

Capitolo 10

L'ottica geometrica

10.1 La velocità della luce

L'ipotesi alla base dell'ottica geometrica è la **propagazione rettilinea della luce**, in virtù della quale *la luce può essere considerata un insieme di raggi emessi da una sorgente luminosa lungo linee rette*.

La *velocità della luce* è massima nel vuoto e diminuisce in mezzi trasparenti o traslucidi (come il vetro o l'acqua). La teoria della relatività di Einstein dimostra che tale velocità non può essere superata e che rappresenta, per il mezzo considerato di volta in volta, un limite invalicabile.

Il primo tentativo di misurarne il valore fu compiuto attorno al 1600 da Galileo Galilei. Con l'aiuto di un suo allievo, Galileo posizionò delle grosse lanterne su due colline distanti in linea d'aria qualche chilometro. Scesa la notte, le due lanterne furono accese e coperte da un grosso mantello. Galileo scoprì la prima lanterna per permettere ai raggi di luce di raggiungere la collina vicina dove era situato il suo assistente, il quale, dopo aver visto arrivare il segnale luminoso, avrebbe fatto altrettanto con la sua lanterna, fino allora tenuta al riparo.

Conoscendo la distanza che separava le colline e misurando il tempo necessario per vedere arrivare il secondo raggio di luce, Galileo sperava di calcolarne la velocità attraverso la semplice equazione:

$$velocità = \frac{spazio}{tempo}$$

L'esperimento non ebbe successo. Appena veniva scoperta la prima lanterna, il raggio di ritorno compariva immediatamente, impedendo una qualunque misurazione del tempo intercorso a compiere il tragitto.

Da ciò, però, Galileo concluse che la velocità della luce doveva essere...molto elevata!

Bisognerà attendere fino al 1676 per ottenere un risultato significativo. In quell'anno **Olaf Roemer**, astronomo danese, osservando al telescopio i satelliti di Giove,¹ si accorse di una anomala variazione nel periodo delle eclissi di "Io", la più interna delle lune, che portava il satellite ad uscire dall'ombra di Giove in ritardo, rispetto a quanto previsto, quando la Terra si allontanava da Giove, e in anticipo quando il nostro pianeta vi si avvicinava.

Confrontando i risultati delle osservazioni su intervalli di sei mesi, il periodo necessario alla Terra per portarsi in due punti diametralmente opposti della sua orbita attorno al Sole, era possibile riscontrare una variazione complessiva dei ritardi e degli anticipi dell'ordine di circa 20 minuti.

Roemer attribuì questa anomalia al fatto che la Terra, muovendosi lungo la sua orbita, si allontanava o si avvicinava a Giove proprio ad intervalli periodici di circa sei mesi, obbligando il raggio di luce proveniente dal satellite "Io" a percorrere, di volta in volta, un tragitto più o meno lungo. Il ritardo massimo di circa 20 minuti poteva così essere messo in correlazione con il tempo necessario alla luce per percorrere una distanza pari al diametro dell'orbita terrestre.

Da queste considerazioni Roemer ricavò il valore:

$$c = \frac{\text{diametro orbita terrestre}}{\text{ritardo eclissi Io}} \simeq 214\,000 \text{ km/s} \quad (10.1)$$

Misure più accurate furono ottenute nei secoli seguenti, anche attraverso esperimenti di tipo profondamente diverso. Oggi si sa che la velocità della luce nel vuoto è:

$$c = 299\,792 \text{ km/s}. \quad (10.2)$$

L'errore, come si vede, è abbastanza elevato, ma quello di Roemer fu comunque il primo esperimento a dare un'idea del valore elevatissimo della velocità della luce.

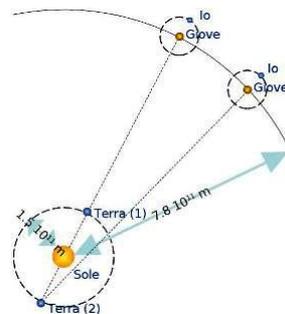


Fig.10.1 - Roemer calcolò la velocità della luce misurando i ritardi delle eclissi di "Io", il satellite più interno del pianeta Giove.

10.2 La riflessione

Quando la luce colpisce la superficie di separazione tra due mezzi di densità diversa (come aria-vetro, oppure aria-acqua) il raggio incidente si divide in due fasci luminosi di cui uno

¹I quattro satelliti principali di Giove furono scoperti da Galileo nel 1610 durante le sue prime osservazioni al cannocchiale. Ad essi furono dati i seguenti nomi: *Io*, *Europa*, *Ganimede*, *Callisto*. Galileo dedicò questa scoperta a Cosimo II de' Medici: per questo motivo sono anche detti *satelliti medicei*.

viene riflesso, mentre l'altro attraversa il secondo mezzo (se trasparente). Il primo si chiama *raggio riflesso*, il secondo *raggio rifratto*.

La riflessione è uno dei fenomeni ottici più familiari, di cui facciamo esperienza quotidiana semplicemente guardandoci in uno specchio.

