

CAPITOLO 5

L'OTTICA E IL TELESCOPIO LA PERCEZIONE VISIVA

Dovete dunque sapere, come sono circa due mesi che qua fu sparsa la fama che in Fiandra era stato presentato al conte Mauritio un occhiale, fabbricato con tale artificio, che le cose molto lontane le faceva vedere come vicinissime, sì che un uomo per la distantia di due miglia si poteva distintamente vedere.

(G. Galilei, *lettera al cognato B. Landucci*, 29/8/1609)

5.1 L'Ottica Geometrica e i Raggi luminosi

La luce è una *radiazione elettromagnetica*, cioè una perturbazione periodica dei *campi elettrico e magnetico* che si propaga nel vuoto e nei mezzi materiali. Da un punto di vista fisico non c'è alcuna differenza tra la luce emessa da una stella, il campo irradiato dall'antenna del nostro telefonino, il calore emanato da una stufa e i raggi X usati per le radiografie; è il nostro occhio che riesce a “captare” la prima ed è insensibile alle altre.

Analogamente a tutti i fenomeni propagativi ondulatori (come i suoni e le vibrazioni, per esempio) un'onda *elettromagnetica* è caratterizzata da una *velocità di propagazione* v (dipendente dal mezzo in cui avviene) e da una *frequenza* ν (numero di oscillazioni che si susseguono nell'unità di tempo e di lunghezza; è indipendente dal mezzo); note queste due, si può ricavare la *lunghezza d'onda* λ (la distanza tra due “picchi” vicini), applicando la relazione:

$$v = \lambda \nu$$

Nel vuoto $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s; in tutti gli altri mezzi v è minore di c , notoriamente la massima velocità possibile secondo le leggi della fisica.

L'occhio umano riesce a percepire le lunghezze d'onda da un minimo dell'ordine di $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ (violetto) ad un massimo di $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$ (rosso)¹; tale intervallo (o *banda*) dello *spettro elettromagnetico*² è detto, appunto,

¹ Sarebbe più corretto parlare di frequenze visibili (vedi fig. 5.1), anziché di lunghezze; come accennato all'inizio del paragrafo, la frequenza è indipendente dal mezzo di propagazione, al contrario della lunghezza che da esso dipende, tramite la relazione che la lega alla velocità.

luce. L'unità di misura per le lunghezze in ottica è usualmente il *micron* ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$).

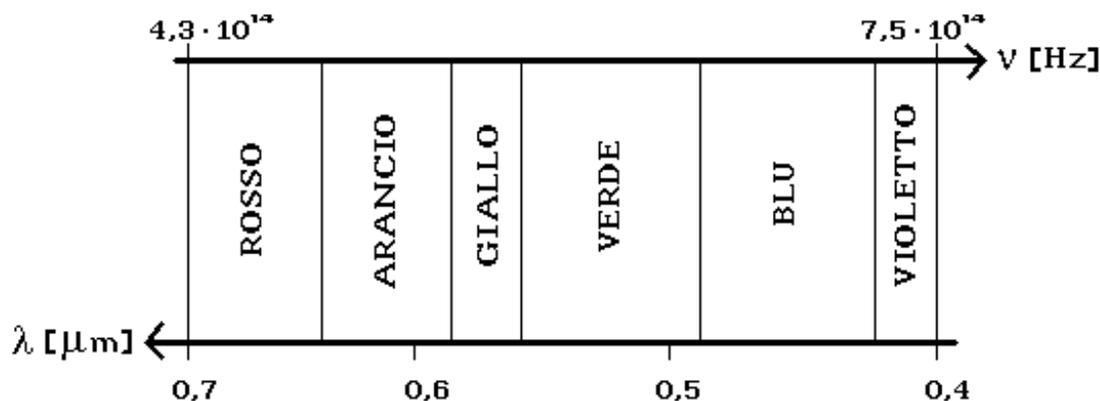


Figura 5.1

Sarebbe estremamente complicato studiare la luce con le leggi fisiche generalizzate che si applicano a tutti i campi elettromagnetici. Nei casi in cui le lunghezze d'onda in gioco sono molto più piccole dei mezzi materiali con i quali interagiscono, si può adoperare una teoria approssimata, l'*ottica geometrica*, che si basa sulle proprietà *geometriche* della luce quando incide su *discontinuità* dello spazio come, ad esempio, specchi e lenti. Una discontinuità è una regione di spazio riempita con un materiale diverso dall'aria o dal vuoto (vetro, acqua, metallo, ecc..).

