

4. IL MODELLO CORPUSCOLARE DELLA LUCE

Tenteremo ora di elaborare un modello della luce che possa spiegare le proprietà finora studiate. Tale modello ci consentirà di trarre conclusioni e di formulare previsioni che potranno a loro volta essere verificate da ulteriori esperimenti. Discuteremo, in questo capitolo, idee che sono state elaborate nel corso di parecchi secoli. Il principale artefice del modello che tratteremo in questo capitolo fu Sir Isaac Newton. Abbiamo visto che la luce ha sempre come sorgente un corpo luminoso e si propaga secondo linee essenzialmente rette. Qualsiasi modello della luce deve perciò prendere in considerazione qualche cosa che parte dal corpo luminoso e si muove lungo una traiettoria rettilinea. La cosa più semplice che possa spostarsi secondo una linea retta è una particella come, ad esempio, una palla da baseball. Potremmo quindi pensare che una sorgente luminosa sprigioni una corrente di particelle. All'obiezione che le palle da baseball, o altre particelle materiali, non si spostano, alla superficie della Terra secondo linee rette ma secondo traiettorie curve cadendo poi al suolo, si può rispondere che, com'è noto, la traiettoria di una palla da baseball s'incurva tanto meno quanto più grande è la velocità impressale. Possiamo quindi ammettere che le traiettorie delle particelle di luce – che viaggiano con la velocità di 3×10^8 m/s – non possano praticamente venire curvate dalla forza d'attrazione gravitazionale. Col modello a particelle, o modello corpuscolare, non si ha pertanto alcuna difficoltà nel ritenere che la propagazione della luce avvenga secondo linee rette.

Naturalmente i corpuscoli di luce sono del tutto diversi dalle palle da baseball. In particolare, contrariamente a quanto avviene per queste, i corpuscoli di luce non interagiscono tra loro, come si è già visto nel paragrafo 1.8. Possiamo spiegare tale assenza di interazione supponendo che i corpuscoli siano tanto piccoli che, considerati due fasci di luce intensa intersecantesi, la probabilità che i corpuscoli di un fascio urtino quelli dell'altro è estremamente piccola. Nel modello corpuscolare possiamo perciò ammettere l'assenza di interazione luce-luce. I corpuscoli di luce differiscono pertanto dalle palle da baseball per la loro altissima velocità e per le loro piccolissime dimensioni. Tenendo presenti tali differenze, possiamo tentare di prevedere le proprietà dei corpuscoli di luce studiando il comportamento di palle da baseball o di piccole sferette.

4.1. Unità di misura per grandezze fotometriche

Intensità luminosa (di una sorgente) I_l : è la grandezza che esprime la quantità di luce emessa da una sorgente nell'unità di tempo. L'unità di misura nel S.I. dell'*intensità luminosa* (di una sorgente) è la *candela* (*cd*) definita nel 1979 dalla XVI Conferenza Generale di Pesi e Misure (CGPM), come l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} hertz (Hz) e che ha una intensità radiante in quella direzione di $1/683$ watt per steradiante (W/sr).

Intensità di illuminazione (o anche *illuminamento*) I_i : è la grandezza che esprime la quantità di luce che arriva sull'unità di area di una superficie nell'unità di tempo. L'unità di misura nel S.I. dell'*intensità di illuminazione* è il *lux* definito come l'illuminazione prodotta da una sorgente avente l'intensità di 1 cd su una superficie di area 1 m^2 posta perpendicolarmente alla direzione dei raggi ad 1 m di distanza dalla sorgente.

4.2. L'intensità d'illuminazione (illuminamento) in funzione della distanza.

Quando illuminiamo un foglio di carta con una piccola lampadina (o una candela), l'intensità di illuminazione (o illuminamento) sul foglio aumenta via via che avviciniamo la lampadina. Chiediamoci in quale modo l'intensità di illuminazione dipenda dalla distanza dalla sorgente di luce.

Per rispondere a questa domanda dobbiamo disporre di uno strumento, tarato, per misurare la luce (fotometro). Uno strumento di questo tipo, usato dai fotografi, può venire tarato nel modo seguente. Prima di tutto cerchiamo un gruppo di sorgenti di luce uguali, dove per «uguali» intendiamo che lo strumento fornisce la stessa indicazione per ogni sorgente quando questa è posta a una distanza prestabilita r_0 davanti allo strumento.

Segniamo 1 in corrispondenza della posizione che assume l'indice quando lo strumento è illuminato da una delle sorgenti uguali poste alla distanza prefissata.

Segniamo quindi 2 sulla scala nella posizione che l'indice assume quando alla distanza prefissata sono collocate due sorgenti campione; ripetiamo l'operazione con 3 sorgenti campione poste alla distanza r_0 dallo strumento, e così via.

Con il procedimento precedente abbiamo tarato lo strumento e possiamo ora determinare l'intensità di illuminazione prendendo come unità di misura l'intensità di illuminazione prodotta da una sorgente campione posta alla distanza r_0 dallo strumento. Se sulla scala sono segnati molti punti tarati, possiamo eseguire interpolazioni tra due punti adiacenti e segnare quindi sulla scala punti corrispondenti a valori frazionari dell'unità campione.

Quando usiamo questo strumento per misurare l'intensità di illuminazione di una sorgente campione posta a una distanza r diversa da r_0 , la scala indica l'intensità di illuminazione in funzione del numero di sorgenti campione che si dovrebbero collocare alla distanza r_0 per ottenere un effetto identico.

A questo punto possiamo prendere una delle sorgenti campione e collocarla davanti allo strumento a distanze diverse da r_0 : possiamo così trovare come varia l'intensità di illuminazione I dello strumento al variare di r , la distanza fra sorgente e strumento.

I risultati di tale esperimento sono riportati nella Tab. 4.1. Con i dati della tabella si sono costruiti i grafici della Fig. 4.1.

I valori elencati nella Tab. 4.1 confermano in modo indiscutibile la nostra previsione, qualitativa, che l'intensità di illuminazione aumenti al diminuire della distanza.

Tab. 4.1. L'intensità di illuminazione I a differenti distanze da una piccola lampada.

r (metri)	I (unità sul fotometro)	$I \cdot r^2$
1.20	1.0	1.4
1.00	1.5	1.5
0.80	2.3	1.5
0.70	3.2	1.6
0.60	4.3	1.5
0.50	5.4	1.4
0.40	8.5	1.4
0.30	17.7	1.6
0.25	23.5	1.4
0.20	33.3	1.3

Ma in più indicano che la relazione non è una semplice proporzionalità inversa. Infatti se la distanza passa da 1.20 m a 0.6 m, cioè si dimezza, l'intensità di illuminazione aumenta di un fattore 4.3, cioè quadruplica; si può anche notare che una diminuzione della distanza da 0.80 m a 0.40 m produce un aumento dell'intensità di illuminazione da 2.3 a 8.5, secondo un fattore 3.7.