Per darne una spiegazione, consideriamo un raggio luminoso emesso da una sorgente puntiforme che vada a colpire una superficie "piana e liscia" in un punto P. Tracciamo la *normale*² alla superficie nel punto P. Definiamo *angolo di incidenza* \hat{i} l'angolo compreso tra il raggio luminoso e la normale e *angolo di riflessione* \hat{r} l'angolo tra la normale e il raggio riflesso.

La **legge della riflessione** afferma che:

1. il raggio incidente, il raggio riflesso e la retta normale al piano nel punto di incidenza P sono *complanari* (appartengono, cioè, allo stesso piano)
2. angolo di incidenza e angolo di riflessione sono *uguali*, cioè:

$$\hat{i} = \hat{r} \tag{10.3}$$

I due raggi luminosi, quello incidente e quello riflesso, individuano un percorso perfettamente invertibile. Cambiando di posizione alla sorgente luminosa il fenomeno avviene in modo simmetrico: il raggio riflesso diventa il raggio incidente e viceversa... Tale fondamentale proprietà prende il nome di **principio di invertibilità del cammino ottico**.

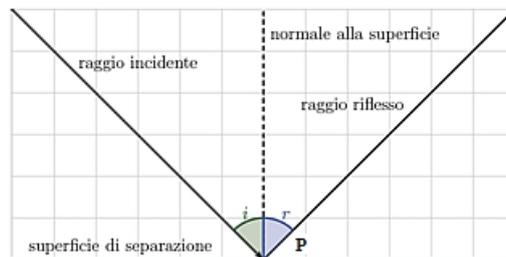


Fig.10.2 - La legge della riflessione.

10.3 La diffusione

Supponiamo di trovarci in un ambiente completamente buio. Illuminiamo un piccolo oggetto posto su di un tavolo con un sottile fascio di luce proveniente da una sorgente puntiforme: una mini-torcia, ad esempio, oppure una penna laser. Il debole chiarore che investe l'oggetto è sicuramente sufficiente a rendercelo visibile qualunque sia la nostra posizione all'interno del locale.

Per quanto detto in precedenza a proposito delle leggi della riflessione, invece, la visione dovrebbe essere possibile solo se la nostra posizione fosse situata sul prolungamento del raggio riflesso, lungo una direzione che formasse, rispetto alla normale, un angolo uguale a quello di incidenza.

Com'è possibile, allora, che i raggi riflessi portino l'immagine dell'oggetto in *ogni* posizione della stanza ??

²La *normale* ad una superficie in un suo punto, è la retta *perpendicolare alla tangente* alla superficie nel punto considerato. Nel caso di una superficie piana, come nell'esempio della riflessione, la retta normale e la retta perpendicolare coincidono.

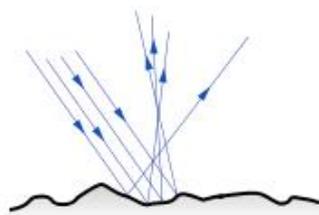


Fig.10.3 - Il fenomeno della diffusione.

Nell'enunciare le leggi della riflessione abbiamo premesso di considerare *una superficie perfettamente piana e liscia*. Ebbene, una superficie con queste proprietà nella realtà non esiste! Ogni oggetto, se osservato al microscopio o con una lente di ingrandimento, presenta delle irregolarità, delle increspature, delle microalterazioni che evidenziano con chiarezza come ogni superficie apparentemente liscia presenti, in realtà, una conformazione più o meno "rugosa". Un fascio di luce, inoltre, è formato da una infinità di raggi tra loro paralleli che colpiscono ogni corpo in una molteplicità di punti diversi, ognuno dei quali è posto su una microscopica porzione di superficie orientata "a caso" nello spazio.

Ecco perché, allora, i raggi riflessi tendono ad assumere direzioni completamente diverse tra loro, pur rispettando le leggi della riflessione: l'immagine dell'oggetto sarà così visibile in ogni punto della stanza.

10.4 La rifrazione

Immergendo un cucchiaino in un bicchiere parzialmente riempito d'acqua, l'immagine che arriva al nostro occhio ci dà la sensazione che l'oggetto si sia spezzato in due parti (Fig.10.4). Il fenomeno ottico responsabile di questa impressione si chiama **rifrazione**.

Per comprendere quello che realmente succede consideriamo un raggio luminoso che colpisca la superficie di separazione tra due sostanze trasparenti di densità diversa. Come sappiamo, una parte del raggio incidente viene riflessa. Un'altra parte, invece, prosegue il suo cammino attraversando il secondo mezzo e cambiando direzione: questo è il raggio **rifratto**.

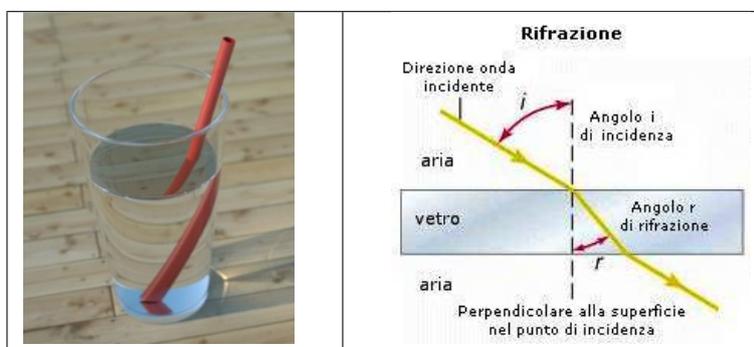


Fig.10.4 - Per il fenomeno della rifrazione, il bastoncino sembra essere spezzato in due parti (sinistra). Ciò avviene perché, nel passaggio tra due mezzi di densità diversa (acqua-aria), il raggio di luce cambia direzione (destra).

