

Lezione 33: La luce è fatta di corpuscoli

33.1. La riflessione della luce

Nella scorsa lezione abbiamo descritto la luce partendo dal presupposto che si tratti di un'onda. In questa lezione partiremo invece dal presupposto che sia fatta di microscopici corpuscoli che viaggiano nello spazio. A dire il vero tutti i fenomeni che stiamo per descrivere si interpretano altrettanto bene a partire dal modello ondulatorio, ma l'interpretazione corpuscolare è certamente più semplice, quindi più immediata a comprendersi. Nella prossima figura vediamo come avviene la riflessione di un oggetto da parte di uno specchio piano (► fig.33.1)

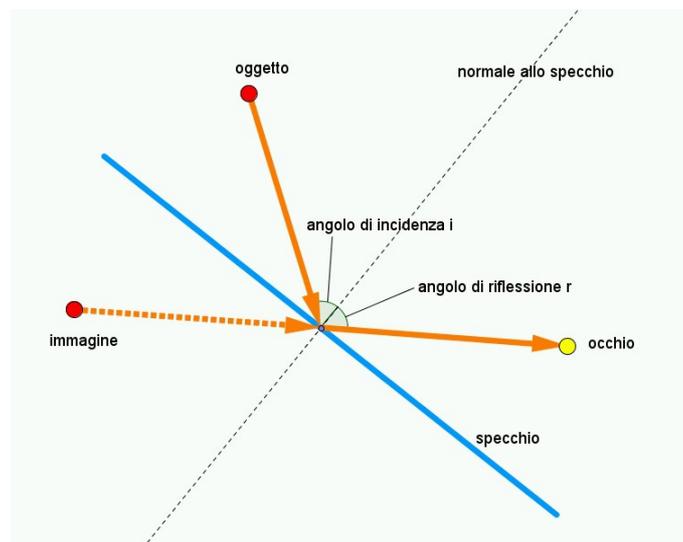


Fig.33.1 Un raggio luminoso incide su uno specchio piano

La figura mostra un raggio luminoso che incide su uno specchio e ne viene riflesso. È facile interpretare un raggio luminoso come composto da una miriade di microscopiche particelle che viaggiano in linea retta, lungo traiettorie parallele molto vicine tra loro. Un modello particolarmente semplice lo si ottiene assumendo che tutte le particelle viaggino lungo *la stessa* retta. Nell'incontrare la superficie dello specchio, il raggio luminoso viene riflesso in modo che l'angolo di riflessione sia uguale all'angolo di incidenza. Ma questo è proprio il comportamento di una palla da biliardo che scontra una sponda, o di una molecola di gas che urta una parete del recipiente.

L'occhio e il cervello che ne elabora i segnali, abituati al fatto che la luce viaggia in linea retta, interpretano il raggio come se provenisse da una fonte che si trovi *al di là* dello specchio: oggetto ed immagine, quindi, sono simmetrici rispetto allo specchio.

33.2. Un principio di minimo

Perché l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza? Perché non si verifica, ad esempio, una situazione come quella descritta nella prossima figura (► fig.33.2), in cui l'angolo di riflessione è decisamente più piccolo di quello di incidenza?

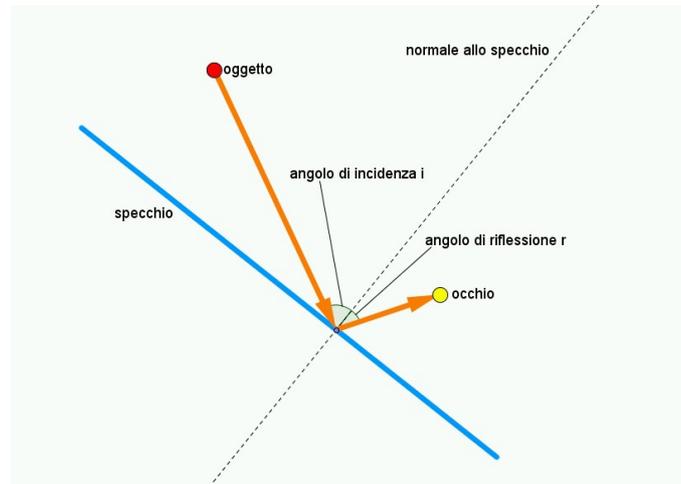


Fig.33.2 e perché non così?