Se si esaminano altre coppie di valori si può osservare che in generale se la distanza si dimezza, l'intensità di illuminazione si quadruplica e ciò significa che l'intensità di illuminazione di una sorgente è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Come conferma della validità di questa legge, abbiamo calcolato gli inversi dei quadrati delle distanze e abbiamo rappresentato graficamente l'intensità di illuminazione in funzione dell'inverso del quadrato della distanza (Fig. 4.1(b)). La retta rappresenta la funzione:

$$I = \frac{k}{r^2}$$

dove k è una costante.

Per ottenere i valori da inserire nella Tab. 4.1, scegliamo la distanza r_0 in modo che sia molto grande rispetto alle dimensioni della sorgente di luce e anche rispetto alle dimensioni dell'elemento sensibile del fotometro.

Quando la distanza tra la sorgente e il ricevitore della luce è piccola rispetto alle loro dimensioni, la luce si propaga dall'uno all'altro e incide sulla superficie sensibile del fotometro con angoli diversi invece di seguire traiettorie praticamente parallele e perpendicolari alla superficie. Perciò non ci dobbiamo sorprendere se le maggiori deviazioni rispetto la legge dell'inverso del quadrato della distanza si rilevano

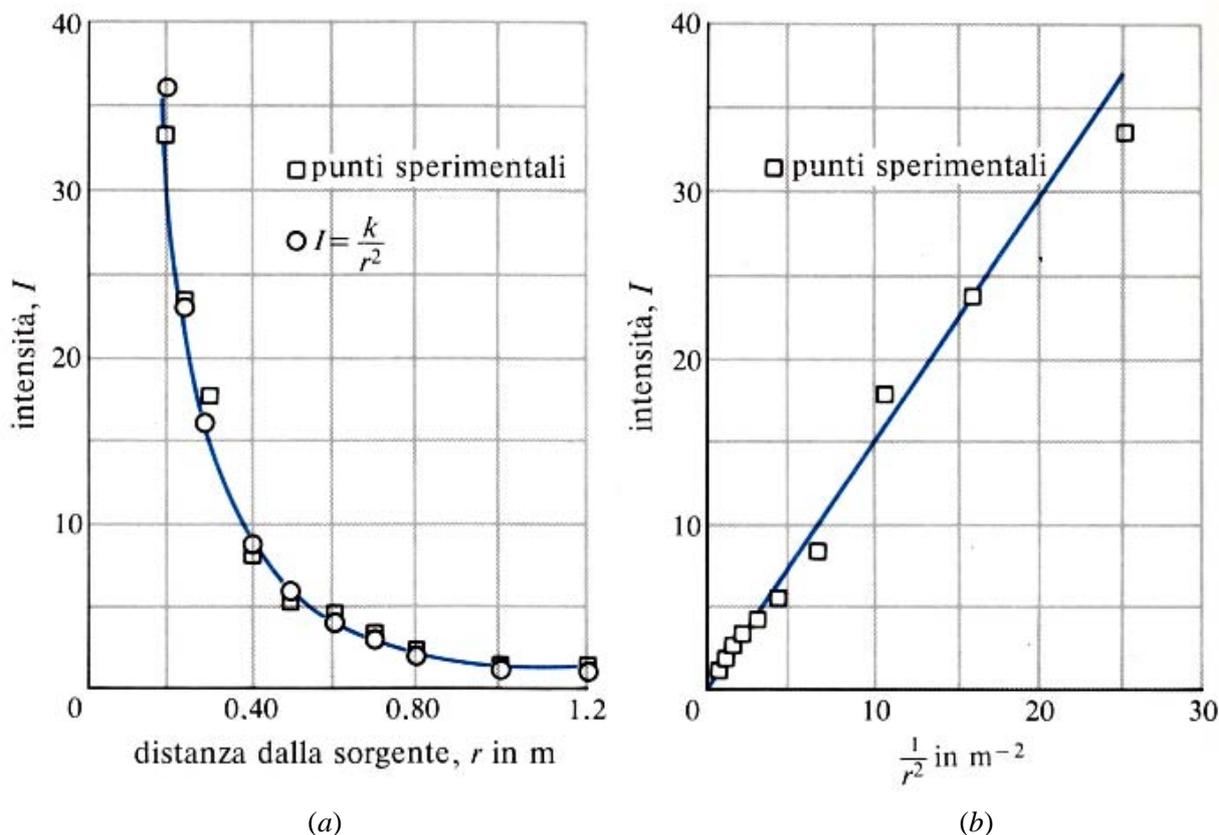


Fig. 4.1. (a) Il grafico mostra il valore dell'intensità d'illuminazione a diverse distanze dalla sorgente. I valori sperimentali sono in accordo con i punti calcolati applicando la legge dell'inverso del quadrato della distanza. (b) Il grafico dell'intensità di illuminazione in funzione di $1/r^2$ presenta un buon accordo con una retta passante per l'origine.

quando la sorgente e lo strumento sono vicini. Notiamo infine che nell'eseguire le misure per la Tab. 4.1, abbiamo avuto cura che lo strumento non venisse raggiunto da luce riflessa.

I valori della terza colonna della Tab. 4.1 mostrano che il prodotto dell'intensità d'illuminazione per il quadrato della distanza è praticamente costante.

Chiediamoci ora se con il modello corpuscolare è possibile spiegare la legge dell'inverso del quadrato della distanza per l'intensità di illuminazione nel caso di una sorgente di luce di piccole dimensioni.

Per rispondere a questa domanda, facciamo due ipotesi: la prima che l'intensità di illuminazione sia proporzionale al numero di corpuscoli che incidono su una superficie di area unitaria nell'unità di tempo, la seconda che non vengano perduti corpuscoli durante la loro propagazione.

Consideriamo ora una lamina di area A a una distanza r dalla sorgente e perpendicolare alla direzione di propagazione della luce emessa dalla sorgente (vedi Fig. 4.2). Se nell'unità di tempo colpiscono la lamina N particelle, allora N/A particelle colpiranno una superficie di area unitaria.

Come si può vedere nella Fig. 4.2, le particelle che attraversano la lamina di area A alla distanza r colpiscono una lamina di area $4A$ alla distanza $2r$. Quindi, il numero di particelle che urtano contro una parte di area unitaria di questa lamina sarà $N/4A$, ossia $1/4$ del numero di particelle presenti alla distanza r e ciò significa che l'intensità di illuminazione alla distanza $2r$ sarà $1/4$ dell'intensità di illuminazione alla distanza r .