In particolare, *se il secondo mezzo è più denso del primo, il raggio rifratto tende ad avvicinarsi alla normale; se il secondo mezzo è meno denso, il raggio tende ad allontanarsi.*

Il motivo di ciò è da attribuire al valore della velocità della luce che risulta essere massimo nel vuoto e minore nei mezzi più densi. *Questa variazione di velocità nel passare da un mezzo all'altro ha come conseguenza il cambiamento della direzione di propagazione del raggio luminoso.*

Si definisce **indice di rifrazione assoluto** n , il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo considerato:

$$n = \frac{c}{v} > 1 \quad (10.4)$$

Questo valore è sempre superiore a 1, mentre vale (ovviamente) 1 nel vuoto. Per l'acqua, ad esempio, è pari a 1,33. Ciò vuol dire che la velocità della luce in tale mezzo rallenta di 1,33 volte rispetto alla propagazione nel vuoto: il suo valore, in tal caso, è circa 225 000 km/s. L'indice di rifrazione dell'aria è 1,000 293. Tutti i gas, in generale, sono contraddistinti da un indice di rifrazione molto vicino all'unità per cui non si sbaglia se si pone sempre $n = 1$: il che equivale a supporre la velocità della luce nei gas pari a circa 300 000 km/s.

Consideriamo ora un raggio di luce che attraversi due mezzi di densità diversa e di indice di rifrazione assoluto $n_1 \neq n_2$. Definiamo **l'indice di rifrazione del secondo mezzo rispetto al primo** $n_{1,2}$ nel seguente modo:

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (10.5)$$

da cui segue:

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2}$$

e quindi:

$$n_{1,2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (10.6)$$

Possiamo ora enunciare la **legge della rifrazione** (detta anche *legge di Snell*³):

1. Il raggio incidente, quello rifratto e la normale alla superficie nel punto di incidenza, sono **complanari**.

2. Detti \hat{i} l'angolo di incidenza e \hat{r} l'angolo di rifrazione, entrambi misurati rispetto alla normale, vale la relazione:

$$n_1 \text{ sen } \hat{i} = n_2 \text{ sen } \hat{r} \quad (10.7)$$

dove n_1 e n_2 sono gli *indici di rifrazione* assoluti del primo e del secondo mezzo attraversati.

Un caso particolarmente interessante si verifica quando il mezzo considerato è una lamina *a facce parallele* (una lastra di vetro, ad esempio). In tal caso il raggio di luce rifratto prima si avvicina alla normale, poi torna ad allontanarsene quando esce dalla lamina dopo la seconda rifrazione (Fig.10.4). Poiché in questo caso sono coinvolte le stesse sostanze (prima aria-vetro, poi vetro-aria) e le superfici di ingresso e di uscita sono parallele, il fenomeno è perfettamente simmetrico e anche il raggio finale risulta essere parallelo a quello iniziale.

³Willebrord Snel van Royen, latinizzato come Willebrordus Snellius o semplicemente Snellius (Leida, 1580 – Leida, 30 ottobre 1626), è stato un matematico, astronomo e fisico olandese. Nel 1621 trovò un nuovo metodo per il calcolo di *pi greco*, perfezionando il metodo di Archimede. Fu il primo direttore dell'Osservatorio astronomico di Leida.

Anche in questo caso, quindi, vale il *principio di inversione del cammino ottico*. Nello specifico, esiste la seguente relazione tra gli indici di rifrazione del secondo mezzo rispetto al primo:

$$n_{1,2} = \frac{1}{n_{2,1}} \quad (10.8)$$

Ad esempio, se l'indice di rifrazione dell'acqua rispetto al vuoto è 1,33 (il raggio luminoso proviene dal vuoto), l'indice di rifrazione del vuoto rispetto all'acqua (il raggio proviene ora dall'acqua) vale $\frac{1}{1,33} = 0,75$.

Ed è per questo motivo che il raggio in uscita da una lastra piana a superfici parallele prosegue con la stessa direzione del raggio entrante, nonostante abbia subito per ben due volte il fenomeno della rifrazione (vedi ancora la Fig.10.4).

sostanza	indice di rifr. assoluto	sostanza	indice di rifr. assoluto
diamante	2,42	etere etilico	1,35
quarzo	1,54	acqua	1,33
vetro flint	1,62	ghiaccio	1,31
vetro crown	1,51	aria	1,000 293
alcol etilico	1,36	elio	1,000 036

Fig.10.5 - *Indici di rifrazione di alcune sostanze*

Notiamo infine come l'equazione (7) possa anche essere scritta nella forma:

$$\frac{c}{v_1} \text{sen } \hat{i} = \frac{c}{v_2} \text{sen } \hat{r}$$

da cui si ottiene la relazione tra le velocità della luce nei due mezzi di propagazione e le direzioni dei raggi luminosi:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2} \quad (10.9)$$

10.5 La riflessione totale

Il fenomeno della **riflessione totale** è un particolare caso di rifrazione che *si verifica solo quando il raggio luminoso passa da un mezzo più denso a uno meno denso*.

