

1. COME SI COMPORTA LA LUCE

Nella nostra esistenza la luce gioca un ruolo fondamentale: la luce che viene dal Sole ci scalda e consente alle piante di trasformare l'anidride carbonica e l'acqua in materiale organico ed ossigeno; inoltre la maggior parte delle informazioni che riceviamo, ci raggiunge attraverso la vista. Sin dagli albori della storia gli esseri umani hanno tentato di scoprire la natura della luce che colpisce i nostri occhi: gli interrogativi che essi si ponevano erano probabilmente gli stessi che si presentano a voi oggi. Che cosa è la luce? Come e con quale velocità essa si propaga? Dobbiamo sempre credere a quel che vediamo? Perché alcuni oggetti sono colorati, altri bianchi, ed altri ancora neri? Andando a studiare il comportamento della luce cercheremo di dare risposte dirette o indirette a tali domande. Cominceremo con alcune osservazioni qualitative e poi cercheremo di ricavare le leggi quantitative, in condizioni controllate. Tutto ciò sarà fatto prevalentemente in laboratorio.

1.1. Sorgenti luminose

Chiunque si sia trovato in una notte senza Luna in campagna, in una foresta o al mare, sa quanto può essere veramente buio quando il Sole è dall'altra parte della Terra. Al primo albeggiare, oggetti che pochi minuti prima non si potevano scorgere cominciano a prendere forma, i particolari si fanno via via più nitidi, i colori compaiono e diventano brillanti, e finalmente appare la luce del giorno. È il Sole, che vediamo sorgere ad oriente, la sorgente di luce a cui dobbiamo le forme, i particolari ed i colori del nostro mondo. Il Sole, le stelle, le lampade, anche le lucciole, emettono luce e vengono pertanto detti corpi luminosi (dal latino *lumen* = luce). Tutti gli altri oggetti – per esempio gli alberi, l'erba, le pagine di un libro – sono corpi non luminosi, e sono visibili soltanto se ricevono luce da qualche sorgente luminosa e la riflettono ai nostri occhi. Lo stato di luminosità o non luminosità di un corpo dipende sia dalle condizioni in cui si trova sia dalla sostanza di cui è fatto. Molte sostanze comuni possono essere rese luminose o non luminose a volontà. Il filo sottile nell'interno delle lampadine elettriche, ossia il filamento, non è di per sé luminoso, ma lo diventa se è attraversato da una corrente elettrica. Se prendiamo un pezzo di ferro freddo possiamo farlo brillare di luce rossa, gialla o bianca ponendolo su un braciere di carboni ardenti o su una fiamma a gas. I solidi, e certi liquidi particolari quali i metalli fusi, quando vengono riscaldati sino a temperature oltre gli 800 °C, diventano sorgenti di luce e vengono chiamati corpi incandescenti. Se esaminiamo attentamente la fiamma di una candela, troviamo che la sua luce è dovuta alle numerose particelle roventi di carbone riscaldate dai gas di combustione prodotti dalla candela; pertanto anche la fiamma costituisce un'altra sorgente di luce dovuta a corpi incandescenti. In una comune fiamma molte di tali particelle non bruciano completamente, e mentre vengono trasportate in alto dall'aria si raffreddano, diventano oscure, e formano la parte principale del fumo che si innalza dalla fiamma.

Non tutte le sorgenti di luce sono costituite da corpi incandescenti. Ad esempio, i tubi al neon e le lampade fluorescenti emettono luce brillante, come le comuni lampadine elettriche, solo se una corrente elettrica li attraversa; ma se tocchiamo ciascuna di queste sorgenti di luce, ci convinciamo subito che deve esserci qualche diversità nel modo con cui la luce è prodotta. I tubi al neon e le lampade fluorescenti rimangono infatti completamente freddi mentre una comune lampadina elettrica diventa subito troppo calda per poter essere toccata. Continuando a studiare più a fondo in cosa consista la differenza, troviamo che, se aumentiamo in modo graduale la corrente che passa nel filamento di una lampadina elettrica, possiamo aumentare la luminosità, ma notiamo anche una concomitante variazione di colore. Dapprima si vede un rosso opaco, che si trasforma poi in giallo brillante e può diventare, se la corrente è sufficiente, il colore che corrisponde al «calor bianco», come nel caso del pezzo di ferro arroventato. Se invece aumentiamo la corrente che attraversa un tubo al neon, troviamo che all'aumento della luminosità non corrisponde alcuna variazione di colore. Abbiamo così scoperto una differenza fondamentale tra le sorgenti di luce dovuta a corpi incandescenti, e le altre sorgenti luminose. Nelle prime, le variazioni di luminosità, di temperatura e di colore sembrano intimamente collegate tra loro, mentre nelle seconde il colore della sorgente dipende principalmente dalla natura della sostanza, e non varia con la luminosità. Una grande quantità di luce perviene all'occhio da superfici non luminose. Per convincerci di ciò, dobbiamo soltanto immaginare come apparirebbe una comune stanza se i suoi muri e le altre superfici fossero ricoperte con una tinta così nera da non riflettere alcuna luce: ogni sorgente luminosa apparirebbe come un vivido bagliore contro uno sfondo nero. I soffitti bianchi e le pareti chiare riflettono e diffondono molta parte della luce che ricevono e aumentano in tal modo la luminosità nell'interno delle stanze. Infatti, quando viene usata l'illuminazione indiretta, le lampade vengono nascoste alla vista e la luce giunge a noi diffusa dai muri e dal soffitto. In una

scala più grande, la Luna – che potrebbe esser creduta sorgente di luce notturna – è un mezzo di illuminazione indiretta, perché essa riflette la luce del Sole.

Quesiti

1.1. Quali di questi oggetti sono luminosi (in condizioni normali di funzionamento)?

(a) Macchina fotografica. (b) Lucciola. (c) Lampada per flash. (d) Specchio.
(e) Parte cromata di un'automobile. (f) Elemento riscaldatore di un fornello elettrico. (g) Diamante.

1.2. Come si può capire se un oggetto è luminoso oppure no?

1.3. Qual è la differenza fra sostanze luminose e sostanze incandescenti? Date un esempio di ognuno dei due tipi.

1.2. Sostanze trasparenti, colorate e opache

Quando dall'interno di una stanza osserviamo, attraverso il vetro pulito di una finestra, una scena esterna vivamente illuminata, ci accorgiamo a mala pena del fatto che vi è un vetro tra noi e la scena. Le sostanze che trasmettono la luce in tal modo si dicono trasparenti. Più tardi, all'imbrunire, guardiamo attraverso lo stesso vetro, dall'interno della stanza illuminata: vedremo allora, oltre alla scena esterna, anche il riflesso nostro e della stanza sul vetro. La luce, grazie alla quale noi vediamo la nostra immagine, ha certamente avuto origine dall'interno della stanza, ma invece di passare all'esterno attraverso il vetro, è ritornata a noi; essa si è riflessa. Ha influenza lo spessore di un corpo trasparente sulla quantità di luce che esso trasmette? Una singola lastra di vetro sembra trasmettere la luce quasi perfettamente, ma se formate uno spessore con dieci o venti lastre di vetro trasparente, una certa quantità di luce viene assorbita mentre quella che passa risulta attenuata e appare inoltre in qualche modo colorata. Evidentemente le sostanze trasparenti come i fogli di plastica, il vetro e l'acqua sono visibili sia perché riflettono oltre che trasmettere la luce, sia perché assorbono una certa quantità di luce. Tali sostanze producono un altro effetto importante sulla luce: quando questa vi penetra o ne esce cambia la direzione del suo cammino in modo interessante. In Fig. 1.1 l'apparente piegarsi dell'asta nel punto in cui essa penetra nell'acqua indica che qualche cosa succede alla luce che dall'asta immersa va alla macchina fotografica. Un altro esempio del medesimo effetto è dato dalla Fig. 1.2. La moneta di destra si trova in un recipiente vuoto, mentre la moneta di sinistra, identica alla prima, si trova in un recipiente pieno d'acqua. Le due monete sono state fotografate simultaneamente con l'apparecchio mostrato nella Fig. 1.3. La moneta immersa nell'acqua appare più vicina all'apparecchio fotografico, e più grande dell'altra. Questo effetto di «galleggiamento» della moneta e l'illusione dell'asta «piegata» si verificano perché la luce cambia direzione quando passa da una sostanza, come vetro o acqua, in un'altra sostanza, come l'aria. Questo piegarsi del percorso della luce si chiama rifrazione. Lo studio particolareggiato della rifrazione contribuisce in grande misura a farci comprendere che cosa sia la luce. Ritorneremo su tale argomento più volte.