Possiamo rispondere con un'alzata di spalle, e dire che, semplicemente, il mondo è fatto proprio così, e non diversamente. Oppure possiamo cercare un principio di carattere ancor più generale, che ci spieghi perché le cose vanno in un modo piuttosto che in un altro. Per fortuna un principio più generale c'è per davvero:

la luce, nel viaggiare da un qualunque punto iniziale A ad un qualunque punto finale B, sceglie il cammino che le permette di arrivare nel tempo minore

Se lungo il cammino non ci sono ostacoli, il tragitto più rapido deve corrispondere al cammino più corto: ecco perché la luce viaggia in linea retta da A a B. Se il tragitto da A a B deve passare attraverso uno specchio, di nuovo il cammino deve essere il più corto possibile. Ecco perché non si verifica la situazione descritta nella figura 33.2: il cammino in questione è più lungo, quindi richiede più tempo, rispetto al cammino descritto in figura 33.1. Anzi, il cammino della prima figura, è quello di *lunghezza minima* per andare dalla posizione dell'oggetto a quella dell'occhio. Questo fatto è del tutto intuitivo, ma se siete interessati ad una dimostrazione formale la trovate nell'approfondimento allegato a questa lezione.

33.3. La rifrazione della luce

Ora prendiamo in esame una situazione più complicata. La luce, per andare da A a B, deve attraversare la superficie di separazione tra due mezzi, e la velocità con cui si propaga è diversa nei due mezzi. La situazione è quella descritta nella prossima figura (► fig.33.3). Il fenomeno che si osserva si chiama rifrazione della luce.

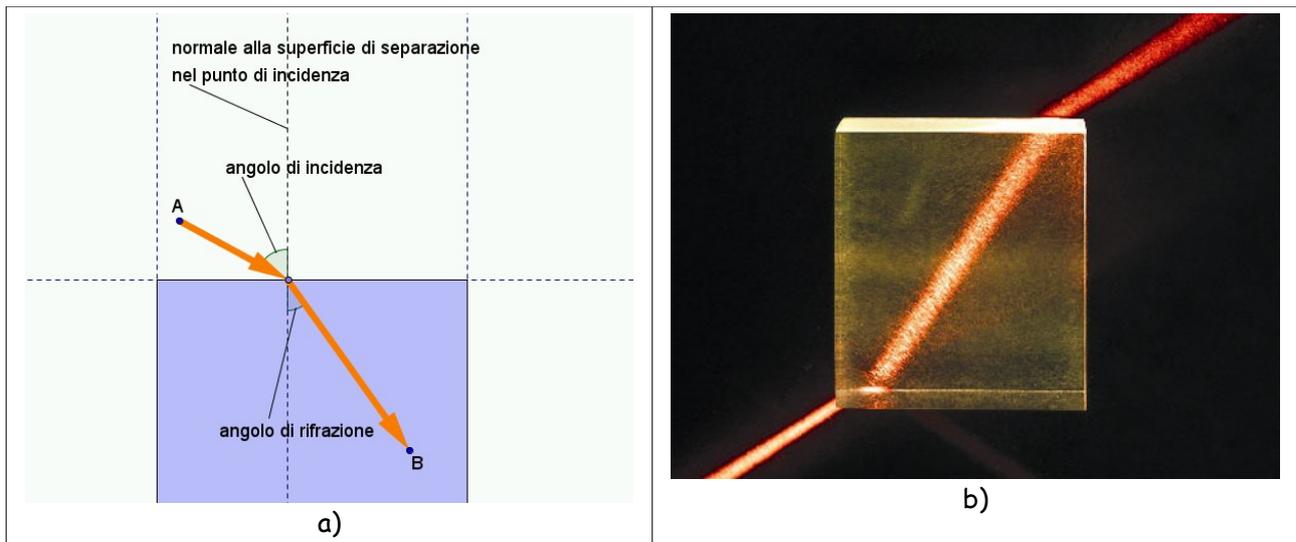


Fig.33.3 Il fenomeno della rifrazione della luce: a) un modello geometrico b) un esempio reale