Analogamente, alla distanza $3r$ l'intensità di illuminazione sarà $1/9$ e alla distanza $4r$ sarà $1/16$ dell'intensità alla distanza r .

Da questo si deduce che il modello corpuscolare prevede che l'intensità di illuminazione I sia inversamente proporzionale al quadrato della distanza r dalla sorgente.

Si ha quindi:

$$I = \frac{k}{r^2}$$

in accordo con i dati sperimentali.

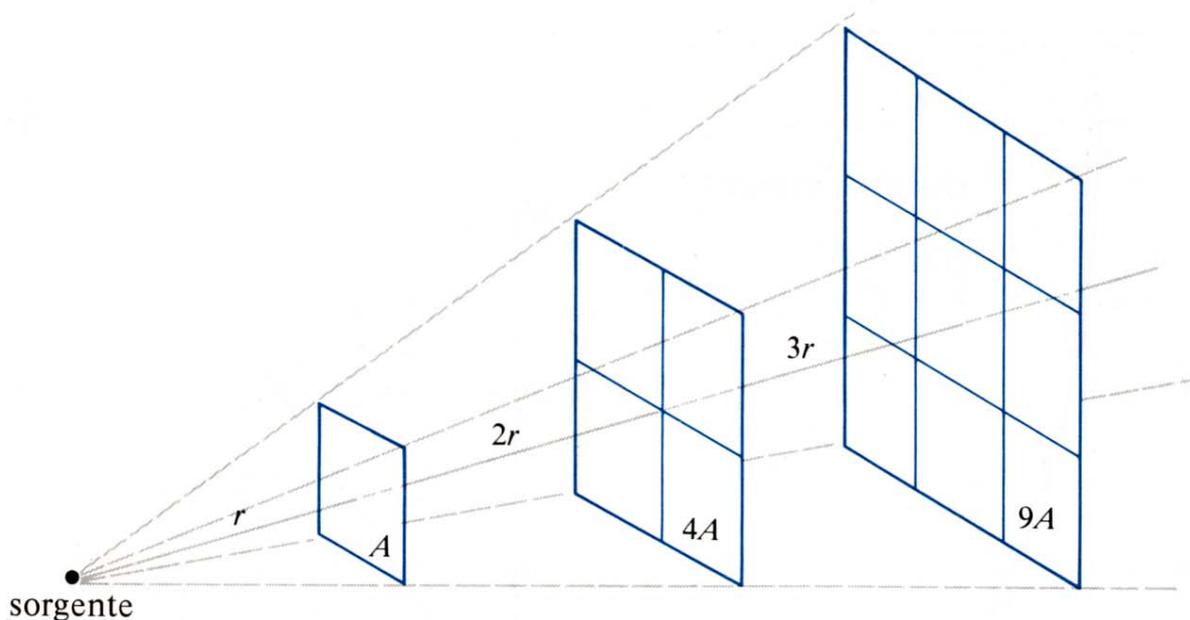


Fig. 4.2. Lo stesso numero di corpuscoli che colpiscono la lamina di area A alla distanza r colpiscono la lamina di area $4A$ alla distanza $2r$ e la lamina di area $9A$ alla distanza $3r$.

4.3. Pressione della luce

Quando siamo colpiti da una palla da baseball o da un sasso avvertiamo una spinta. Le spinte esercitate dalle minuscole molecole di un gas che urtano contro le pareti di un recipiente o sulla nostra pelle sono la causa della pressione del gas. Chiediamoci ora se anche i corpuscoli di luce che urtano su uno specchio danno luogo a una pressione. Il modello corpuscolare della luce suggerisce che deve essere così. Purtroppo però la teoria corpuscolare sviluppata sino a questo punto non è abbastanza particolareggiata da darci la possibilità di prevedere il valore della pressione esercitata da una certa corrente di corpuscoli di luce.

Ma anche senza questa conoscenza particolareggiata ci rendiamo conto che, se la luce esercita una pressione, questa per un ordinario fascio di luce deve essere molto piccola. Non riusciamo certo a muovere nemmeno una piuma anche se accendiamo una luce brillante. Anche esperimenti condotti con strumenti raffinati fallirono nel tentativo di rivelare l'esistenza della pressione della luce; finché, al principio del nostro secolo, Pietro Lebedev in Russia, Nichols e Hull negli Stati Uniti, riuscirono a rilevarla e a misurarla. Questa pressione è molto piccola ma non tutte le pressioni dovute alla luce sono così piccole. L'aumento della pressione della luce all'aumentare dell'intensità d'illuminazione, previsto dalla teoria corpuscolare è stato sperimentalmente verificato: sulla superficie del Sole, per esempio, la pressione della luce è parecchi ordini di grandezza più grande di quella che si ha sulla Terra, e sulla superficie di alcune stelle la pressione della luce ha un valore enorme.

4.4. Assorbimento e riscaldamento

Un corpo che rifletta bene la luce non si riscalda apprezzabilmente se viene esposto alla luce del Sole, mentre una superficie scura, assorbente, può diventare abbastanza calda. La sporcizia che viene spalata da un marciapiede, insieme con la neve dopo una nevicata, si trova, alla ricomparsa del Sole, affondata nella neve. Poiché è scura e quindi buona assorbente si riscalda e fonde la neve sottostante più rapidamente di quanto non fonda da sola la neve bianca e riflettente.

Può il modello corpuscolare dar ragione di ciò? Quando i corpuscoli non vengono né riflessi né trasmessi da una sostanza, essi debbono fermarsi. Quando un pezzo di sostanza è colpito da corpuscoli che non la attraversano e non rimbalzano, la sostanza si riscalda? È facile dimostrare che tale riscaldamento è reale se mettiamo un martello al posto dei corpuscoli, e un pezzo di piombo al posto della sostanza assorbente. Battendo il piombo con una serie di rapidi colpi (simili ad una serie di corpuscoli che colpiscono il piombo) trovate che il martello non rimbalza (i corpuscoli non vengono riflessi) e il piombo si

riscalda. Per verificare che questo riscaldamento non è un effetto che si ottiene con qualsiasi bombardamento corpuscolare potete ripetere l'esperimento usando un pesante pezzo di acciaio. Il martello ora rimbalza ad ogni colpo (esso viene riflesso), e l'acciaio non si riscalda. Se i corpuscoli di luce si comportano come quelli di materia ordinaria, è logico pensare che essi riscaldino qualunque sostanza dalla quale vengono fermati. La teoria corpuscolare concorda pertanto col fatto che le sostanze si riscaldano quando assorbono luce, e col fatto che le sostanze che riflettono o trasmettono tutta la luce non si riscaldano.