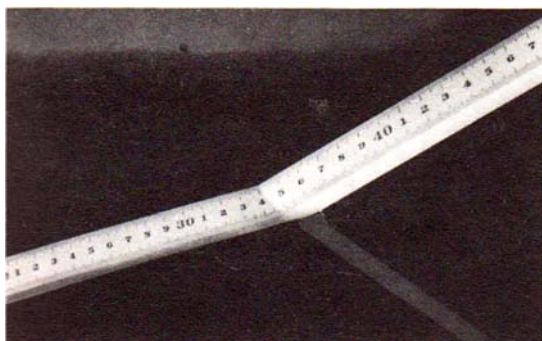


Fig. 1.1. La fotografia mostra un metro rigido apparentemente piegato nel punto in cui si immerge nell'acqua. L'immagine grigia che si diparte, inclinata verso il basso da tale punto, è una riflessione.



Fig. 1.2. Moneta «galleggiante». Si veda la Fig. 1.3.

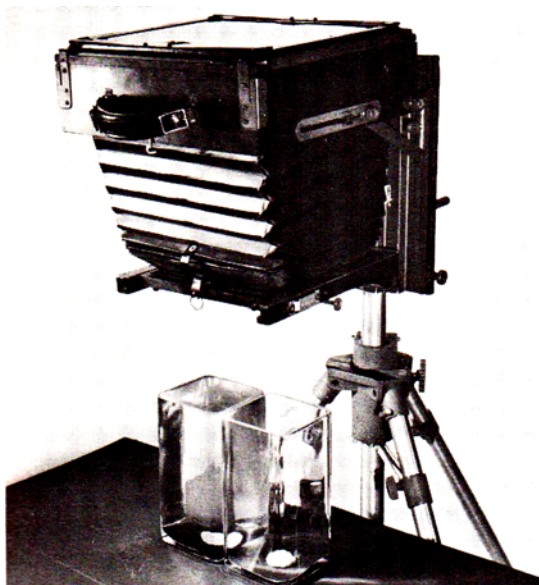


Fig. 1.3. Posizione dell'apparecchio fotografico e dei recipienti usati nel fotografare la moneta «galleggiante» della Fig. 1.2.

1.3. Riflessione

Tutti i corpi, sia trasparenti che opachi, riflettono parte della luce che li colpisce; la maggior parte delle superfici rimandano la luce in molte direzioni, questo fenomeno si chiama *riflessione diffusa*. Con l'aiuto di questa luce diffusa è possibile vedere i corpi illuminati, osservarne la struttura e il colore, e distinguerli dagli altri corpi circostanti.

Alcune sostanze, argento, alluminio, acciaio sotto forma di lastre molto levigate, assorbono la luce bianca in misura ridotta e la riflettono inoltre in maniera molto più regolare di quanto facciano superfici più scabre. Uno specchio ordinario altro non è che una lastra di vetro sul cui retro è applicata una sottile pellicola di argento. Nella Fig. 1.4 una sorgente luminosa proietta luce sia su di uno specchio sia su di un foglio di cartone bianco. Il cartone appare ben illuminato ed è bianco contro uno sfondo scuro mentre lo specchio appare completamente scuro. La stessa quantità di luce raggiunge i due oggetti, inoltre lo specchio riflette la luce molto bene come mostra l'immagine della candela bianca: perché allora il cartone appare nella fotografia più brillante dello specchio? Lo specchio riflette la luce proveniente dalla lampada lontano dall'apparecchio fotografico, mentre il cartone riflette la luce ricevuta in tutte le direzioni, sì che una parte di essa arriva anche alla macchina fotografica.

È la regolarità della riflessione ottenuta con superfici lisce che permette la formazione di immagini. La Fig.1.5 mostra la fotografia di un porticciolo con barche e pontili riflessi nell'acqua. La fotografia è stata stampata dritta? Capovolgete la pagina ed esaminatela di nuovo: nella foto vi sono parecchi segni che indicano se è stata stampata dritta o capovolta.

Nel prossimo capitolo impareremo qualcosa sulle leggi della riflessione, in modo da discutere «che cosa» accade quando si formano immagini per mezzo di specchi o di altre superfici lisce riflettenti, e «perché ciò accade».

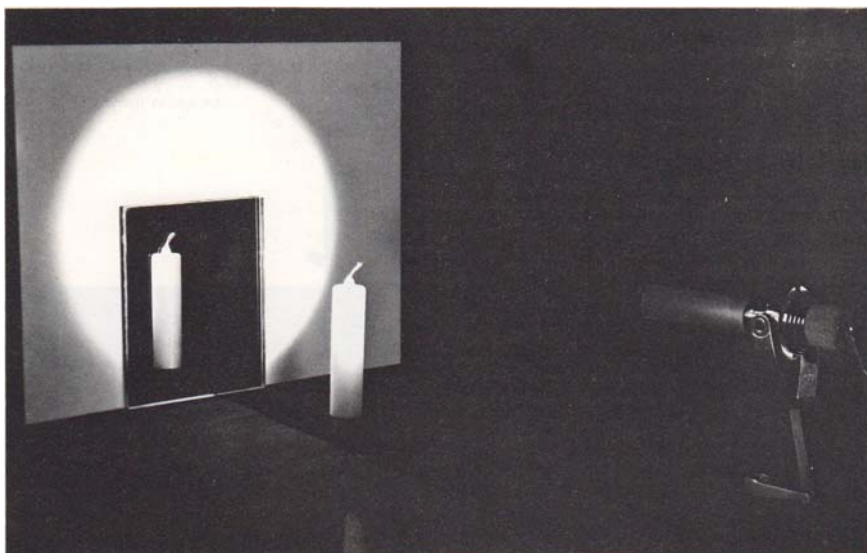


Fig. 1.4. Riflessione speculare e riflessione diffusa. Il cartone bianco (*dietro a sinistra*) rimanda verso la macchina fotografica più luce di quanta ne viene rimandata dallo specchio.

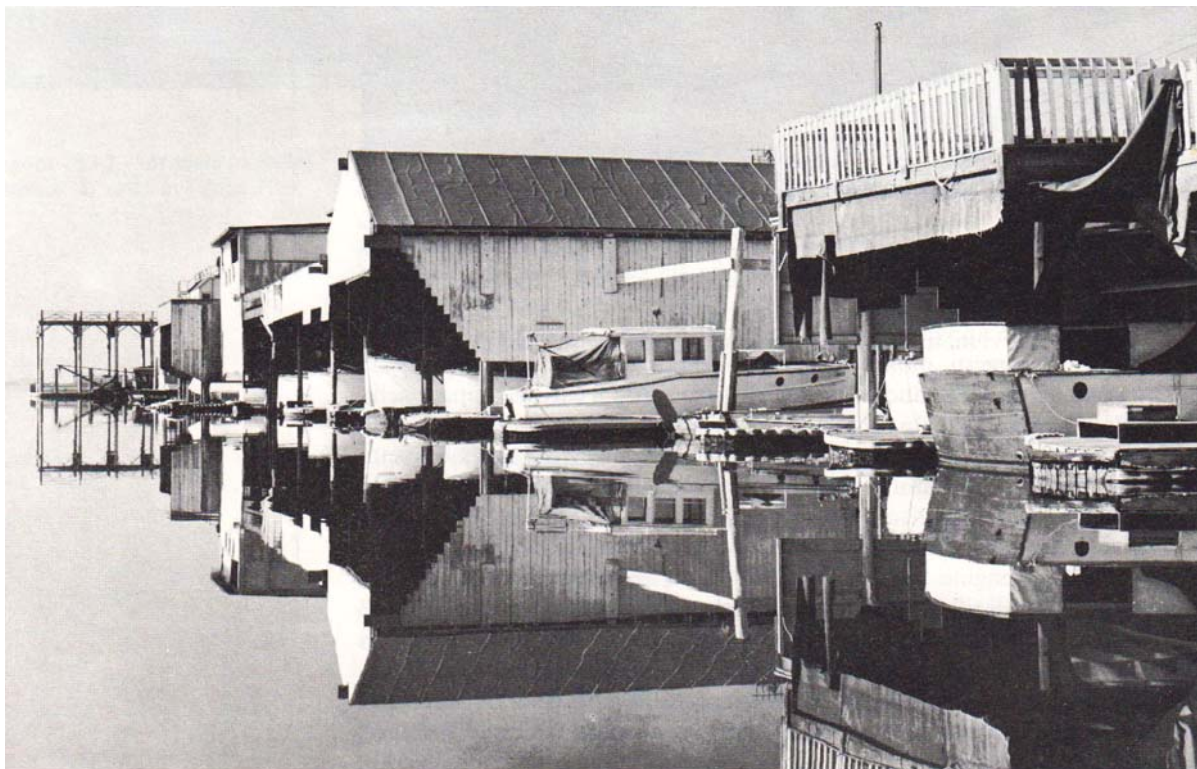


Fig. 1.5. Riflessione quasi perfetta. La fotografia è capovolta? Quali sono le barche vere? Quali sono le loro immagini riflesse?

