° = 142,0°: l'angolo fra i due è 142,0° − 55° = 87,0°, cioè circa 87°.

24. a) sen θ_2 = sen 35° / 1,52 ≈ 0,377; $\theta_2 \approx 22{,}2°$. b) Sulla seconda faccia l'angolo di incidenza è 22,2° e 1,52 × sen 22,2° = sen 35°: il raggio esce a 35°, parallelo a quello incidente. c) Spostamento lungo la superficie = spessore × tan θ_2 = 1,0 cm × tan 22,2° ≈ 0,41 cm (senza la lastra sarebbe stato 1,0 cm × tan 35° ≈ 0,70 cm).

25. a) $v = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / 1,49 ≈ $2{,}01 \times 10^8$ m/s; $t = s/v$ = $2{,}0 \times 10^3$ m / $2{,}01 \times 10^8$ m/s ≈ $9{,}9 \times 10^{-6}$ s, circa 10 μs. b) $t = 2{,}0 \times 10^3$ m / $3{,}00 \times 10^8$ m/s ≈ $6{,}7 \times 10^{-6}$ s. c) I raggi non viaggiano lungo l'asse ma a zig-zag, riflettendosi sulle pareti: il percorso è più lungo di 2,0 km.

26. a) $h_{app} = h/n = 1{,}80$ m / 1,33 ≈ 1,35 m. b) I raggi che arrivano sulla superficie con incidenza maggiore dell'angolo limite (48,8°) sono riflessi totalmente; escono solo quelli che arrivano entro un cerchio di

raggio $r = h \tan \theta_L = 1{,}80\ \text{m} \times \tan 48{,}8° \approx 2{,}05\ \text{m}$. c) $A = \pi r^2 \approx 3{,}14 \times (2{,}05\ \text{m})^2 \approx 13{,}2\ \text{m}^2$.

27. a) $\text{sen}\ \theta_L = 1{,}41/1{,}49 \approx 0{,}946$; $\theta_L \approx 71{,}1°$. b) L'angolo con l'asse è il complementare dell'angolo di incidenza sulla parete: per avere almeno 71,1° sulla parete il raggio deve formare con l'asse al massimo $90° - 71{,}1° \approx 18{,}9°$. c) Sulla faccia d'ingresso la normale è l'asse: $1{,}00 \times \text{sen}\ \theta = 1{,}49 \times \text{sen}\ 18{,}9° \approx 0{,}482$, quindi $\theta \approx 28{,}8°$. I raggi che entrano con un'inclinazione maggiore escono dalla parete della fibra.

28. a) $n = \text{sen}\ 45{,}0° / \text{sen}\ 28{,}8° \approx 0{,}707/0{,}482 \approx 1{,}47$: glicerina. b) $v = c/n = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s} / 1{,}47 \approx 2{,}04 \times 10^8\ \text{m/s}$. c) $\text{sen}\ \theta_L = 1/1{,}47 \approx 0{,}680$; $\theta_L \approx 42{,}9°$.

29. a) Vetro: $\theta_L \approx 41{,}1° > 30°$, il raggio esce; $\text{sen}\ \theta_2 = 1{,}52 \times \text{sen}\ 30° = 0{,}760$, $\theta_2 \approx 49{,}5°$. b) Diamante: $\theta_L \approx 24{,}4° < 30°$, riflessione totale: il raggio resta nella gemma. c) Con un angolo limite piccolo, la maggior parte dei raggi che arrivano sulle faccette inferiori viene riflessa totalmente e torna verso l'alto, verso l'osservatore; nel vetro molti raggi escono dal fondo e vanno persi. In più il diamante disperde molto i colori.

30. Traccia di risposta. La luce che dal pesce arriva all'occhio si allontana dalla normale uscendo dall'acqua; l'occhio la prolunga in linea retta e vede il pesce in un'immagine più in alto (e più vicina) di quella vera (profondità apparente). L'arpione viaggia invece in linea retta: bisogna mirare più in basso del punto in cui si vede il pesce.

31. Il calcolo è giusto: un seno maggiore di 1 significa che non esiste un raggio rifratto. Poiché 50° supera l'angolo limite dell'acqua (48,8°), il raggio subisce riflessione totale e torna nell'acqua con un angolo di riflessione di 50°. Porre $\theta_2 = 90°$ è sbagliato: quel caso corrisponde esattamente all'angolo limite.

32. Traccia di risposta. Si riempie la vaschetta, si fa entrare il fascio dalla superficie libera con diversi angoli di incidenza misurati dalla normale (un'asta verticale aiuta), e si individua il punto in cui il fascio colpisce il fondo; dalla profondità e dalla distanza orizzontale, con la tangente, si ricava θ_2 (oppure si legge θ_2 con un goniometro sulla parete). Per ogni coppia si calcola $\text{sen}\ \theta_1/\text{sen}\ \theta_2$, o si fa il grafico di $\text{sen}\ \theta_2$ in funzione di $\text{sen}\ \theta_1$: la pendenza è $1/n$. Precauzioni: laser di classe 2, mai verso gli occhi né verso riflessi; la parete sottile della vaschetta non devia il fascio in modo apprezzabile (lastra a facce parallele); qualche goccia di latte nell'acqua rende visibile il fascio.

33. Traccia di risposta. L'aria vicina all'asfalto caldo è più calda e ha un indice di rifrazione un po' minore di quella sovrastante. La luce che scende obliquamente dal cielo attraversa strati con indice decrescente e si allontana sempre più dalla normale, finché curva verso l'alto, come per una riflessione totale. Arriva all'occhio dal basso, e l'occhio vede un'immagine del cielo sulla strada, che sembra acqua. Avvicinandosi, lo sguardo verso la strada diventa meno radente e la condizione non è più soddisfatta: il «miraggio» scompare.