La maggior parte delle sostanze riflettono una certa quantità di luce che le colpisce, e ne possono trasmettere parte. Come possiamo estendere il modello corpuscolare in modo da poter considerare una sostanza che rifletta specularmente alcuni corpuscoli e altri ne assorba dallo stesso fascio di luce? Possiamo immaginare che la sostanza contenga piccole zone che fermano i corpuscoli, riscaldandosi, frammiste a zone che li riflettono e che quindi non si riscaldano. Anche i migliori corpi riflettenti, quali gli specchi, si riscaldano un poco quando vengono esposti al Sole, per cui anche la superficie di uno specchio deve contenere, sparse qua e là, zone assorbenti. Una sostanza trasparente, come il vetro, deve avere anch'essa alcune zone assorbenti giacché possiamo osservare una leggera diminuzione dell'intensità luminosa quando il fascio di luce passa attraverso il vetro. Inoltre come era prevedibile, anche il vetro, in realtà, si riscalda un poco.

4.5. Riflessione

Sappiamo che la luce, quando colpisce una superficie, viene da questa riflessa. Avviene la stessa cosa nel caso di corpuscoli quali sferette di acciaio? Per rispondere a tale domanda basta semplicemente lanciare alcune sferette come quelle dei cuscinetti a sfere, contro diverse superfici. Se le lanciamo contro una lastra di acciaio levigato e pulito, esse rimbalzano regolarmente con un angolo di riflessione approssimativamente uguale all'angolo di incidenza (Fig. 4.3).

Le traiettorie d'incidenza e di riflessione giacciono in un piano normale alla superficie, e la velocità della pallina, dopo l'urto contro la superficie, è all'incirca uguale a quella che aveva prima dell'urto. Se però le palline, o le superfici levigate, non sono così elastiche come l'acciaio, l'uguaglianza tra gli angoli di incidenza e quelli di riflessione non si verifica; inoltre la velocità delle palline dopo la riflessione è diminuita, a differenza quanto accade per la luce la cui velocità non varia a causa della riflessione. Per spiegare la riflessione speculare della luce da parte di superfici levigate, occorre pertanto supporre che il corpuscolo di luce si rifletta, come farebbero sferette ideali di acciaio rimbalzanti su superfici elastiche. Se limitiamo il modello corpuscolare a questi corpuscoli elastici e a superfici che siano elastiche per tali corpuscoli di luce, esso può spiegare la riflessione speculare in modo del tutto soddisfacente.

Il modello corpuscolare può anche spiegare il fatto che talvolta la luce è riflessa in modo diffuso. La Fig.4.4 mostra come ciò avviene. I singoli corpuscoli rimbalzano con angoli di incidenza uguali agli angoli di riflessione, ma se la superficie è scabra i corpuscoli riflessi si muoveranno in varie direzioni, e la

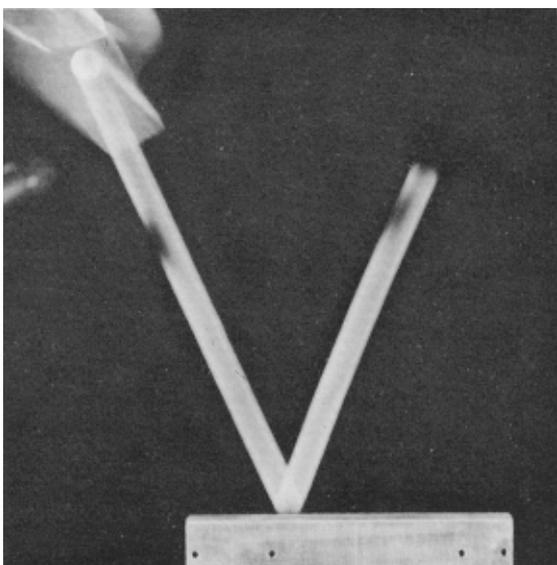


Fig. 4.3. Fotografia a lunga posa di una palla riflessa da una lastra di acciaio. L'angolo di riflessione eguaglia l'angolo d'incidenza.

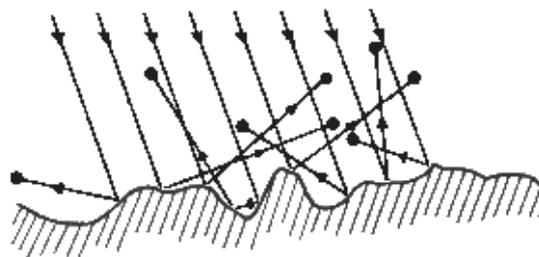


Fig. 4.4. Riflessione diffusa di corpuscoli. Si verifica quando una superficie ha irregolarità di dimensioni maggiori di quelle dei corpuscoli.

superficie, nel suo insieme, li rifletterà in modo diffuso. Potremmo chiederci quanto liscia deve essere una superficie «liscia» perché si abbia una perfetta riflessione speculare. La risposta è che le asperità della superficie debbono essere molto piccole rispetto alle dimensioni delle particelle che la colpiscono. Una superficie che appare abbastanza levigata per la riflessione di sferette d'acciaio, può risultare molto scabra per la riflessione dei corpuscoli di luce. Ecco perché i metalli debbono essere perfettamente levigati prima di poter diventare buone superfici speculari.

4.6. Rifrazione

Il nostro modello corpuscolare della luce è in grado di spiegare la rifrazione altrettanto bene come la riflessione? Nella rifrazione i corpuscoli di luce che passano dall'aria in una sostanza rifrangente subiscono una deviazione. È possibile ideare un esperimento in cui le sferette d'acciaio vengono deviate allo stesso modo?

Supponiamo che una sferetta rotoli su una superficie orizzontale, poi per un tratto di ripida discesa e infine su una superficie orizzontale a livello inferiore. Sul piano superiore la sferetta rotola in linea retta e a velocità costante. Supponiamo che questo piano corrisponda alla regione dell'aria attraverso cui un corpuscolo di luce si muova in linea retta e a velocità costante. Quando la sferetta giunge nel tratto in ripida discesa viene sospinta in modo da avvicinarsi alla perpendicolare allo spigolo del piano inclinato: questo perciò può essere considerato come la superficie di un mezzo rifrangente, quale, ad esempio, il vetro. Dobbiamo supporre quindi che su questa superficie i corpuscoli di luce ricevano una spinta perpendicolarmente alla linea di separazione e diretta verso l'interno del vetro. Per capire che cosa succede ai corpuscoli all'atto del loro passaggio attraverso questa regione, basta soltanto guardare la fotografia della Fig.4.5, che mostra la sferetta mentre rotola sul piano inclinato. Si vede che essa varia la propria velocità in direzione perpendicolare allo spigolo e che la sua traiettoria ha cambiato direzione. Se la sferetta che rotola sulla superficie superiore incontra il piano inclinato con un certo angolo, rotola giù dalla rampa sulla superficie inferiore secondo una direzione diversa, più vicina alla normale. Allo stesso modo la luce che passa attraverso una superficie sulla quale riceve una spinta verso l'interno della sostanza rifrangente dovrebbe subire una variazione di velocità e quindi deviare verso la normale. Il piano a livello inferiore corrisponde all'interno della sostanza rifrangente. Su tale piano la sferetta rotola di nuovo a velocità costante secondo una linea retta, come la luce nell'interno del vetro.