Quesiti

- 1.4. Dall'interno di una stanza illuminata, durante il giorno vi rendete conto a mala pena della luce riflessa dai vetri delle finestre; invece durante la notte vedete benissimo le riflessioni. Che cosa vi dice questo fatto riguardo alla quantità di luce riflessa dalla superficie del vetro?
- 1.5. Se la Luna ed il Sole sono dalla stessa parte della Terra, è spesso possibile, quando è buio, vedere la Luna anche se la superficie in quella posizione non viene illuminata dal Sole. Perché accade ciò?
- 1.6. Nella Fig. 1.4, potete vedere lo schermo quadrato sul quale la lampada proietta il cerchio luminoso. Come spiegate il fatto che è possibile vedere anche lo schermo che sta al di fuori dell'area luminosa?
- 1.7. Come potete sapere se la fotografia di Fig. 1.5 è diritta o capovolta?

1.4. Strumenti sensibili alla luce

Non abbiamo ancora detto in qual modo viene rivelata la presenza della luce e neppure che cosa siano i colori abbiamo sottintesa la conoscenza di quel meraviglioso strumento che è l'occhio umano. Uno studio approfondito dell'occhio implicherebbe discussioni circa il modo con cui la luce viene rifratta fino a cadere sulle cellule nervose della retina situata nella parete posteriore del bulbo oculare, sul modo con cui esso si accomoda per vedere chiaramente oggetti di diversa luminosità o posti a diverse distanze, su come sono prodotti gli effetti di colore, e infine anche una discussione su limiti ed errori della visione. Uno studio del genere potrebbe facilmente impegnarci per un anno intero o forse più. Dobbiamo quindi accontentarci soltanto dell'osservazione che la luce, passando attraverso le strutture della parte anteriore dell'occhio, viene rifratta in modo che l'immagine si formi sulla retina. Su questa hanno luogo reazioni chimiche le quali originano impulsi elettrici che sono inviati al cervello lungo i nervi.

Vi sono molti strumenti, oltre l'occhio, che reagiscono chimicamente o elettricamente all'azione della luce; tali strumenti vengono spesso usati per studiare la luce con metodi che sono più comodi o più soddisfacenti dell'osservazione diretta. Le sostanze fotosensibili più conosciute sono alcuni composti chimici contenenti argento, essi vengono usati sulle pellicole fotografiche. L'intero processo riguardante l'esposizione e lo sviluppo della pellicola è complesso, ma il fatto essenziale è che sulle parti di pellicola colpite dalla luce rimane, dopo trattamento chimico, un deposito di argento finemente suddiviso.

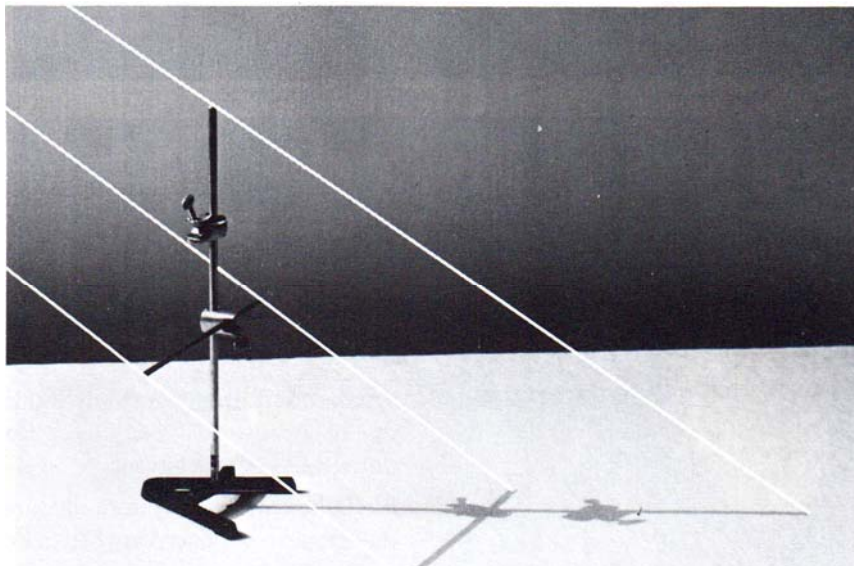


Fig. 1.6. Formazione delle ombre. Le linee congiungenti i punti dell'ombra con i punti dell'oggetto che proietta l'ombra sono pressoché parallele; esse puntano tutte nella direzione della sorgente luminosa.

In tale stato l'argento non appare come metallo lucido e brillante, ma in forma di piccolissime particelle oscure e opache, che costituiscono le ben note e familiari parti nere di un negativo. Le parti non esposte alla luce diventano invece chiare e trasparenti.

Vi sono anche un certo numero di dispositivi che generano una corrente elettrica quando sono colpiti dalla luce, senza che abbia luogo alcuna reazione chimica. I principali congegni di tale tipo sono le cellule fotoelettriche, o fotocellule, e i sensori a semiconduttore CCD o CMOS che trovano impiego nelle fotocamere e nelle videocamere digitali. La corrente elettrica che fluisce attraverso questi dispositivi è proporzionale all'intensità della luce che la colpisce.

Quesiti

- 1.8. Abbiamo visto che quando la luce proveniente da un oggetto bianco colpisce una pellicola fotografica, dà luogo, dopo lo sviluppo, ad un deposito d'argento nero. Tale risultato è la ben nota immagine negativa sulla pellicola. Se, attraverso questo negativo, si proietta luce su di un'altra pellicola fotografica, che tipo d'immagine si otterrà dopo lo sviluppo?
- 1.9. Quale dovrebbe essere l'inclinazione del Sole sopra l'orizzonte affinché la vostra ombra sul suolo orizzontale abbia una lunghezza uguale alla vostra altezza?

1.5. Come si propaga la luce

Il Sole e le stelle ci sono così familiari che di rado pensiamo alle grandi distese di spazio quasi vuoto che li separano dalla terra. Tuttavia sappiamo che il Sole dista dalla terra circa 1.5×10^{11} metri, che la più vicina delle altre stelle dista 300 mila volte tanto, e che si possono vedere innumerevoli stelle a distanze così enormi che quasi viene meno l'immaginazione. Tutte le informazioni che hanno permesso di apprendere qualche cosa circa l'universo in cui viviamo sono giunte sulla Terra «cavalcando veloci raggi di luce». Deve essere pertanto vero che la luce può viaggiare per grandissime distanze e liberamente nello spazio vuoto.

Familiari come lo stesso Sole sono le ombre che proietta. Che cosa possiamo apprendere da esse sulla luce? Se camminiamo o corriamo in un giorno di sole, le nostre ombre procedono di pari passo. Questa semplice esperienza dimostra che la luce deve viaggiare più velocemente di quanto noi possiamo correre, perché altrimenti l'ombra della testa dovrebbe rimanere indietro del tratto da noi percorso nel tempo in cui la luce viaggia dalla testa al suolo. Anche la forma delle ombre fornisce informazioni sulla natura della luce. Nella Fig. 1.6 una serie di linee congiunge vari punti di un'ombra con i corrispondenti punti dell'oggetto che proietta l'ombra. Le linee sono quasi parallele e sono dirette tutte alla sorgente. Evidentemente la luce si propaga secondo linee rette.