In tale situazione il raggio rifratto si allontana dalla normale, perché vale sempre la disequazione: $\hat{i} < \hat{r}$. Esisterà allora un opportuno valore dell'angolo di incidenza, detto *angolo limite* \hat{i}_{lim} , per il quale l'angolo di rifrazione diventa pari a 90° e il raggio rifratto, non potendo attraversare il secondo mezzo, scompare...Tutta l'energia luminosa del raggio incidente viene così ceduta al raggio riflesso che risulta essere particolarmente intenso.

Ogni coppia di materiali di densità diversa è contraddistinta da un suo particolare valore dell'angolo limite, facilmente calcolabile a partire dalla stessa legge della rifrazione imponendo che l'angolo di rifrazione sia $\hat{r} = 90^\circ$. Ricordando poi che $\text{sen } 90^\circ = 1$, si ottiene:

$$n_1 \text{sen } \hat{i} = n_2 \text{sen } \hat{r}$$

$$\text{sen } \hat{i} = \frac{n_2 \text{sen } \hat{r}}{n_1}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \hat{i}_{lim} &= \frac{n_2 \operatorname{sen} 90^\circ}{n_1} = \frac{n_2 \cdot 1}{n_1} \\ \hat{i} &= \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \end{aligned} \quad (10.10)$$

Il fenomeno della riflessione totale è largamente usato nella costruzione di strumenti ottici (macchine fotografiche, binocoli, periscopi, cannocchiali e telescopi) per modificare il cammino ottico dei raggi luminosi; infatti, un **prisma di vetro** sul quale la luce arriva con un angolo maggiore dell'angolo limite si trasforma in uno specchio perfetto, dal costo di fabbricazione non molto elevato e dalla lunga durata (Fig.10.7).

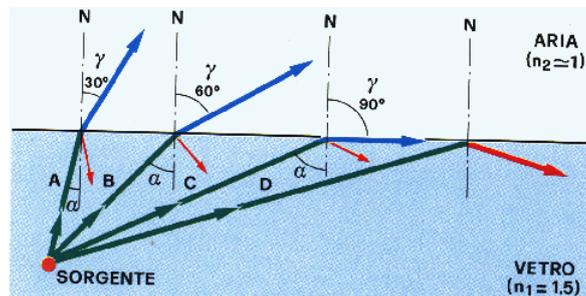


Fig.10.6 - Nel passaggio da un mezzo più denso a uno meno denso (vetro-aria) quando il raggio incidente supera il valore dell'angolo limite si verifica la riflessione totale: il raggio rifratto scompare e quello riflesso diventa particolarmente intenso.

Una applicazione di grande rilevanza tecnologica si ha nelle cosiddette **fibre ottiche**, sottilissimi fili di vetro, a volte di plastica, estremamente trasparenti, che intrappolano il raggio luminoso in ingresso obbligandolo a subire ripetutamente la riflessione totale perché l'angolo di incidenza con le superfici esterne della fibra, per la particolare geometria che si viene a realizzare, risulta essere sempre superiore al valore dell'angolo limite.

Le fibre ottiche sono usate in medicina per vedere gli organi interni ed hanno un utilizzo sempre crescente in settori come la costruzione di linee di telecomunicazione, l'astronomia, e perfino l'arredamento. Nel campo delle telecomunicazioni, ad esempio, sono sfruttate come canali di comunicazione privilegiati ad alta velocità, apprezzate soprattutto per i bassi costi e la bassissima attenuazione, che rende possibile tratti di più di 100 km lungo i quali non è necessaria la presenza di amplificatori.

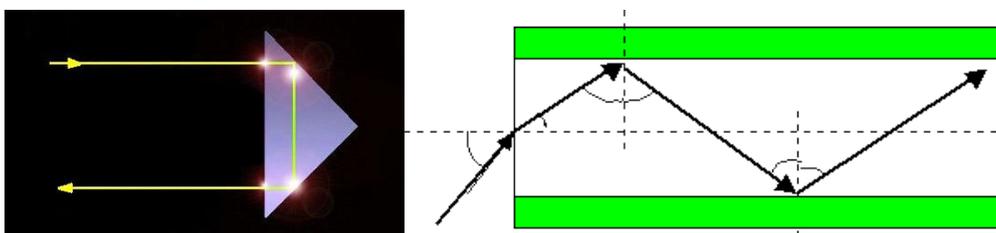


Fig.10.7 - Riflessione totale in un prisma di vetro (a sinistra) e in una fibra ottica (a destra). Il raggio ottenuto conserva il 100% dell'energia del raggio incidente.

La riflessione totale è anche la causa del **miraggio**.

Viaggiando in auto in una calda giornata di sole non è raro avere l'impressione che l'asfalto in lontananza sia bagnato: talvolta sembra pure di vedere il riflesso degli alberi sulla strada.

Una tale illusione ottica è dovuta alla riflessione totale subita dai raggi di luce che, nel loro percorso, *attraversano strati di aria dalla densità fortemente variabile*.