Possiamo servirci del modello della sferetta che rotola per studiare la relazione esistente tra angoli di rifrazione e angoli di incidenza. Se la rifrazione è causata da una spinta che si verifica quando la luce passa dall'esterno all'interno del mezzo rifrangente, la relazione che troviamo con il modello della sferetta che rotola dovrebbe essere valida anche per la luce. Per studiare ciò che accade secondo il nostro modello facciamo rotolare le sferette sul piano superiore sempre alla stessa velocità, perché nel vuoto le particelle di luce viaggiano sempre alla stessa velocità. Misure eseguite per molte coppie di angoli mostrano che la rifrazione delle sferette concorda con la legge di Snell:

$$\sin \theta_s / \sin \theta_i = \text{costante}$$

dove θ_s , è l'angolo compreso tra la traiettoria della sferetta sul piano superiore e la normale allo spigolo del piano inclinato, e θ_i è l'angolo corrispondente sul piano inferiore. Inoltre la costante della legge di Snell dipende dalla differenza d'altezza tra i due piani orizzontali e dalla velocità con cui si muove la sferetta. Quanto più grande è la differenza d'altezza, a parità di velocità iniziale, tanto più grande è l'indice di rifrazione: quanto più grande è la velocità iniziale, a parità di differenza d'altezza, tanto più piccolo è l'indice. Usando sempre la stessa velocità iniziale e servendoci di piani orizzontali posti a differenti altezze, possiamo costruire i modelli relativi a sostanze di differenti indici di rifrazione. Per esempio, per avere il modello relativo alla rifrazione della luce nel passaggio dall'aria all'acqua occorre che la differenza d'altezza fra i piani orizzontali sia minore di quella necessaria per il modello relativo al passaggio della luce dall'aria al vetro. In ciascun caso, si trova che il modello della sferetta

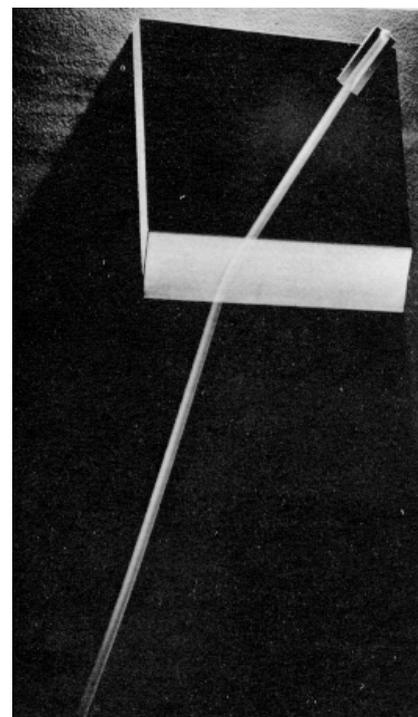


Fig. 4.5. Fotografia a lunga posa di una sferetta rotolante da un piano più alto a uno più basso. Il cambiamento di direzione della pallina indica una «rifrazione».

che rotola dà come risultato la legge di Snell, e regolando le altezze, si può realizzare qualsiasi indice di rifrazione.

Discutendo il modello della sferetta che rotola all'ingiù non intendiamo dire che la luce è composta di sferette che rotolano. Il punto essenziale di questo modello (che venne escogitato da Sir Isaac Newton per spiegare le leggi della rifrazione) risiede nel fatto che la rifrazione può essere spiegata ammettendo che i corpuscoli di luce ogni volta che incidono sulla superficie di separazione di una sostanza rifrangente ricevano una spinta verso l'interno del mezzo. Questa idea è plausibile. Internamente ad un pezzo di vetro o altra sostanza rifrangente, un corpuscolo di luce è totalmente circondato dallo stesso materiale e non riceve spinte in alcuna direzione particolare; alla superficie però la situazione è ovviamente diversa, può verificarsi benissimo una spinta o una attrazione verso l'interno. Allora, se la spinta agisce come nel modello della sferetta che rotola, si riesce a spiegare la rifrazione.

Fino a questo punto il nostro modello è soddisfacente per cui pensiamo di continuare a esaminarlo. Mediante fotografie multiframe possiamo trovare la relazione tra la velocità che una sferetta assume sul piano superiore e quella sul piano inferiore (Fig. 4.6). In queste fotografie multiframe, ogni immagine della sferetta è presa a intervalli brevi di tempo fra loro uguali; la distanza fra un'immagine e la successiva dà perciò una misura della velocità della sferetta. Quando la velocità è bassa, le immagini della sferetta sono fra loro più vicine, quando la velocità è maggiore le immagini sono più lontane. Analizzando molti percorsi diversi di sferette che giungono al piano inclinato con angoli diversi, si vede che, per lo stesso valore v_s sul piano superiore, le sferette acquistano sempre una velocità ben definita v_i sul piano inferiore. L'angolo d'incidenza sul bordo del piano inclinato non influenza v_i . Inoltre, misure eseguite su fotografie multiframe come quelle della Fig. 4.6 mostrano che gli angoli e le velocità sono legati dalla relazione:

$$\frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_i} = \frac{v_i}{v_s}$$

La legge di Snellius - Cartesio è pertanto valida, e l'indice di rifrazione deve essere v_i/v_s . Dalle velocità v_s e v_i ottenute dalle fotografie, e dalla misura degli angoli, otteniamo una controprova della validità del modello.

Possiamo inoltre far rotolare le sferette dal piano inferiore a quello superiore, con velocità iniziale v_i . Troviamo allora, come era prevedibile, che tutto è reversibile. Le sferette arrivano sul piano superiore con velocità v_s , e la legge di Snell è valida anche per il cammino inverso, così come lo è per la luce.