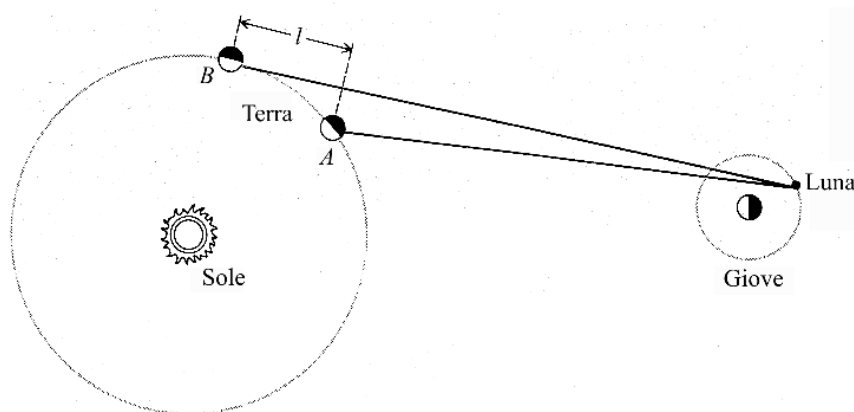


Fig. 1.7. Disegno schematico che illustra il ragionamento di Roemer per un valore finito della velocità di propagazione della luce. Le dimensioni e le distanze non sono rappresentate in scala.

1.6. Velocità della luce

Ciascuno di noi ha, almeno una volta, udito il sibilo di un aeroplano a reazione in volo alto nel cielo, e ha istintivamente guardato nella direzione del suono, ma non è riuscito a vedere l'aeroplano se non molto più avanti del punto da cui è pervenuto il sibilo. Nel decidere quindi dove si trovi effettivamente l'aeroplano, crediamo più agli occhi che alle orecchie; perché tale fiducia negli occhi? Perché sappiamo che il suono richiede un certo tempo per percorrere distanze così grandi, e che la luce viaggia di gran lunga più velocemente del suono. Non pensiamo però che l'aeroplano possa trovarsi oltre il punto in cui lo vediamo, perché siamo proprio convinti che la luce viaggia molto velocemente.

Galileo suggerì un metodo per misurare la velocità della luce, simile a quello da lui usato per misurare la velocità del suono. Due uomini muniti di lanterne furono collocati a una distanza nota l'uno dall'altro. A un certo momento il primo uomo scopriva la sua lanterna avviando contemporaneamente un orologio. Il secondo uomo scopriva a sua volta la sua lanterna nell'istante in cui vedeva la luce del primo. Quando il primo uomo vedeva la luce del secondo, fermava l'orologio, misurando in tal modo il tempo impiegato dalla luce per propagarsi dal primo uomo al secondo e viceversa. O almeno così Galileo sperava. Tale esperimento praticamente fallì e non poté fornire il valore della velocità della luce solo perché tale velocità è troppo alta; non possiamo però ritenerlo un fallimento completo in quanto mostrò che la velocità della luce è troppo grande perché il suo passaggio su brevi distanze possa essere misurato con i primitivi meccanismi di orologeria di quel tempo.

La prima prova a favore di un valore finito per la velocità della luce fu ottenuta da Olaf Roemer nel 1676, mediante osservazioni astronomiche sul moto dei satelliti di Giove. Durante ogni rivoluzione questi satelliti scompaiono nell'ombra di Giove e quindi riemergono (Fig. 1.7); il tempo che intercorre fra due eclissi consecutive di ogni satellite è uguale al suo periodo di rivoluzione. Dalle osservazioni risultò che questi periodi non erano costanti: lievemente più lunghi quando la Terra, nella sua orbita intorno al Sole, si allontanava da Giove (per esempio, da A a B nella Fig. 1.7), più brevi quando la Terra si avvicina a Giove. Roemer pensò che la Terra influenzasse il moto dei satelliti di Giove, ma che, quando questa si allontanava da Giove, la luce proveniente dal satellite, ogni volta che questi usciva dall'ombra, dovesse percorrere una distanza maggiore per raggiungere la Terra (l in Fig. 1.7). Il fatto che una distanza maggiore richieda un tempo maggiore dimostra che la luce non si propaga istantaneamente, bensì ha una velocità finita.

Questo fu il grande contributo dato da Roemer. Il valore numerico della velocità della luce non poté essere calcolato con precisione in quell'epoca, per due ragioni: la misura del tempo impiegato dalla luce a percorrere il diametro dell'orbita terrestre era sbagliata, e il diametro dell'orbita stessa non era noto con precisione.

Misurazioni successive dei ritardi nei tempi delle eclissi mostrarono che l'intervallo richiesto dalla luce per attraversare l'orbita terrestre è di 16 minuti e 20 secondi. La distanza media tra il Sole e la Terra, ben nota oggi, è di 1.47×10^{11} metri; quindi la velocità della luce è:

$$c = \frac{2 \times 1.47 \times 10^{11} \text{ m}}{980 \text{ s}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La prima determinazione della velocità della luce su di una distanza sufficientemente breve da risultare pratica sulla superficie della Terra, venne effettuata da Armando Fizeau nel 1848. Essa richiese l'invenzione di un congegno atto a misurare con precisione piccolissimi intervalli di tempo. (Discuteremo il metodo di Fizeau, modificato da A. A. Michelson, nel capitolo 4).

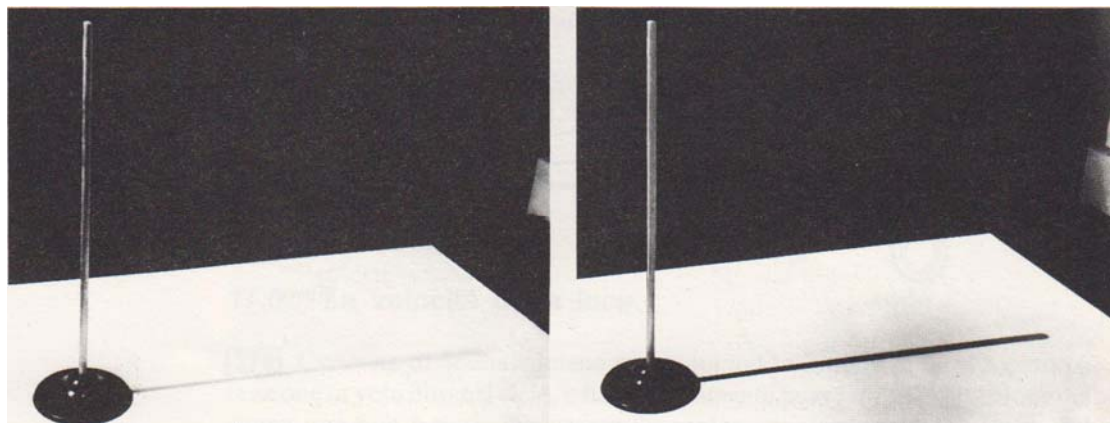


Fig. 1.8. (a sinistra) L'ombra proiettata da una sorgente di luce estesa. (a destra) L'ombra della stessa asta della figura a sinistra, proiettata da una sorgente di luce molto piccola.

Quesiti

- 1.10.** (a) Quanto tempo occorre alla luce del Sole per raggiungere la Terra? (b) Se la luce della stella più vicina impiega 4.3 anni per raggiungere la Terra, quanto è lontana la stella?
- 1.11.** Le radioonde si propagano con la stessa velocità della luce nello spazio vuoto o nell'aria.
- (a) Quanto impiega un radiosegnale per propagarsi da New York a San Francisco, su una distanza di circa 4.8×10^3 km?
- (b) Un radiotrasmettitore emette radiosegnali di un particolare tipo, trasmettendo in direzione della Luna, e riceve un segnale riflesso dopo 2.7 secondi. Qual è la distanza tra la Terra e la Luna, ricavata da tale esperimento?

1.7. Ombre

Osservate la vostra ombra proiettata dal Sole su di un pavimento liscio o un selciato: vedrete che i contorni delle due ombre, quella dei piedi e quella della testa hanno una diversa nitidezza. Questa differenza è anche più notevole se consideriamo, ad esempio, l'ombra di una sottile asta verticale come è mostrato nella parte sinistra della Fig. 1.8. Apparentemente l'ombra diventa più larga e meno netta all'aumentare della distanza tra l'oggetto e il bordo della sua ombra. La mancanza di nitidezza delle ombre dipende anche dalla sorgente di luce. La parte destra della figura 1.8 mostra l'ombra che si ottiene quando la sorgente è costituita da una lampada situata dietro uno schermo sul quale è stato praticato un piccolo foro: quest'ombra è nettamente definita per l'intera sua lunghezza. Le ombre proiettate da piccole sorgenti di luce sono di solito perfettamente definite, in accordo con la propagazione rettilinea della luce.