Il raggio luminoso, nel suo cammino da A a B, incontra la superficie che separa due mezzi, per esempio l'aria e l'acqua in a), oppure l'aria il vetro in b). Si dà il caso che la velocità di propagazione della luce sia inferiore, nell'acqua e nel vetro, rispetto alla velocità di propagazione nell'aria. Quello che accade è che il raggio luminoso si avvicina alla normale alla superficie di separazione nel punto di incidenza. L'angolo di rifrazione è più piccolo dell'angolo di incidenza. La spiegazione del fenomeno è ovvia, se pensiamo al principio di minimo che abbiamo esposto nel paragrafo precedente: la luce cerca di minimizzare il tempo necessario per andare da A a B! Per farlo deve ridurre in modo opportuno il tratto percorso nel mezzo in cui è più lenta. Nella parte b) della figura vediamo che vale anche il viceversa: nel passare in un mezzo in cui è più veloce (cioè dal vetro all'aria) il raggio di luce si allontana dalla normale.

La legge che descrive il fenomeno è la seguente:

$$\sin(i) / \sin(r) = v_i / v_r$$

dove abbiamo indicato con v_i la velocità della luce nel mezzo in cui avviene l'incidenza, con v_r la velocità nel mezzo in cui avviene la rifrazione. Se siete interessati alla dimostrazione di questa formula, potete leggere l'allegato già citato in precedenza. Possiamo ora capire come funziona il prisma di Newton di cui abbiamo parlato nella scorsa lezione: le diverse componenti spettrali della luce bianca viaggiano tutte alla stessa velocità nell'aria, ma a velocità diverse nel vetro. Quindi, nel vetro, vengono rifratte ad angoli diversi.

33.4. Gli specchi sferici

Il comportamento di uno specchio piano è facile da descrivere. Che cosa succede se la superficie dello specchio è curva? Il modello corpuscolare ci suggerisce la risposta:

ogni microscopica particella di luce, incidendo sullo specchio, ne sperimenta una minima porzione, che possiamo considerare come piana. In effetti, come ogni curva regolare del piano può essere approssimata, su piccola scala, dalla sua retta tangente, così ogni superficie regolare dello spazio può essere approssimata, su piccola scala, dal suo piano tangente. La riflessione avverrà, quindi, secondo una legge che già conosciamo: raggio incidente, raggio riflesso e normale staranno nello stesso piano, e l'angolo di riflessione sarà uguale all'angolo di incidenza.

La cosa è facile da descrivere per uno specchio la cui superficie sia una porzione di superficie sferica. Per rappresentare la situazione con un'immagine bidimensionale, tagliamo lo specchio sferico con un piano che passi per il suo centro. La figura che segue (► fig.33.4) mostra quello che accade ai raggi luminosi che incidono sulla superficie dello specchio: il raggio riflesso si ottiene da quello incidente facendo un ribaltamento rispetto alla normale allo specchio nel punto di incidenza. La normale, come sappiamo, ha la direzione del raggio. Abbiamo chiamato *asse ottico* l'asse di simmetria dello specchio, *vertice* il punto in cui l'asse ottico interseca lo specchio.