Possediamo allora un modello corpuscolare della rifrazione, e, come di solito succede quando si ha un modello, esso ci suggerisce molti esperimenti. Per esempio, il modello ci dice che la velocità della luce in una sostanza rifrangente è indipendente dall'angolo di incidenza, ed è maggiore della velocità della luce nel vuoto. Dovremmo quindi effettuare misure della velocità della luce nelle sostanze rifrangenti e in particolare dovremmo verificare se rispettano la relazione:

$$\frac{v_m}{c} = n_m$$

dove v_m è la velocità della luce nel mezzo rifrangente, c la velocità della luce nel vuoto, e n_m l'indice di rifrazione del mezzo. Discuteremo tali misure nel paragrafo 4.8. Dovremmo anche assicurarci che la velocità della luce nel vuoto non dipenda da vicende precedentemente subite dalla luce. Secondo il modello qui discusso la velocità di un corpuscolo di luce diminuisce nel passaggio da un mezzo rifrangente al vuoto, di tanto quanto essa aumenta nel passaggio dal vuoto al mezzo. La costanza della velocità della luce nel

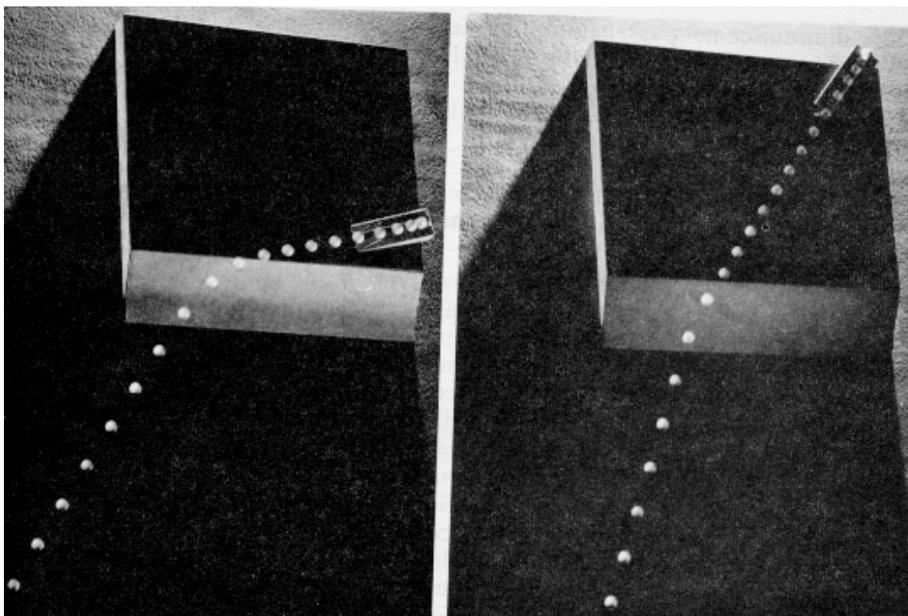


Fig. 4.6. Due fotografie multiframe della sferetta mostrata nella Fig. 4.5. La velocità sul piano superiore è la stessa in entrambe le fotografie, giacché la sferetta viene ogni volta rilasciata dalla stessa altezza. Si noti che anche le velocità sul piano inferiore sono le stesse, sebbene nelle due fotografie gli angoli di incidenza non siano gli stessi.

vuoto, indipendentemente dalla sua provenienza, costituisce una verifica di questo modello corpuscolare della rifrazione.

4.7. Alcune difficoltà con il modello corpuscolare

È possibile costruire, come abbiamo visto, un modello corpuscolare della luce in grado di spiegare la riflessione speculare e quella diffusa, la legge di Snell sulla rifrazione, e di condurre alla legge dell'inverso del quadrato della distanza, relativa alla variazione dell'intensità d'illuminazione al variare della distanza. Tale modello suggerisce anche che la luce esercita una pressione, e che l'assorbimento di luce dovrebbe essere accompagnato da riscaldamento. Entrambi questi effetti non discussi in precedenza sono stati rivelati sperimentalmente, e costituiscono un esempio di come un modello possa condurci a nuove indagini. Il modello descrive coerentemente molte cose che già conosciamo, fornendoci un quadro entro cui far rientrare le nostre conoscenze. Suggerisce inoltre che dovrebbero succedere altre cose di cui potevamo non avere alcuna idea. Ci fornisce cioè un indizio di qualche cosa altrimenti inaspettata, perché, come nel caso della pressione esercitata dalla luce, il modello contiene anche ciò che non immaginavamo. Possiamo quindi verificare il modello, confrontando quello che esso suggerisce con i fatti della natura. Finora, col nostro modello della luce le cose sono andate molto bene. Esistono punti in cui questo modello corpuscolare ha minor successo? Vi sono aspetti nel comportamento della luce insufficientemente descritti o in conflitto con tale modello? Osserviamo più attentamente quel che accade quando la luce è rifratta. Pur sapendo spiegare col modello corpuscolare la rifrazione e la riflessione separatamente, è possibile dar ragione del fatto che esse sussistono entrambe quando un fascio di luce colpisce la superficie di una sostanza rifrangente? Secondo il nostro modello, per dare riflessione speculare, la superficie rinvia i corpuscoli di luce in una direzione; per dare rifrazione, li rinvia in direzione praticamente opposta: come fa la superficie a decidere in quale direzione inviare i corpuscoli di luce? Newton si arrovellò con tale problema e tentò di spiegare la parziale riflessione e la parziale rifrazione supponendo che i corpuscoli di luce avessero proprietà variabili periodicamente nel tempo. Quel che accade a un corpuscolo dipende allora, diceva Newton, dall'istante in cui esso colpisce la superficie.

Un altro tentativo per spiegare la separazione del fascio di luce in riflesso e rifratto potrebbe consistere nell'immaginare che la superficie sia divisa in piccole zone riflettenti e piccole zone rifrangenti. Ognuna di queste due estensioni del modello porterebbe all'esistenza di un rapporto ben definito tra riflessione e rifrazione, ma entrambe incontrano difficoltà perché il rapporto tra quantità di luce rifratta e quantità di luce riflessa decresce all'aumentare dell'angolo di incidenza. A questa difficoltà si potrebbe forse ovviare, ma allora il modello diventa complicato, e quando un modello richiede troppe modifiche, lo si guarda con sospetto.

Difficoltà ancora maggiori sorgono se tentiamo di spiegare la diffrazione. Non sembra, per esempio, che si possa trovare una semplice spiegazione, di carattere corpuscolare, per la complicata figura di diffrazione che si osserva quando la luce passa attraverso un piccolo forellino (Fig. 1.19) e per la riflessione da una sottilissima pellicola trasparente. Inoltre, come vedremo nel paragrafo seguente, sorgono difficoltà anche in relazione alla velocità della luce.

4.8. La velocità della luce e la teoria della rifrazione

Secondo la teoria corpuscolare, la velocità v_m della luce in un mezzo rifrangente dovrebbe essere maggiore della velocità c della luce nel vuoto. Nel paragrafo 4.6, abbiamo trovato la relazione $v_m = n_m \cdot c$; dove n_m è l'indice di rifrazione. Questo è un risultato quantitativo ottenuto dal modello che possiamo controllare se siamo in grado di misurare la velocità della luce su una breve distanza, per esempio all'interno di un recipiente pieno d'acqua.