Le ombre nette, proiettate da una sorgente di luce così piccola da poter essere considerata come puntiforme, ci forniscono un indizio circa la ragione dell'apparente minor nitidezza delle ombre proiettate dal Sole. Ogni punto della superficie solare emette luce, perciò l'ombra non è, in realtà, unica, ma è la combinazione di un grandissimo numero di ombre proiettate dalla luce proveniente da ogni punto della superficie solare. La Fig. 1.9 mostra l'ombra formata da una sorgente di luce di considerevole estensione, come il Sole. Poiché la luce si propaga in linea retta, da nessun punto della sorgente essa può raggiungere la

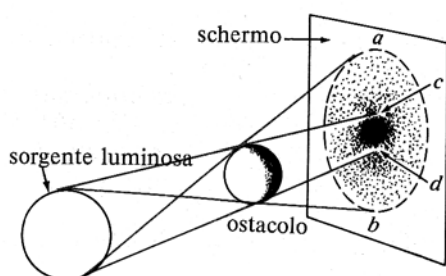


Fig. 1.9. Ombra proiettata da una sorgente di luce estesa. Questo disegno rappresenta una sezione che passa per la sorgente di luce e per l'ostacolo, secondo un piano perpendicolare allo schermo.

regione circolare compresa tra c e d ; quindi questa regione dell'ombra è nera. Nella regione punteggiata tra la circonferenza ab e la circonferenza cd , arriva soltanto la luce proveniente da alcune zone della sorgente; l'ombra perciò è meno scura e svanisce alla fine di un bordo indistinto in corrispondenza della circonferenza ab . Al di fuori della regione ombreggiata compresa tra a e b , la luce arriva da tutti i punti della sorgente.

È chiamata propriamente ombra la parte scura dell'ombra, quella cioè che non è raggiunta da alcuna luce proveniente dalla sorgente, mentre le parti meno scure formano la penombra.

Quesiti

- 1.12. Nella Fig. 1.9 si può collocare lo schermo in modo da ottenere la penombra senza l'ombra?
- 1.13. La Fig. 1.9 illustra come si produce un'ombra confusa (dal contorno non netto). Come si potrebbe produrre un'ombra più nitida (dal contorno più netto) dello stesso oggetto?
- 1.14. Tenete una matita esposta alla luce solare immediatamente al disopra di una superficie liscia e solleva tela lentamente mentre osservate l'ombra. Spiegate ciò che vedete.
- 1.15. Supponete che la sorgente di luce estesa della figura 1.9 sia il Sole, l'oggetto-ostacolo sia la Luna e lo schermo sia la superficie della Terra.
 - (a) In quale zona si produrrà un'eclissi totale di Sole?
 - (b) In quale zona si produrrà un'eclissi parziale di Sole?

1.8. Fasci, pennelli e raggi luminosi

La Fig. 1.10 mostra una sorgente di luce orientata verso un foglio di carta. Sappiamo che la luce proviene dalla sorgente e vediamo che si riflette sulla carta, ma non la vediamo nello spazio che separa i due oggetti; il senso comune ci dice tuttavia che la luce deve propagarsi fra i due oggetti. Come potete osservare nella Fig. 1.11, sono state introdotte nell'aria piccole particelle di fumo e ora il fascio luminoso diventa chiaramente visibile lungo tutto il percorso dalla sorgente al foglio di carta. I contorni rettilinei del

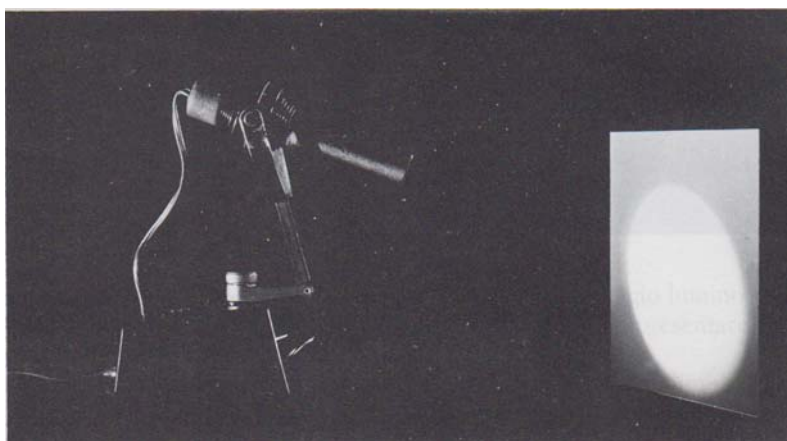


Fig. 1.10. I fasci di luce sono invisibili. Qui vediamo la sorgente e la riflessione della luce sul foglio di carta bianca, ma non vediamo nulla tra la sorgente e lo schermo

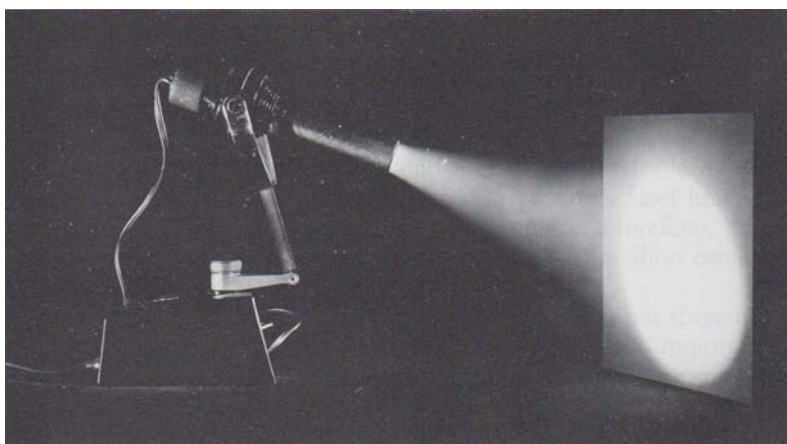


Fig. 1.11. Se si introducono piccole particelle nell'aria, il fascio di luce diventa visibile lungo tutto il cammino dalla sorgente allo schermo di carta bianca. Fate un confronto con la Fig. 1.10.

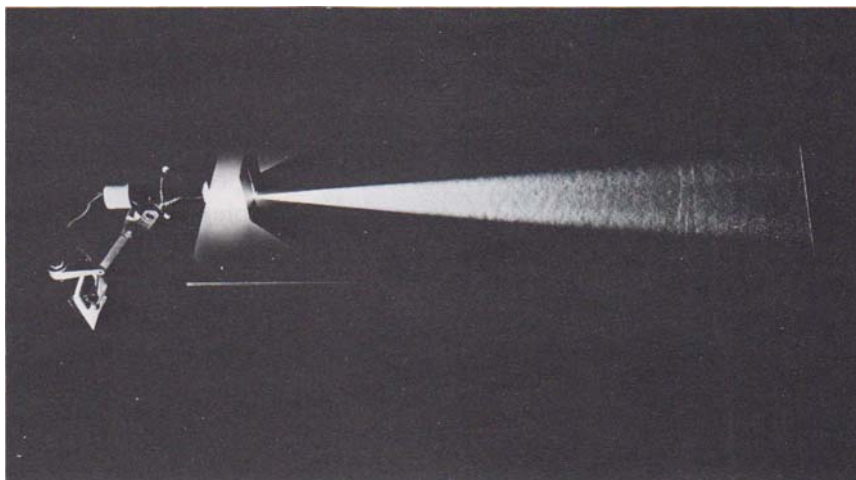
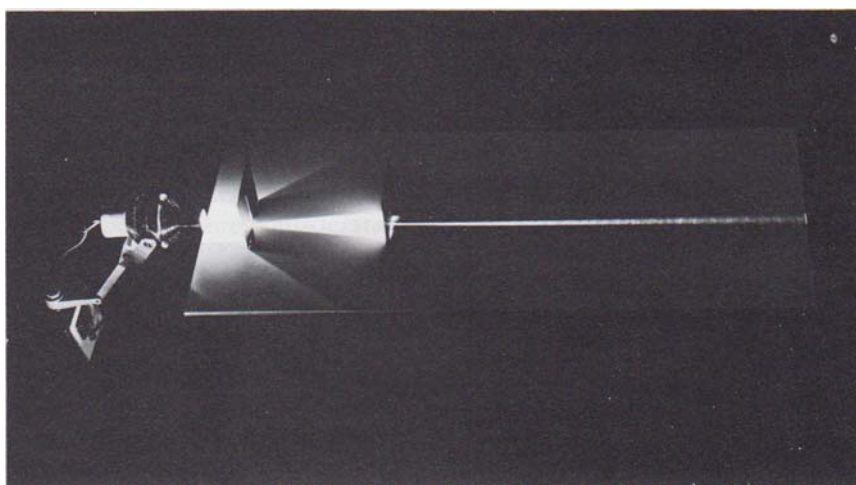


Fig. 1.12. Fasci e pennelli di luce. Nella fotografia superiore la luce che proviene dalla sorgente attraverso un forellino forma un *fascio* a forma di cono. Nella fotografia inferiore un secondo forellino allineato con il primo e con la sorgente produce un sottile *pennello* di luce.



fascio congiungono la sorgente con i contorni della regione illuminata, confermando la nostra opinione che la luce si propaghi in linea retta.