Se ci troviamo nel deserto, ad esempio, possiamo vedere in lontananza il riflesso del cielo sul terreno sabbioso e pensare erroneamente di scorgere un lago. Si ha un *miraggio inferiore* se gli strati di aria più vicini al suolo sono molto più caldi (di conseguenza meno densi) rispetto agli strati a quote superiori. In tal caso l'indice di rifrazione dell'aria calda è minore di quello dell'aria fredda e perciò, se consideriamo un raggio proveniente da oggetti relativamente lontani (e che quindi forma un angolo che supera l'angolo limite), questo raggio viene riflesso totalmente verso l'osservatore il quale può quindi osservare una immagine capovolta dell'oggetto e posizionata al di sotto dell'immagine reale, ricevendone la sensazione che vi sia una pozzanghera nella quale l'oggetto si sta rispecchiando.

Situazioni più spettacolari sono create dai *miraggi superiori*, prodotti da una inversione di temperatura all'altezza degli occhi dell'osservatore. In questo caso l'immagine appare riflessa superiormente. È possibile vedere oasi che in realtà si trovano oltre l'orizzonte, così come navi capovolte in lontananza. In questo caso gli strati d'aria a contatto col suolo risultano molto più freddi di quelli situati al di sopra degli occhi dell'osservatore per la presenza, ad esempio, di specchi marini attraversati da correnti di acqua fredda. Quando ciò si verifica si ha una riflessione totale dovuta alla rifrazione dei raggi provenienti dagli oggetti distanti che, passando da un mezzo di trasmissione freddo (maggiore indice di rifrazione) a uno più caldo (minore indice di rifrazione) trovano realizzate le condizioni ideali. Il fenomeno è detto anche **fata Morgana**.

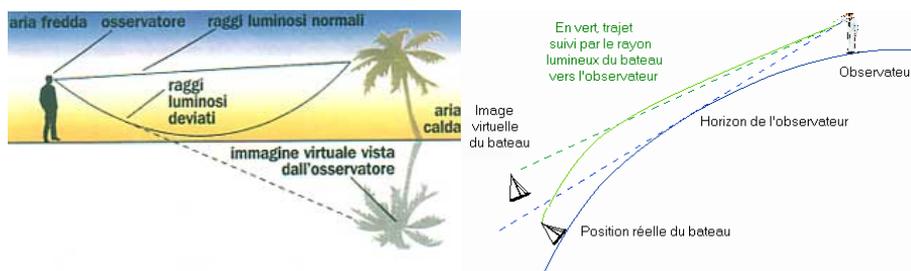


Fig.10.8 - *Miraggio inferiore (sinistra) e superiore (destra).*

10.6 La dispersione: l'arcobaleno

Si è soliti dire che la luce solare è *luce bianca*, intendendo con ciò che essa contiene tutti i colori dell'iride in misura più o meno uguale. L'affermazione è facilmente dimostrabile in laboratorio costruendo un **disco di Newton**, un semplice disco di cartone suddiviso in spicchi che riportano in successione tutti i colori dell'arcobaleno. Quando il disco è posto in rapida rotazione attorno ad un asse passante per il suo centro, l'occhio non è più in grado di distinguere i singoli settori: i colori si fondono conferendo alla superficie una tonalità biancastra...

Il **colore di un corpo** illuminato è dovuto al fatto che quando un fascio di *luce bianca* incide su un determinato oggetto, una sua parte viene assorbita e un'altra parte viene riflessa e intercettata dall'occhio. Nella luce riflessa, però, è contenuto un *solo colore*, quello che caratterizza l'oggetto in questione.

Ad esempio: se si illumina un uovo con la luce solare (quindi bianca, perché contiene tutte le componenti cromatiche), l'albume appare bianco perché riflette completamente il raggio luminoso incidente, mentre il tuorlo appare rosso perché riflette solo il rosso. Se l'uovo è illuminato con una luce rossa non si distingue più il tuorlo dall'albume, perché la luce riflessa da entrambi contiene solo la componente cromatica rossa... L'erba di un prato appare verde perché assorbe tutti i raggi luminosi tranne quello di colore verde. Un oggetto appare nero quando blocca completamente la luce senza rifletterne nemmeno una sua piccola parte: se invece riflette in equal misura tutti i colori, all'occhio quell'oggetto apparirà bianco.



Fig. 10.9 - *Il disco di Newton.*

Questa premessa serve per comprendere uno dei più noti ed usuali fenomeni ottici che la natura ci presenta spontaneamente: l'**arcobaleno**. Un raggio di luce bianca, attraversando per rifrazione opportune sostanze trasparenti (nel caso dell'arcobaleno le goccioline d'acqua che rimangono in sospensione nell'atmosfera al termine di un temporale; in una esperienza di laboratorio un più comodo *prisma di vetro*) si suddivide automaticamente in una serie di raggi colorati.