Ai tempi di Newton, tale misura non era possibile. La prima misura della velocità della luce su una distanza misurata sulla Terra fu fatta da Fizeau (1849). Il suo metodo di misura fu basato sull'intercettazione di un fascio di luce mediante un disco rotante munito di un foro. Supponete di dirigere un fascio di luce verso il foro; ogni volta che il foro del disco rotante intercetta il fascio, piccoli lampi di luce lo attraversano. Facciamo in modo che questi lampi colpiscano uno specchio e siano riflessi di nuovo verso il disco (Fig. 4.7). Nel viaggio di ritorno, un fascio di luce può passare attraverso il disco solo se il forellino del disco si trova di nuovo nella posizione giusta. Con un disco munito di un singolo foro il disco deve ruotare di almeno un giro completo nello stesso intervallo di tempo in cui la luce arriva allo specchio e ritorna. Misurando la velocità di rotazione del disco quando la luce riesce a passare nei due sensi, possiamo

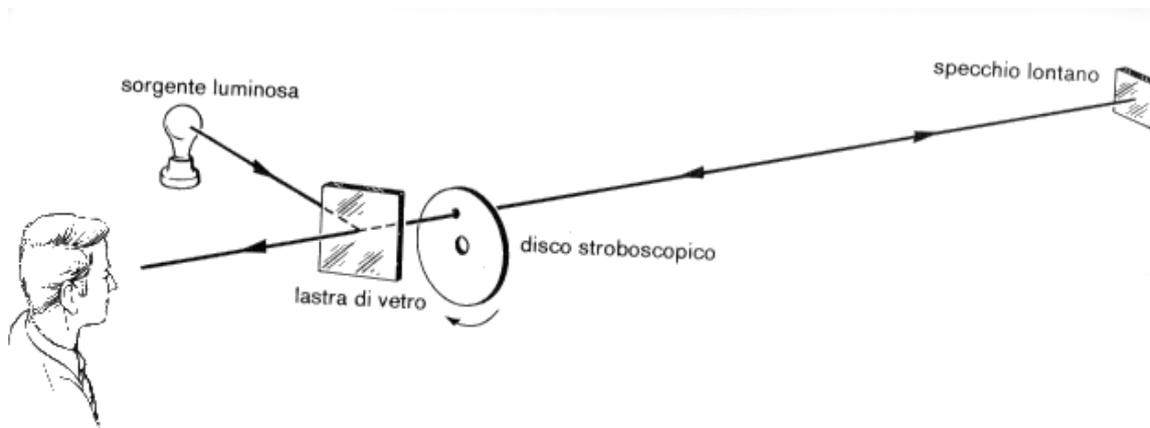


Fig. 4.7. Misura di velocità di un impulso luminoso mediante un disco rotante. La luce della sorgente riflessa da una lastra di vetro perviene a uno specchio distante attraverso il foro di un disco rotante. L'impulso luminoso di ritorno arriva all'occhio di un osservatore attraverso il disco e la lastra di vetro

risalire al tempo impiegato dalla luce a percorrere la distanza nota dal disco allo specchio e ritorno. In tal modo misuriamo la velocità di propagazione della luce.

Mediante la realizzazione di un disco speciale ad alta velocità dotato di molti fori, Fizeau riuscì a misurare la velocità della luce nell'aria. Altri fisici, tra cui il francese Cornu, perfezionarono il metodo di Fizeau. Il disco di Cornu aveva 200 fori e poteva compiere 54000 giri al minuto. Aumentando la velocità da zero al massimo, egli misurò 28 periodi di oscurità e i successivi lampi della luce rinviata da uno specchio collocato a 23 chilometri di distanza. Usando uno specchio rotante invece del disco, Foucault in Francia, e più tardi Michelson negli Stati Uniti, aumentarono ulteriormente la precisione di queste misure (Fig. 4.8). Michelson fu capace di determinare la velocità della luce con una precisione di circa 3 km/s (1 parte su centomila). Per questa misura di precisione Michelson usò una distanza molto grande. Ma lo stesso metodo può servire, su distanza più corta, per trovare la velocità della luce nei liquidi, ad esempio l'acqua, sebbene con precisione minore. Nel 1862 Foucault misurò la velocità della luce nell'acqua e trovò che era molto vicina al valore di 2.23×10^8 m/s. Tale valore è circa uguale ai tre quarti del valore della velocità della luce nell'aria. Alcuni anni dopo, Michelson determinò la velocità della luce nel solfuro di carbonio, un liquido con indice di rifrazione uguale a 1.63 e trovò il valore di 1.71×10^8 m/s.

Di fronte a questi risultati la teoria corpuscolare della luce incontra difficoltà. Per spiegare la legge di Snell, fummo costretti a supporre che la velocità della luce nelle sostanze rifrangenti fosse maggiore che nel vuoto. Usando il modello corpuscolare di Newton abbiamo ottenuto $v_{\text{acqua}} = n_{\text{acqua}} \cdot c$; conseguentemente, secondo il modello corpuscolare la velocità nell'acqua dovrebbe essere circa 4/3 di quella nell'aria; e nel solfuro di carbonio, 5/3 di quella nell'aria. I valori misurati sono invece circa uguali a 3/4 e 3/5 rispettivamente, della velocità nell'aria. Quindi non solo gli esperimenti non hanno fornito i rapporti che ci attendevamo ma hanno rivelato che tali rapporti sono inversi. Il modello corpuscolare della luce sembra fallire.

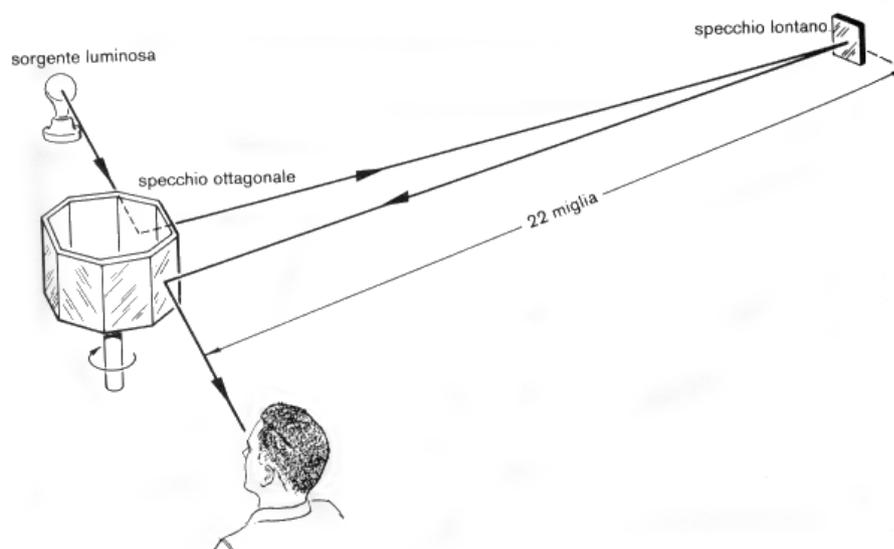


Fig. 4.8. Michelson, nel suo esperimento, fece riflettere la luce da uno specchio ottagonale rotante. Con questa apparecchiatura egli effettuò misure molto precise della velocità della luce.