Il fatto che non vediamo affatto il fascio finché non viene introdotto il fumo indica che la luce entra nei nostri occhi soltanto quando guardiamo direttamente verso una sorgente di luce o quando sono presenti corpi illuminati che possano riflettere la luce direttamente verso i nostri occhi. Nel caso in questione la luce si è riflessa sul foglio di carta e sulle particelle di fumo, facendo sì che esse si comportino come nuove sorgenti che inviano la luce ai nostri occhi lungo nuovi percorsi rettilinei.

Nella fotografia superiore della Fig. 1.12 vediamo un cono definito dal fascio. L'asse del cono (la retta congiungente il centro del forellino con il centro della base del cono) passa per il centro della sorgente e il centro del forellino.

Allineando i due forellini con la sorgente, come è indicato nella Fig. 1.12 (in basso), otteniamo un *pennello* di luce molto sottile. Per lo studio dei fenomeni luminosi è opportuno immaginare un pennello di luce che sia più piccolo e più sottile di qualsiasi pennello che si riesca a realizzare in pratica.

Il pennello più sottile che si possa immaginare è semplicemente una retta e questo pennello estremamente sottile è detto *raggio di luce* o *raggio luminoso*.

Naturalmente non possiamo mai produrre singoli raggi luminosi, ma il concetto di raggio luminoso è molto utile in quanto permette di tracciare sulla carta rette che rappresentano le direzioni in cui si propaga la luce.

Un pennello di luce si può osservare in natura; un raggio luminoso è un'approssimazione utile (una *astrazione matematica*) che abbiamo inventato per rappresentare un pennello di luce estremamente sottile.

Spesso tracciamo alcuni raggi, per esempio per indicare i limiti della regione illuminata come nella Fig. 1.9. I raggi che tracciamo sono utili come le linee nel disegno di un architetto, ma non sono luce reale così come le linee tracciate dall'architetto non sono muri o finestre reali. La luce non forma raggi; siamo noi che li immaginiamo per descrivere più facilmente il suo comportamento.

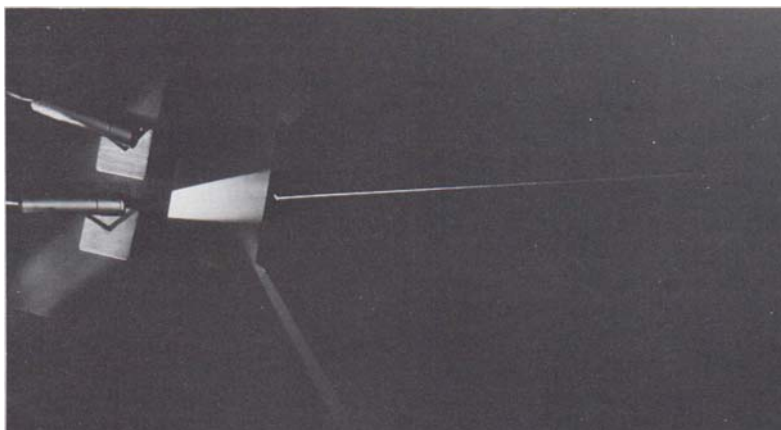
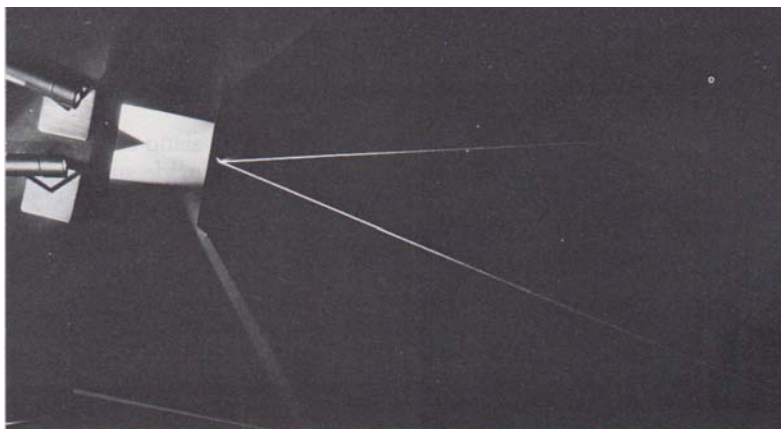


Fig. 1.13. L'esperimento dimostra che due fasci di luce possono propagarsi l'uno attraverso l'altro.



Sappiamo che i fasci o i pennelli di luce che incidono su oggetti riflettenti li illuminano trasformandoli in nuove sorgenti di luce; il fascio di luce interagisce con la materia e la materia a sua volta interagisce con il fascio di luce. I fasci luminosi possono anche interagire fra loro? Possiamo rispondere a questa domanda facendo passare i fasci luminosi provenienti da due sorgenti diverse attraverso un unico forellino, come è illustrato nella Fig. 1.13: ogni fascio attraversa il forellino come se l'altro fascio non esistesse.

In generale ogni fascio di luce proveniente da due o più sorgenti si comporta come se gli altri fasci non esistessero ed è molto importante che i fasci luminosi siano indipendenti tra loro, in caso contrario infatti sarebbe di scarsa utilità lo studio dei pennelli o dei raggi emessi da sorgenti diverse o da parti diverse della stessa sorgente.

Per esempio, tracciare i raggi che rappresentano le direzioni di due getti d'acqua non ci fornisce informazioni sui percorsi che i due getti seguiranno dopo essersi intersecati. Nel caso dei raggi luminosi invece la luce emessa da ciascuna di due sorgenti si comporta come se vi fosse una sola sorgente e questo permette di trovare le zone illuminate e le zone in ombra di entrambe le sorgenti tracciando i raggi luminosi.

Quesiti

-
- 1.16.** Nella fotografia superiore della figura 1.12 che cosa accadrebbe al cono di luce se la sorgente venisse allontanata?
- 1.17.** Il sottile pennello di luce della figura 1.12 (*in basso*) ha i lati paralleli?
- 1.18.** Oltre all'esperimento illustrato nella figura 1.13, come potete dedurre che la luce proveniente da un oggetto attraversa la luce proveniente da un altro senza che i due fasci si influenzino reciprocamente?
-

1.9. Come si localizzano. gli oggetti

Possiamo sempre localizzare la posizione di una sorgente luminosa puntiforme se conosciamo la direzione di alcuni raggi che escono dalla sorgente. Tracciamo semplicemente alcuni raggi prolungandoli a ritroso finché non si incontrano: il punto di intersezione è la posizione della sorgente. Quando un cono di raggi luminosi arriva al nostro occhio provenendo da una sorgente puntiforme, noi variamo automaticamente la forma della lente (il cristallino) esistente nel nostro occhio per «mettere a fuoco», ossia per fare convergere i raggi divergenti provenienti dalla sorgente in modo da vedere un'immagine nitida della sorgente. Questo processo di «messa a fuoco» degli occhi, che in fisiologia è detto *accomodamento*, ci fornisce informazioni equivalenti a quelle che otteniamo seguendo a ritroso i raggi luminosi. In certe condizioni, senza esserne consapevoli, usiamo queste informazioni per valutare la distanza della sorgente.

Riusciamo a valutare le distanze più facilmente con due occhi che con un occhio solo e possiamo persuadercene chiedendo a un amico di tenere in mano una bacchetta sottile, lontano da altri oggetti (Fig. 1.14).