Questo fenomeno si chiama **dispersione della luce** e la sua spiegazione è possibile solo ammettendo che, nel fenomeno della rifrazione, l'indice di rifrazione "n" *dipenda non solo dalla densità del mezzo considerato, ma anche dal colore del raggio di luce, seppure in misura minore.*

Questo vuol dire che, nel passaggio dall'aria all'acqua, ad esempio, alle varie componenti cromatiche di un fascio di luce bianca corrispondono angoli di rifrazione leggermente diversi. L'effetto finale è la suddivisione del fascio in una successione di raggi luminosi di tonalità differenti.

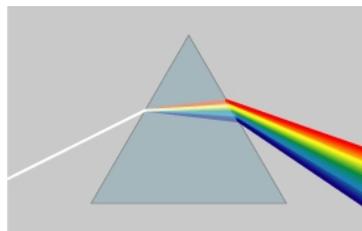


Fig.10.10 - *Dispersione della luce che attraversa un prisma di vetro: poiché l'indice di rifrazione dipende anche dal colore della luce incidente, un fascio luminoso bianco viene separato nei colori fondamentali.*

10.7 Gli specchi

Esistono specchi piani, specchi concavi e convessi. Tutti basano il principio del loro funzionamento sulle leggi della riflessione. Iniziamo il nostro studio dai primi tra questi.

Specchi piani

Sono gli specchi più comuni, che si usano tutti i giorni e che si trovano in ogni casa. Essi restituiscono una immagine che ha le seguenti caratteristiche:

- 1) *virtuale* (cioè non reale, perchè l'immagine si forma in un punto, posto dietro allo specchio, in cui non arrivano i raggi luminosi, ma i loro prolungamenti geometrici tracciati oltre il punto di riflessione).
- 2) *diritta*, ma con la destra e la sinistra scambiate tra loro
- 3) *alla stessa distanza* dallo specchio dell'oggetto e con le *stesse dimensioni*.

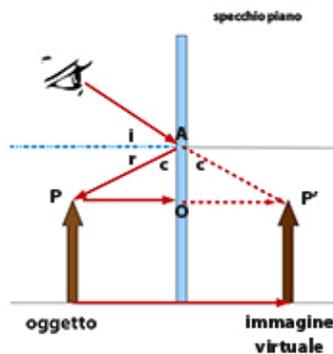


Fig.10.11 - Formazione dell'immagine in uno specchio piano.

Dimostriamo queste affermazioni facendo riferimento alla fig.10.11.

I triangoli PAO e P'AO sono congruenti: infatti, il lato AO è in comune, gli angoli in O sono uguali perché retti (i raggi luminosi attraversano lo specchio senza subire la rifrazione, quindi arrivano perpendicolari), gli angoli C e C' sono congruenti perché entrambi complementari dell'angolo r. Da cui si deduce che PO = P'O. L'immagine si forma alla *stessa distanza* che separa l'oggetto dallo specchio. Inoltre, il raggio emesso da P arriva all'osservatore dopo essere stato riflesso nel punto A. L'osservatore vede quindi una immagine che è situata "dietro" lo specchio (immagine virtuale) e *diritta* (il punto P è parallelo a P': non sarebbe così con una immagine capovolta).

Specchi sferici concavi e convessi

Siamo in presenza di uno **specchio sferico** quando la superficie riflettente ha una forma curva che, in genere, risulta essere una piccola parte di una sfera di raggio R e centro di curvatura C.

Se i raggi luminosi provengono alla stessa parte del centro C, lo specchio si dice **concavo**; in caso contrario, **convesso**.

Se ora consideriamo un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico, notiamo come essi, dopo la riflessione, convergano tutti in uno stesso punto situato sull'asse ottico dalla parte del centro di curvatura C: questo punto si chiama **fuoco** F. La retta normale allo specchio passante per i punti C, F e V si chiama **asse ottico**.

Dalla Fig.10.12 (sinistra) si può notare come la distanza di F da uno specchio concavo, detta **distanza focale**, sia la metà del suo raggio di curvatura R:

$$f = \frac{1}{2}R \tag{10.11}$$

Nel caso di uno specchio sferico convesso, il fuoco F si trova dalla parte opposta di quella di provenienza dei raggi luminosi e rappresenta il punto di convergenza del prolungamento dei raggi incidenti oltre la superficie sferica. Si mette in evidenza questa particolarità aggiungendo un segno negativo all'equazione precedente:

$$f = -\frac{1}{2}R \quad (10.12)$$

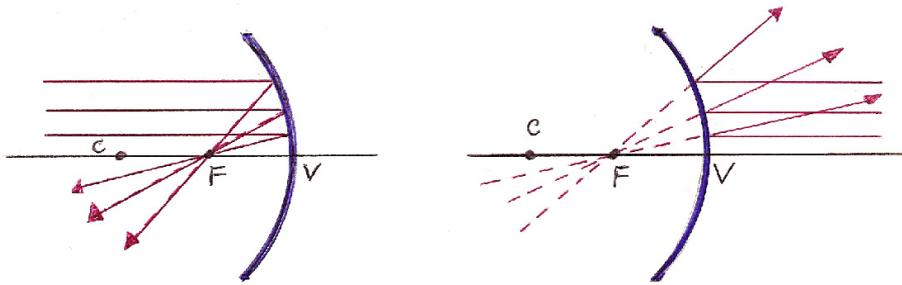


Fig.10.12 - Specchi concavi (sinistra): i raggi paralleli all'asse ottico provengono dal semipiano contenente il centro di curvatura C e convergono per il punto F detto fuoco. Specchi convessi (destra): i raggi provengono dal semipiano che non contiene C ed è il loro prolungamento geometrico a passare per il fuoco F .