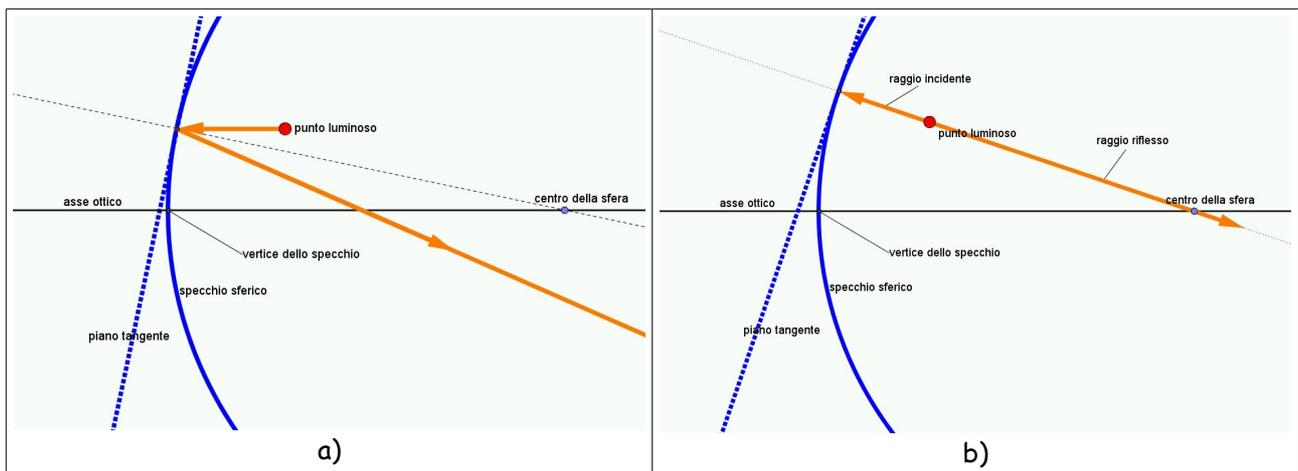


Fig.33.4 riflessione da uno specchio sferico a) di un raggio diretto come l'asse ottico
b) di un raggio diretto come un raggio della sfera

Nella parte a) della figura vediamo quel che succede ai raggi che viaggiano paralleli all'asse ottico: vengono riflessi in modo da intersecare l'asse ottico in un qualche punto tra il vertice e il centro. Nella parte b) vediamo come vengono riflessi i raggi luminosi diretti come il raggio della sfera: tornano indietro lungo lo stesso cammino, quindi passano per il centro.

Nella prossima figura (► fig.33.5) vediamo come si forma l'immagine di un oggetto esteso: come oggetto abbiamo scelto una freccia che poggia perpendicolarmente all'asse ottico in un suo punto che possiamo scegliere: cambiandone la posizione, cambiano posizione e dimensioni dell'immagine che otteniamo.