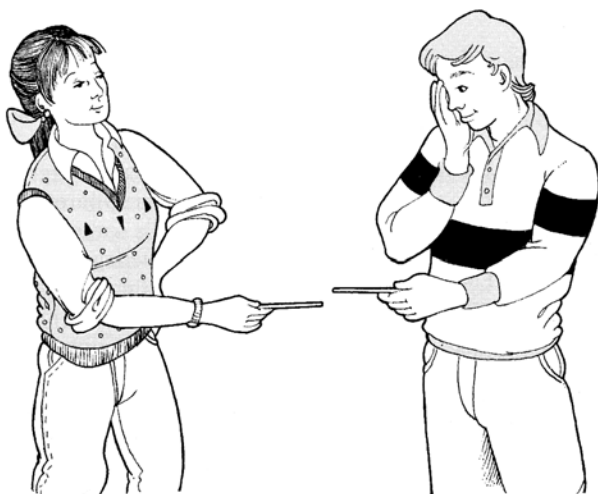


Fig. 1.14. Un esperimento per verificare la capacità di valutare la distanza con un occhio solo

raggi ci deriva dalle nostre esperienze passate. La conoscenza acquisita delle distanze associate alla particolare azione di fare convergere e «mettere a fuoco» gli occhi ci dice direttamente dove è l'oggetto e ce lo dice con una precisione maggiore di quella consentita dall'azione di «mettere a fuoco» con un solo occhio.

Se lasciamo altri oggetti nelle vicinanze quando tentiamo di misurare la distanza o se usiamo blocchi anziché bacchette sottili, riusciamo a toccare un oggetto con un altro ancor più facilmente. In queste condizioni il nostro cervello sfrutta altri indizi, come per esempio l'effetto stereoscopico derivante dalle immagini lievemente diverse delle facce dei blocchi viste da ciascun occhio. Queste due immagini differiscono maggiormente se l'oggetto viene avvicinato agli occhi. Anche le dimensioni e la posizione degli oggetti vicini aiutano il cervello a valutare la distanza di un oggetto.

Altri indizi, come le dimensioni, le ombre e il movimento di oggetti familiari ci aiutano a valutare la distanza di un oggetto da noi. Con questi indizi l'interpretazione diretta dei raggi presenti nei coni di luce che entrano negli occhi e dell'angolo fra i coni diventa meno importante, ma a brevi distanze questi indizi fisici vengono certamente utilizzati.

Tenendo in mano un'altra bacchetta sottile, proviamo a toccare l'estremità della bacchetta dell'amico quando essa è a una distanza pari all'incirca a quella che riusciamo a raggiungere con il braccio teso: scopriremo che siamo capaci di compiere questa operazione con notevole precisione. Se tentiamo la stessa esperienza tenendo un occhio chiuso, ci accorgiamo che è molto più difficile portare a contatto le estremità delle due bacchette.

Uno dei motivi per cui valutiamo meglio le distanze tenendo aperti entrambi gli occhi è indicato da questa esperienza. La luce che proviene dall'estremità di un oggetto deve viaggiare in differenti direzioni per raggiungere i nostri occhi (Fig. 1.15).

L'azione di fare convergere gli occhi sulle visuali (le linee congiungenti la sorgente con i nostri occhi) corrette e di «metterli a fuoco» sui coni dei



Fig. 1.15. Visione binoculare. Possiamo valutare la distanza sia in base all'angolo secondo cui gli occhi convergono sull'oggetto che con la messa a fuoco dei coni dei raggi.

1.10. Pennelli luminosi e rappresentazione in scala

Finora, il nostro studio del comportamento della luce si è basato solo su rette e angoli. La nostra capacità di produrre ombre nitide (Fig. 1.6) e pennelli luminosi sottili (Fig. 1.12) ci ha suggerito che la luce si propaga in linea retta e varia la propria direzione di propagazione soltanto quando viene riflessa o rifratta.

La variazione della direzione di propagazione causata dalla riflessione e dalla rifrazione della luce per opera del vetro sembra dipendere soltanto dall'angolo di incidenza (e dal tipo di vetro), ma non dalle dimensioni del pezzo di vetro. Per esempio, avremmo potuto dividere per 2 le dimensioni del dispositivo della Fig. 1.12, eseguire la fotografia e ingrandirla secondo un fattore 2: le due fotografie sarebbero state identiche. Il comportamento della luce sembra essere indipendente dalle dimensioni degli oggetti con cui interagisce, come si può notare osservando le dimensioni degli oggetti della vita quotidiana.

Cambiare tutte le dimensioni secondo lo stesso fattore, cioè cambiare la scala, non sembra avere alcun effetto sul comportamento della luce.

Ma se cerchiamo di rendere molto sottili i pennelli luminosi della Fig. 1.12 usando una fenditura molto stretta, accade qualcosa di imprevisto: la luce diverge oltre la fenditura (Fig. 1.16). Ciò significa che quando cerchiamo di verificare la propagazione rettilinea della luce con un pennello luminoso molto sottile e il più possibile simile a un raggio luminoso ideale, la luce cambia direzione nell'attraversare la fenditura. Questa deviazione della luce per opera di un'apertura stretta è detta *diffrazione*.

Si può osservare facilmente la diffrazione della luce guardando un lampione stradale lontano o una lampada con un filamento sottile attraverso una fenditura stretta ottenuta premendo due dita l'una contro l'altra fino a renderle quasi aderenti (si veda la Fig. 1.17): la sorgente di luce sembra allargarsi. Questa osservazione significa che la luce entra nell'occhio provenendo da molte direzioni e ciò può avvenire soltanto se la luce viene deviata (*diffratta*) dalla fenditura. Questo fenomeno è illustrato schematicamente nella Fig. 1.18.

La diffrazione non è limitata alle fenditure. Se facciamo passare un fascio di luce parallelo attraverso un foro circolare col diametro di qualche millimetro e lo facciamo cadere su uno schermo, otteniamo una macchia luminosa circolare nitida. Se ripetiamo l'esperimento con un forellino di diametro molto piccolo (ad esempio, un foro fatto con uno spillo), otteniamo la curiosa immagine della Fig. 1.18.

La luce perciò si comporta in modo diverso a seconda delle dimensioni delle fenditure o dei fori che attraversa; non viene deviata, cioè si propaga in linea retta, quando attraversa aperture di grandi dimensioni. Ma quando le dimensioni delle aperture vengono ridotte a sufficienza, la luce subisce la diffrazione, di cui dobbiamo tenere conto quando descriviamo il suo comportamento.

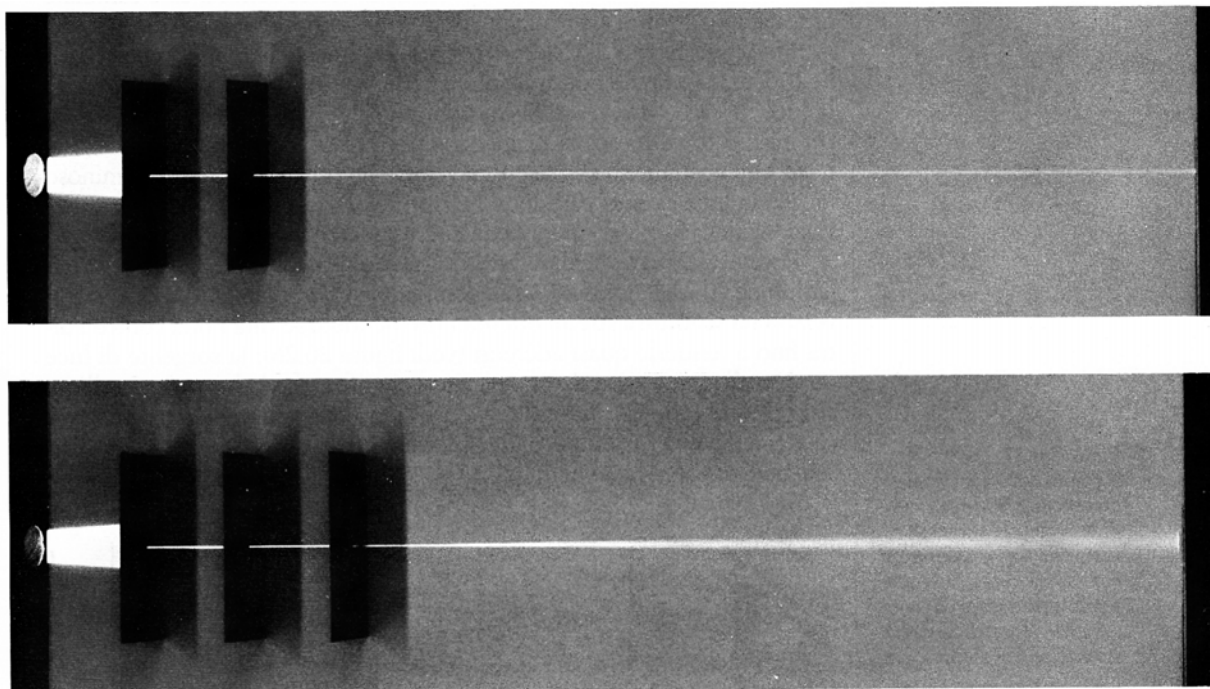


Fig. 1.16. In alto: un pennello di luce formato dalla luce che attraversa due piccole fenditure larghe 3 mm. La luce prosegue lungo la direzione iniziale senza subire in pratica alcuna deviazione. In basso: è stata aggiunta una terza fenditura larga 0.1 mm. Ora la luce diverge.