4.9. La situazione del modello corpuscolare

In questo capitolo abbiamo cercato di elaborare un modello della luce basato sul comportamento di corpuscoli. Questo tentativo ha avuto successo finché abbiamo considerato soltanto *alcuni* fenomeni ottici di cui eravamo al corrente, e fintantoché non abbiamo richiesto un accordo preciso e quantitativo tra le previsioni del modello e i risultati sperimentali. Ma quando abbiamo voluto includere tutti i fenomeni e abbiamo preteso una verifica quantitativa, allora il modello è venuto meno per diversi importanti aspetti. E se il nostro modello corpuscolare della luce non funziona, deve essere o abbandonato o modificato.

Ci troviamo quindi in una situazione simile a quelle in cui spesso si trovano i fisici. Di tanto in tanto un modello che riesce a interpretare un intero gruppo di risultati sperimentali non è in grado di spiegare una nuova osservazione. Allora il modello deve essere modificato, o abbandonato ricominciando a cercarne un altro diverso. Tuttavia è quasi sempre vero che gli sforzi spesi sul vecchio modello non vanno perduti. Il modello è servito a due scopi: ha mostrato che alcuni dei fatti osservati possono essere collegati l'uno all'altro e ha suggerito nuovi esperimenti. Il modello corpuscolare della luce, che qui appare insoddisfacente, ha avuto un ruolo molto importante nella storia della fisica e contribuisce tuttora alla comprensione della natura della luce. Ma di ciò parleremo ulteriormente nell'ultima parte del corso; per il momento mettiamolo da parte e tentiamo con un modello diverso.

Problemi di fine capitolo

-
- 4.1. Come potete controllare se diverse sorgenti luminose sono uguali?
- 4.2. Supponendo che l'indice di un fotometro segni 1 unità quando è posto distanza r da una lampada. A quale distanza dalla stessa sorgente, l'indice dello strumento segnerà 2 unità?
- 4.3. Che cosa prevede la teoria corpuscolare a proposito dell'intensità di illuminazione prodotta da una sorgente di luce *estremamente* debole, così debole, che soltanto pochi corpuscoli al secondo vengono emessi? Come potreste verificare tale previsione?
- 4.4. Una sorgente di 40 candele posta a tre metri da un fotometro, dà, sulla scala di questo, lo stesso valore di una sorgente incognita situata a 1.2 metri dal fotometro.
 (a) Qual è l'intensità luminosa della sorgente incognita ?
 (b) Qual è l'intensità d'illuminazione, in cd/m^2 , letta sul fotometro?
- 4.5. Una lampada viene osservata da due distanze diverse e appare in un caso 2 volte più luminosa dell'altro. Determinare il rapporto tra le due distanze di osservazione.
- 4.6. Su quale di questi oggetti la luce esercita la pressione maggiore: un pezzo di vetro trasparente o uno specchio?
- 4.7. Perché un tavolo da ping-pong deve avere una superficie più levigata del pavimento di un campo di pallacanestro?
- 4.8. L'indice di rifrazione del bisolfuro di carbonio è circa 1.63. Quale dovrebbe essere la velocità della luce in questo liquido secondo il modello corpuscolare della rifrazione?
- 4.9. La velocità della luce, misurata un certo mezzo è 2×10^8 m/s.
 (a) Secondo il modello corpuscolare della luce, quale dovrebbe essere l'indice di rifrazione di questo mezzo?
 (b) Usando il valore dell'indice di rifrazione ricavato nella parte (a), quale potrebbe essere il tragitto di un raggio luminoso che passa dall'aria al mezzo con un angolo di incidenza di 30° ?
- 4.10. Di quando in quando nel cielo avviene l'esplosione di una stella e nasce, come si dice, una supernova: la stella diventa all'improvviso molte volte più brillante di prima. Come è noto, le stelle sono così distanti che la luce che emettono impiega molti anni per raggiungere la Terra. Un'esplosione che si osserva deve essere avvenuta molto tempo prima, e la luce da quel momento ha continuato a viaggiare verso la Terra. L'esplosione è vista come una luce bianca brillante, non come una serie di colori diversi che arrivano in istanti diversi.
 (a) Che cosa indica questo fatto, riguardo alla velocità della luce dei differenti colori nel vuoto?
 (b) Provate a proporre un modello corpuscolare che spieghi la dispersione nei prismi e che sia compatibile con una velocità unica della luce di tutti i colori nel vuoto.
- 4.11. Abbiamo detto che i corpuscoli luce devono essere piccolissimi. Suggeste un esperimento per dimostrare che essi devono anche avere una massa estremamente piccola.
- 4.12. Perché la misura della velocità della luce nell'acqua solleva dubbi sulla validità del modello corpuscolare?

- 4.13.** Una diapositiva viene proiettata su uno schermo situato ad 8 m dalla lente del proiettore. Sapendo che l'immagine viene ingrandita 15 volte stabilire:
- (a) la distanza della diapositiva dalla lente;
 - (b) la lunghezza focale della lente;
 - (c) se l'immagine sarà reale o virtuale, diritta o capovolta.
- 4.14.** Completare la tabella a lato relativa alle intensità di illuminazione a distanze diverse da una sorgente luminosa puntiforme.
- 4.15.** Una lampada viene osservata da due distanze diverse e appare in un caso 8 volte più luminosa di un'altra. Determinare il rapporto tra le due distanze di osservazione.
- | r (m) | I (cd/m ²) |
|---------|--------------------------|
| 1.20 | |
| 0.85 | 1.8 |
| 0.50 | |
- 4.16.** Una prima lampada, avente una certa intensità luminosa, illumina un foglio di carta bianca posto ad 1m di distanza. A quale distanza del foglio si deve mettere una seconda lampada, avente una intensità luminosa 3 volte più grande, per ottenere lo stesso illuminamento sul foglio?
- 4.17.** Due sorgenti di luce S_1 e S_2 sono poste alla distanza di 1.00 metri. Se S_1 corrisponde ad una lampadina-campione ed S_2 corrisponde a due lampadine-campione, dove collochereste uno schermo in modo che l'intensità d'illuminazione sia uguale su entrambe le parti?
-