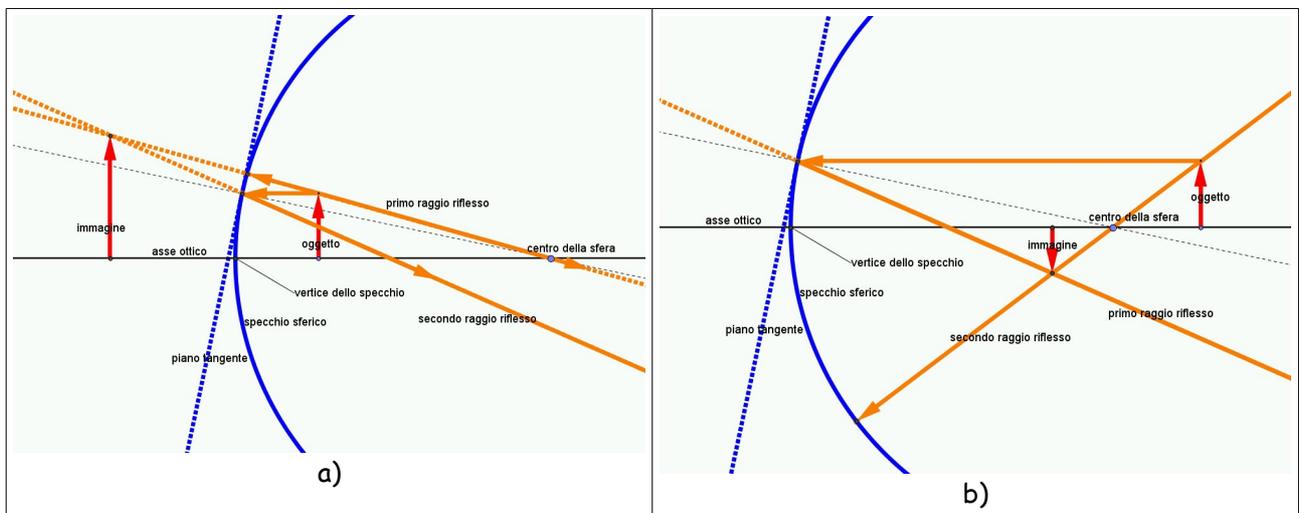


Fig.33.5 formazione dell'immagine da parte di uno specchio sferico concavo
 a) l'oggetto è vicino allo specchio b) l'oggetto è lontano dallo specchio

Gli specchi descritti nella precedente figura si dicono concavi. Un cucchiaio da cucina, ben lucidato, è un buon esempio di specchio più o meno sferico. Se vi specchiate nell'interno del cucchiaio state usando uno specchio concavo: vedrete, stando lontani dalla superficie, la vostra immagine capovolta e rimpicciolita come nella parte b) della figura. Se però avvicinate l'unghia di un dito alla superficie, vedrete la sua immagine diritta e ingrandita, come nella parte a) della figura.

Naturalmente potete decidere di specchiarvi nella superficie esterna del cucchiaio: a qualunque distanza vedrete sempre la vostra immagine diritta e rimpicciolita. In questo caso state usando uno specchio convesso, il cui comportamento è descritto dalla prossima figura (► fig.33.6)

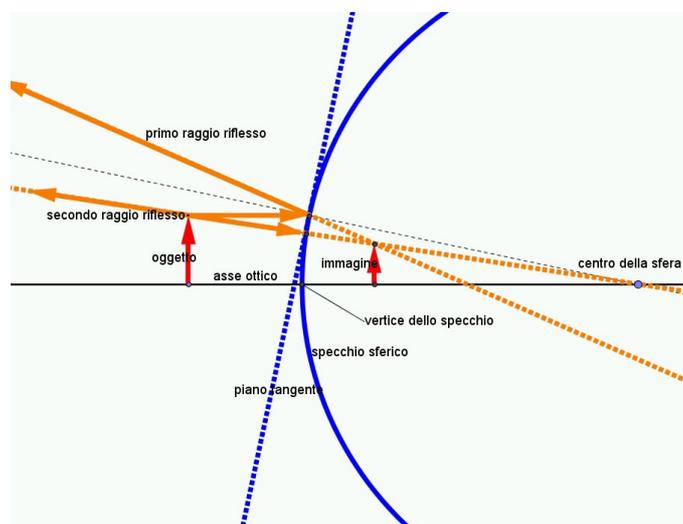


Fig.33.6 Come si forma l'immagine in uno specchio convesso

33.5. Facciamo un po' di conti

Abbiamo visto come si formano le immagini prodotte da uno specchio sferico, sia concavo sia convesso. La geometria è semplice, meno semplice è scrivere equazioni che descrivano quello che accade. Le domande a cui ci piacerebbe rispondere sono due: quanto dista l'immagine dallo specchio? Quanto è grande l'immagine? C'è, per nostra fortuna, un caso in cui è facile rispondere, usando equazioni semplici da ricavare e da risolvere: è il caso in cui l'oggetto è molto piccolo, quindi molto vicino all'asse ottico. Se osserviamo con attenzione le immagini precedenti, ci accorgiamo che i raggi paralleli all'asse ottico vengono riflessi in un punto dell'asse che sta, più o meno, a metà strada tra il vertice dello specchio e il centro della sfera. La cosa è tanto più vera, quanto più l'oggetto è piccolo: se facciamo tendere a zero le dimensioni dell'oggetto, tutti i raggi paralleli all'asse, quando vengono riflessi, tendono a passare per uno stesso punto, che si trova a metà strada tra il vertice e il centro. A tale punto si dà il nome di *fuoco* dello specchio. La prossima figura (► fig.33.7) ci aiuta a capire il perché.