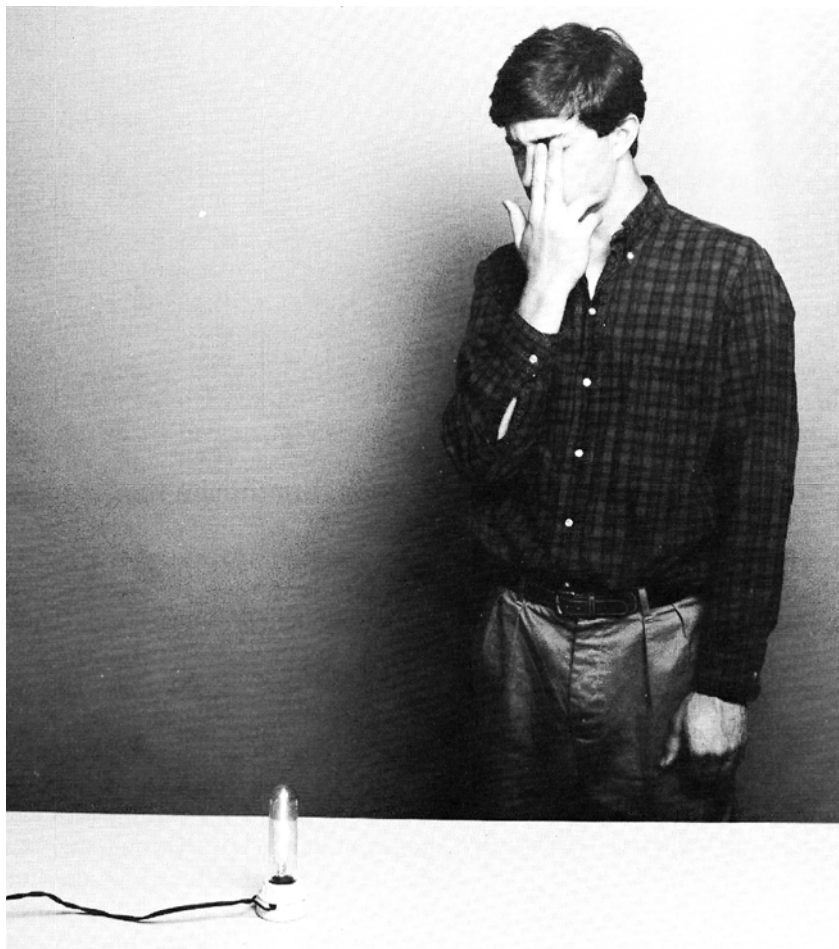


Fig. 1.18. Un semplice metodo per osservare la diffrazione.

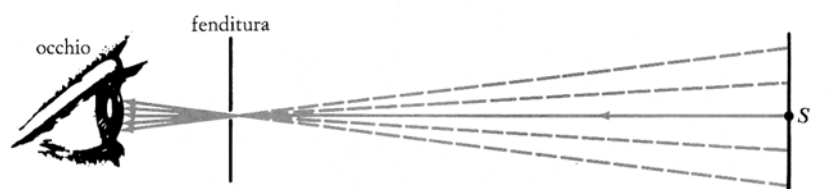


Fig. 1.17. Il punto nero contrassegnato con S è una sezione di una piccola sorgente verticale. La luce diffratta emessa da questa sorgente sembra provenire da una sorgente larga, di larghezza L , anziché dal sottile filamento S .

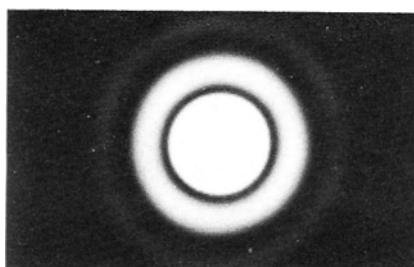


Fig. 1.19. La figura formata da un pennello di luce che attraversa un forellino.

La diffrazione, quindi, indica che le dimensioni sono importanti nel comportamento della luce: una descrizione del passaggio della luce attraverso fori o fenditure molto piccoli differisce da una descrizione limitata al passaggio della luce attraverso fori o fenditure più grandi. Torneremo a parlare più avanti di questi effetti di scala sul comportamento della luce.

Problemi di fine capitolo

- 1.19.** Se, all'interno di una stanza illuminata, durante la notte, guardate degli oggetti riflessi da vetri di finestra abbastanza spessi, gli oggetti di solito appaiono sdoppiati. Che cosa vi dice questo fatto riguardo la riflessione del vetro?
- 1.20.** La Fig. 1.11 fa vedere chiaramente che il fumo disperde la luce verso il nostro occhio, anche se la luce è stata emessa in una direzione secondo cui non ci avrebbe raggiunto. Tenendo presente ciò, perché una densa nuvola di fumo sulla nostra testa appare scura, e non chiara? Scrivete brevemente su tale fatto e preparatevi a discuterne.
- 1.21.** Muovete questo foglio verso di voi tenendo un occhio chiuso o coperto. Quando il foglio ha raggiunto esattamente la distanza a cui la stampa appare confusa ed indistinta, misurate la distanza tra il libro e l'occhio. Ripetete l'esperimento con l'altro, occhio. Le due distanze sono approssimativamente eguali? Fate l'esperimento con persone di differente età, e registrate i risultati insieme con le età.
- (a) Esiste un limite alla capacità dell'occhio di aggiustarsi per la visione distinta?
- (b) Questo limite è lo stesso per tutte le persone, e per i due occhi di una stessa persona?
- (c) È variabile con l'età delle persone? Confrontate le vostre risposte con quelle dei vostri compagni di classe.
- 1.22.** Considerate i modi diversi in cui la Luna appare nel corso di un mese. Sapete spiegare perché la Luna piena sorge là dove tramonta il Sole, mentre la Luna nuova sorge là dove si leva il Sole?
- 1.23.** Le eclissi di Sole causate dalla Luna sono talvolta totali e talora anulari. Nel secondo caso, un anello di luce solare è visibile attorno al bordo della Luna.
- (a) Disegnando uno schizzo della Terra, della Luna e del Sole, spiegate perché si verificano due differenti tipi di eclisse solare. Le distanze della Luna dalla Terra, e della Terra dal Sole, rimangono le stesse nei vari casi?
- (b) La Luna dista dalla Terra circa 3.8×10^8 m, ed il Sole circa 1.5×10^{11} m. Se la Luna ha un diametro di 3.5×10^6 m, qual è il diametro approssimativo del Sole?
- 1.24.** Supponete che il tentativo per misurare la velocità della luce secondo il metodo di Galileo (descritto nel par. 1.6) venga fatto da due persone distanti 1 km l'una dall'altra.
- (a) Che intervallo di tempo deve essere in grado di misurare la persona che produce il segnale luminoso in modo da ottenere un valore accettabile della velocità della luce?
- (b) Supponete che l'intervallo di tempo in realtà misurato sia all'incirca 0.3 s. Che cosa dovrebbero fare per dimostrare che questo intervallo di tempo è la misura del loro tempo di reazione invece che della velocità della luce?
- 1.25.** (a) Che influenza ha sulla conversazione fra un astronauta che sta sulla Luna ed il personale della stazione di Terra il fatto che sono necessari 2.7 s alle radioonde per andare dalla Terra alla Luna e ritorno?
- (b) Considerate (a) nel caso di astronauti che sono su Marte, quando esso è nella posizione più vicina o in quella più lontana dalla Terra. (La distanza fra la Terra ed il Sole è 1.5×10^{11} m e fra Marte ed il Sole è 2.3×10^{11} m).
- (c) Considerate (a) nel caso di un astronauta che sta viaggiando in prossimità della stella a noi più vicina dopo il Sole, dalla quale la luce impiega 43 anni per raggiungerci.
-