I raggi di fig.10.12 si dicono **parassiali** quando si trovano a piccola distanza dall'asse ottico. Se invece consideriamo raggi luminosi posti molto lontani dall'asse ottico, possiamo facilmente notare come essi non convergano perfettamente nel fuoco, creando una immagine risultante ben poco nitida: tale difetto prende nome di **aberrazione sferica**.

Il problema non si presenterebbe usando specchi **parabolici**, la cui costruzione è ben più complicata e costosa e il cui uso è limitato a strumenti scientifici molto particolari come i telescopi astronomici.

Costruzione dell'immagine

Posizioniamo un oggetto davanti a uno specchio sferico concavo e analizziamo il meccanismo della costruzione della sua immagine. Consideriamo i *tre raggi principali*:

- 1) il raggio in partenza dall'estremo dell'oggetto, parallelo all'asse ottico passante per il fuoco F
- 2) il raggio in partenza dall'estremo dell'oggetto, passante per F e riflesso in direzione parallela all'asse ottico
- 3) i due raggi provienti dagli estremi dell'oggetto, passanti per il centro di curvatura e riflessi all'indietro (perchè normali allo specchio).

Si possono presentare tre casi, a seconda della posizione dell'oggetto.

- a) l'oggetto AB è posto oltre il centro di curvatura C . L'immagine $A'B'$ che si forma è *reale, rimpicciolita, capovolta*.
- b) l'oggetto AB è posto tra C e il fuoco F . L'immagine $A'B'$ è *reale, capovolta, più grande*.
- c) L'oggetto AB è posto tra il fuoco F e lo specchio. L'immagine $A'B'$ è *virtuale, ingrandita, diritta*.

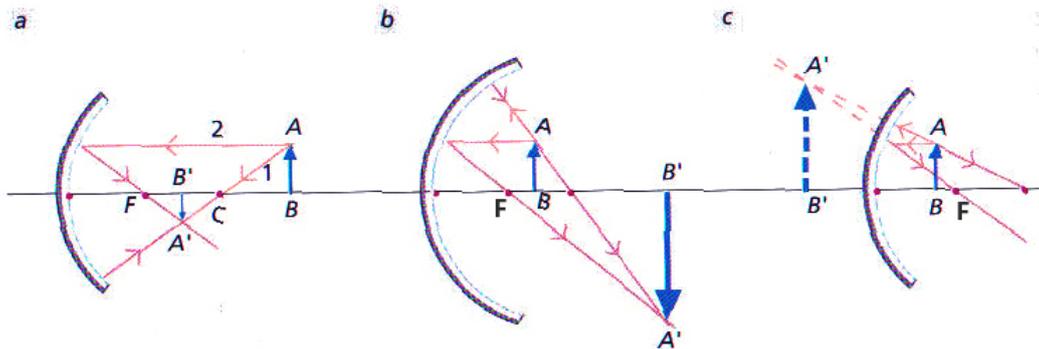


Fig. 10.13 - *Costruzione dell'immagine in specchi sferici concavi.*

Nel caso degli specchi convessi, l'oggetto è posto oltre lo specchio, nel semipiano che non contiene C. C'è un'unica soluzione possibile che, come si vede dalla fig.10.14, produce una immagine *virtuale, rimpicciolita, diritta*.

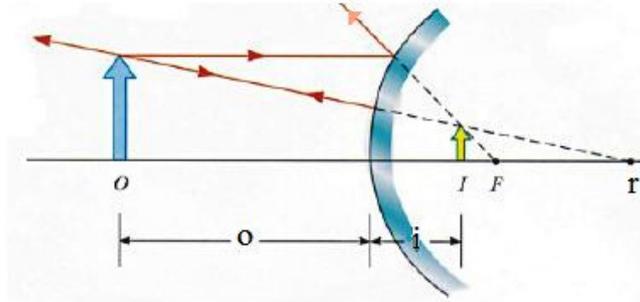


Fig.10.14 - *Costruzione dell'immagine in uno specchio convesso.*

L'equazione degli specchi (o dei punti coniugati)

Si assumano le seguenti convenzioni:

d_i = distanza immagine-specchio (positiva se l'immagine è dalla parte di C, immagine reale)

d_o = distanza oggetto-specchio (positiva se l'oggetto è dalla parte di C)

f = distanza focale (positiva per specchi concavi ??).

Vale allora la seguente equazione, detta degli specchi o dei punti coniugati:

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} \quad (10.13)$$

Si definisce **ingrandimento** G il rapporto tra le dimensioni dell'immagine e dell'oggetto. Si può dimostrare che esso dipende dalla distanza dell'immagine e dell'oggetto dallo specchio dalla seguente relazione:

$$G = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad (10.14)$$

Il *segno dell'ingrandimento* ci fornisce l'informazione sull'orientamento dell'immagine: diritta (positivo) o capovolta (negativo).