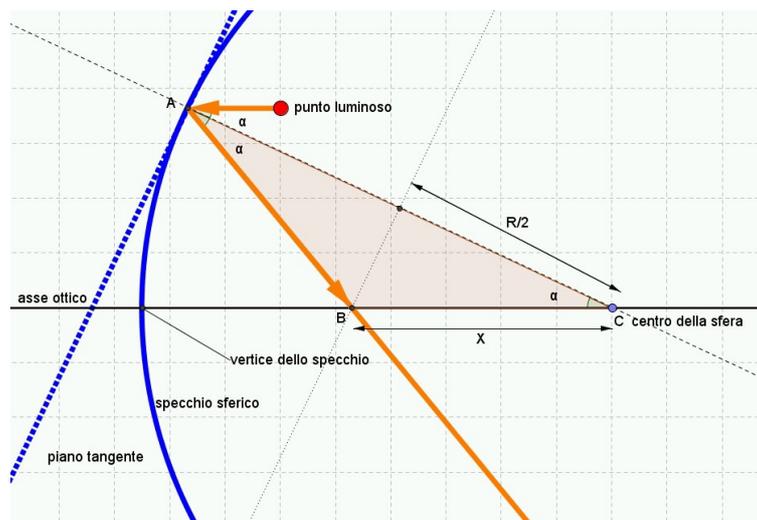


Fig.33.7 Dove cade il punto B?

Abbiamo indicato con x la distanza tra il centro C e il punto B in cui il raggio riflesso interseca l'asse ottico. Il triangolo ABC è isoscele (dimostratelo!), e il lato maggiore è pari al raggio R . Quindi:

$$x \cdot \cos(\alpha) = R/2 \quad \rightarrow \quad x = R/2 / \cos(\alpha)$$

Se il punto luminoso si avvicina all'asse ottico, allora l'angolo α tende a 0, quindi $\cos(\alpha)$ tende a 1, quindi x tende a $R/2$. Ribadiamo il concetto: se l'oggetto è piccolo, e vicino all'asse ottico, tutti i raggi paralleli all'asse vengono riflessi in un punto comune detto fuoco, che si trova sull'asse ottico ad una distanza $R/2$ dal vertice.

Siamo pronti a ricavare le equazioni che descrivono la posizione e le dimensioni dell'immagine, in funzione di posizione e dimensioni dell'oggetto. La situazione è descritta nella prossima figura (► fig.33.8)

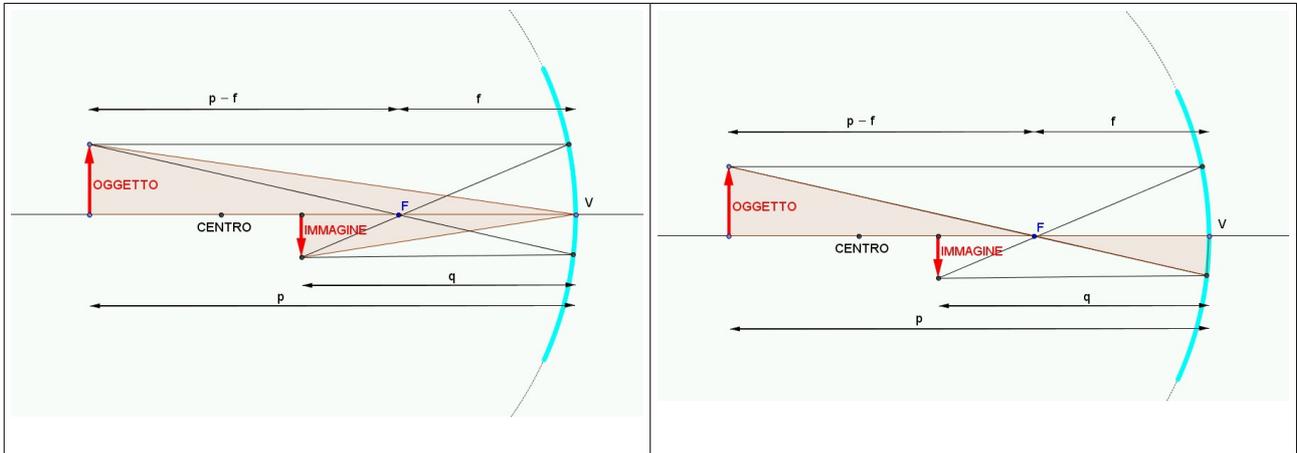


Fig.33.8 Come si ricavano posizione e dimensioni dell'immagine

Chiamiamo o l'altezza dell'oggetto, chiamiamo i l'altezza della sua immagine. Indichiamo con p e con q le rispettive distanze dell'oggetto e dell'immagine dal vertice dello specchio. Infine chiamiamo f la distanza focale dello specchio, cioè la distanza tra fuoco e vertice.

Consideriamo la parte a) della figura: i due triangoli evidenziati sono simili, quindi $o/i = p/q$. Consideriamo poi la parte b) della figura: i due triangoli, in questo caso, sono "quasi simili": il triangolo di sinistra ha un lato perpendicolare all'asse ottico, quello di destra ne ha uno "quasi perpendicolare", tanto più perpendicolare quanto più piccolo è l'oggetto che si riflette nello specchio. Per oggetti piccoli, quindi, assumiamo che anche i triangoli della figura b) siano simili: $o/i = (p-f)/f$.

Le due equazioni sono entrambe vere, per cui le uniamo con un AND:

$$o/i = p/q \quad \text{AND} \quad o/i = (p-f)/f \quad \rightarrow \quad p/q = (p-f)/f \quad \rightarrow \quad 1/p + 1/q = 1/f$$

L'equazione che abbiamo appena ricavato si chiama equazione dei punti coniugati.

33.6. Le lenti

Il modo in cui opera una lente convergente è descritto dalla prossima figura (► fig.33.9)

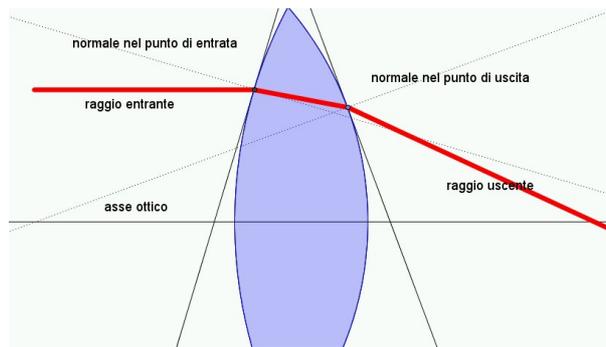


Fig.33.9 Come funziona una lente convergente

Abbiamo accentuato la curvatura della lente perché l'immagine fosse comprensibile: in realtà le lenti convergenti hanno una curvatura minore. Per lenti convergenti sottili tutti i raggi uscenti convergono verso uno stesso punto che si chiama fuoco della lente. Il modo in cui si forma l'immagine di un oggetto prodotta da una lente convergente è descritto dalla prossima figura (► fig.33.10)