10.8 Le lenti

A differenza degli specchi, che funzionano sul principio della riflessione, le lenti sono attraversate dai raggi luminosi e l'immagine si forma grazie alle leggi della rifrazione.

In una lente *convessa* i raggi luminosi convergono in un punto detto fuoco che si trova oltre la lente stessa. In una lente *concava* i raggi divergono, dopo aver attraversato la lente, come se provenissero da una sorgente puntiforme situata nel fuoco.

La capacità di una lente di rifrangere la luce si chiama **potere diottrico**, si misura in *diottrie* (m^{-1}), ed è legato alla *distanza focale* f dalla seguente relazione:

$$\text{potere diottrico} = \frac{1}{f} \quad (10.15)$$

Ad esempio: se una lente ha una distanza focale $f = 20$ cm, il suo potere diottrico è di $1/0,2$ m = 5 diottrie (lente convergente). Una lente con potere diottrico pari a -5 diottrie, ha una distanza focale $f = -20$ cm (lente divergente).

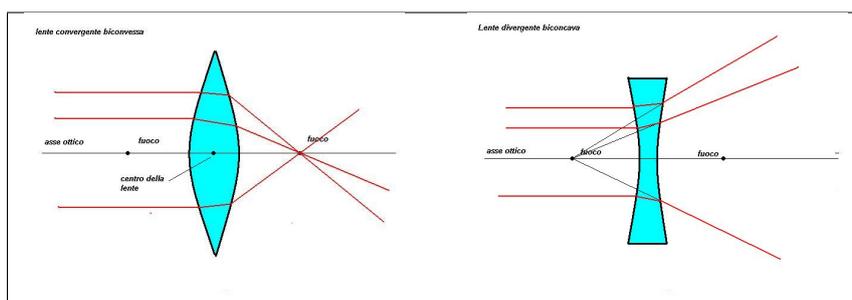


Fig.10.15 - Lenti convergenti e divergenti.

Costruzione delle immagini

Come per gli specchi, possiamo costruire l'immagine prodotta da una lente considerando il cammino dei raggi principali:

- 1) un raggio parallelo all'asse ottico si rifrange nel fuoco oltre la lente
- 2) un raggio passante per il fuoco si rifrange parallelamente all'asse ottico
- 3) il raggio che passa per il punto medio della lente, prosegue inalterato

Per le lenti convesse, abbiamo due casi diversi:

a) se l'oggetto è posto oltre il fuoco F , l'immagine è *reale* (si trova dall'altra parte della lente), *capovolta*

b) se l'oggetto è posto tra il fuoco F e la lente, l'immagine è *virtuale* (si trova dalla stessa parte dell'oggetto), *diritta*, *ingrandita*.

Nel caso invece, delle lenti concave, prolungando all'indietro i tre raggi che partono dalla punta dell'oggetto, essi passano tutte per l'estremo superiore dell'immagine, che risulta così *diritta*, *rimpicciolita* e *virtuale* (si trova dalla stessa parte dell'oggetto).

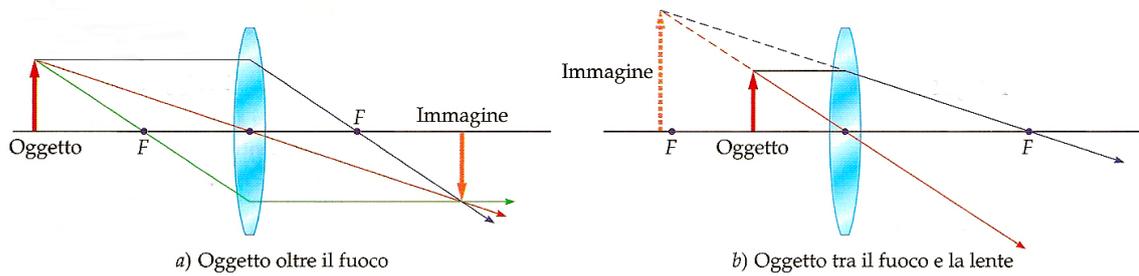


Fig.10.16 - Costruzione delle immagini nelle lenti convesse.

L'equazione delle lenti

Come nel caso degli specchi, la relazione che lega la distanza focale f con la distanza dell'oggetto e dell'immagine dalla lente è espressa dalla stessa equazione dove, convenzionalmente, la distanza è considerata positiva se l'immagine è reale, mentre è presa negativa per le immagini virtuali :

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} \quad (10.16)$$

In modo analogo agli specchi, l'ingrandimento è dato dall'equazione:

$$G = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad (10.17)$$

Il segno positivo indica immagini diritte, quello negativo immagini capovolte.

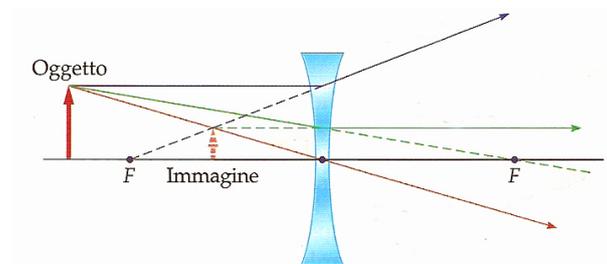


Fig. 10.17 - Costruzione delle immagini in lenti concave.