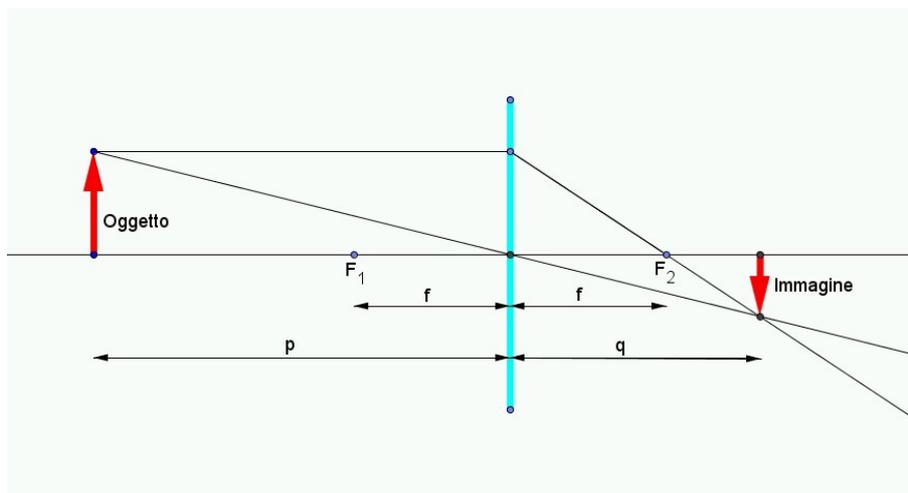


Fig.33.10 Come si forma l'immagine prodotta da una lente convergente

Come prima, chiamiamo p la distanza dell'oggetto dal centro della lente, q la distanza dell'immagine, o e i le dimensioni di oggetto e immagine. Come prima, scriviamo due equazioni che descrivono la similitudine tra due diverse coppie di triangoli:

$$o/i = p/q \quad \text{AND} \quad o/i = f/(q - f)$$

Vi lasciamo per esercizio il compito di scoprire quali sono le due coppie di triangoli, e di risolvere il sistema. Si ricava una formula perfettamente identica a quella vista nel caso degli specchi:

$$1/p + 1/q = 1/f$$

Abbiamo preso in considerazione lenti convergenti, cioè lenti che fanno convergere i raggi paralleli all'asse ottico in un punto comune detto fuoco. Non è difficile immaginare come si possa costruire una lente divergente, cioè una lente che faccia

divergere i raggi paralleli all'asse ottico, in modo che siano i loro prolungamenti a convergere nel fuoco della lente. La prossima figura (► fig.33.11) illustra l'idea: bisogna fare in modo che la lente sia più sottile al centro, più spessa ai bordi.

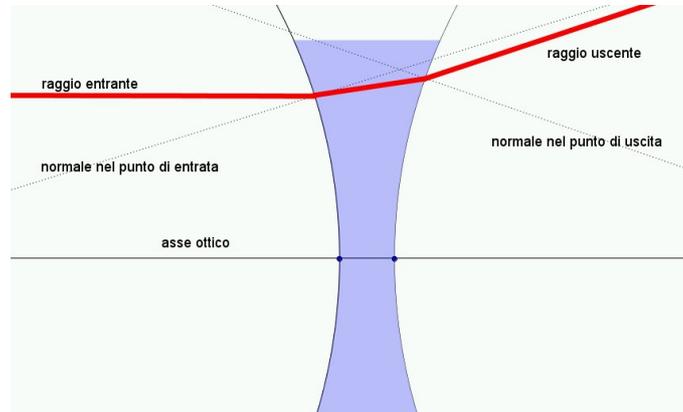


Fig.33.11 Come opera una lente divergente

33.7. Uno sguardo al futuro

Ribadiamo un concetto già espresso: tutto quello che abbiamo detto in questa lezione si può riformulare, parola per parola, partendo dal presupposto che la luce sia un'onda: le onde vengono riflesse, e il loro cammino viene deviato nel passaggio da un mezzo all'altro. Abbiamo scelto il modello corpuscolare solo perché è più semplice descrivere rimbalzi e deviazioni di un corpuscolo che non di un'onda.

Ma c'è di più: tutto quello che abbiamo detto nella lezione scorsa si può riformulare, parola per parola, partendo dal presupposto che la luce sia fatta di corpuscoli. Certo devono essere corpuscoli un po' strani, con proprietà diverse rispetto a quelle che possiamo attribuire a minuscole palle da biliardo. Le palle da biliardo, solo per fare un esempio, non mostrano fenomeni di interferenza.

E' stata proprio questa una delle grandi sfide per la fisica del ventesimo secolo: capire come il comportamento dei corpi microscopici possa essere descritto in termini di onde. In realtà il comportamento di *tutti* i corpi può essere descritto in termini di onde. A quelli grandi e pesanti, però, si devono associare onde con una lunghezza λ così piccola da risultare del tutto inapprezzabile, in qualunque tipo di esperimento. Il comportamento dei corpi microscopici, viceversa, non può essere descritto senza tenere conto dell'onda che ad essi è associata.

Ma di questo ripareremo in lezioni future.