Senza aver la minima pretesa di una trattazione esaustiva dell'argomento, introduciamo ora quei pochi concetti fondamentali che ci serviranno per spiegare a grandi linee il funzionamento di lenti, specchi e telescopi (naturalmente...).

Si definisce *raggio ottico* (o *luminoso*) la direzione nella quale si propaga una determinata radiazione luminosa che, nei casi che ci interessano, è una *linea retta*.

Ogni mezzo materiale è caratterizzato da un *indice di rifrazione* n che è inversamente proporzionale alla velocità di propagazione nel mezzo stesso secondo la relazione³

$$n = \frac{c}{v}$$

² Si definisce *spettro* l'insieme delle onde elettromagnetiche nelle varie frequenze.

³ Per i più "esigenti", aggiungiamo che $n = \sqrt{\epsilon_r}$, con ϵ_r la *costante dielettrica relativa* del mezzo.

Nel vuoto abbiamo $n = 1$; per l'aria n è praticamente pari a quello del vuoto; per tutti gli altri mezzi abbiamo $n > 1$.

Indice di rifrazione per alcuni mezzi alle frequenze ottiche

vuoto	1,0000
aria	1,0003
diamante	2,47÷2,75
quarzo	1,46
vetro crown	1,51÷1,57
vetro flint	1,54÷1,75
acqua	1,33

Un raggio ottico che *incide* su un materiale viene in parte *riflesso* e in parte *rifratto*, cioè si propaga all'interno del suddetto materiale secondo una nuova direzione. Per la fondamentale *legge di conservazione dell'energia*, la somma delle parti riflessa E_r e rifratta E_i' deve essere pari alla quantità di energia incidente E_i ⁴:

$$E_i = E_r + E_i'$$

Possiamo, quindi, introdurre due *coefficienti* r e t , rispettivamente *di riflessione* e *di rifrazione* (o *di trasmissione*), in modo da avere:

$$E_r = r \cdot E_i \quad E_i' = t \cdot E_i$$

Sostituendo queste due espressioni nella prima relazione si ottiene:

$$r + t = 1$$

I coefficienti r e t sono legati alle caratteristiche dei due corpi tramite gli indici di rifrazione n_1 e n_2 e all'angolo di incidenza θ_i del raggio (vedi figg. 5.2a e 5.2b).

I mezzi *trasparenti* (come il vetro) sono caratterizzati da un alto coefficiente di rifrazione t e, di conseguenza, da un basso coefficiente di riflessione r ; al contrario, i mezzi *riflettenti* (come gli specchi) sono caratterizzati da un alto coefficiente di riflessione r e un basso coefficiente di rifrazione t .

⁴ Nel bilancio energetico si dovrebbe considerare anche l'energia E_a assorbita dal corpo attraversato dalla luce e scrivere $E_i = E_r + E_i' + E_a$, e definire un *coefficiente di assorbimento* $a = E_a / E_i$.

La riflessione della luce da parte di un corpo riflettente (specchio) è un fenomeno indipendente dalla frequenza della radiazione incidente, mentre la rifrazione attuata da una lente dipende da essa. L'indice di rifrazione, infatti, è funzione della frequenza ed è maggiore per la parte bassa dello spettro (rosso) e minore per la parte alta (violetto); tale fenomeno è detto *dispersione* e tutti i corpi trasparenti sono *dispersivi* nella banda ottica.

Per il raggio luminoso che incontra la *superficie di discontinuità* tra due mezzi di propagazione, valgono le seguenti proprietà fondamentali (vedi fig. 5.2a):

- i raggi incidente, riflesso e rifratto e la perpendicolare alla superficie di discontinuità nel punto in cui arriva il raggio incidente, giacciono sullo stesso piano, detto *piano di incidenza*;

- l'angolo di incidenza q_i e l'angolo di riflessione q_i' sono uguali e giacciono da parti opposte rispetto alla perpendicolare alla superficie di discontinuità;

- l'angolo di incidenza q_i e l'angolo di rifrazione q_r giacciono da parti opposte rispetto alla perpendicolare alla superficie di separazione tra i due mezzi e sono legati dalla *legge di Snell*:

$$n_1 \cdot \text{sen } q_i = n_2 \cdot \text{sen } q_r$$

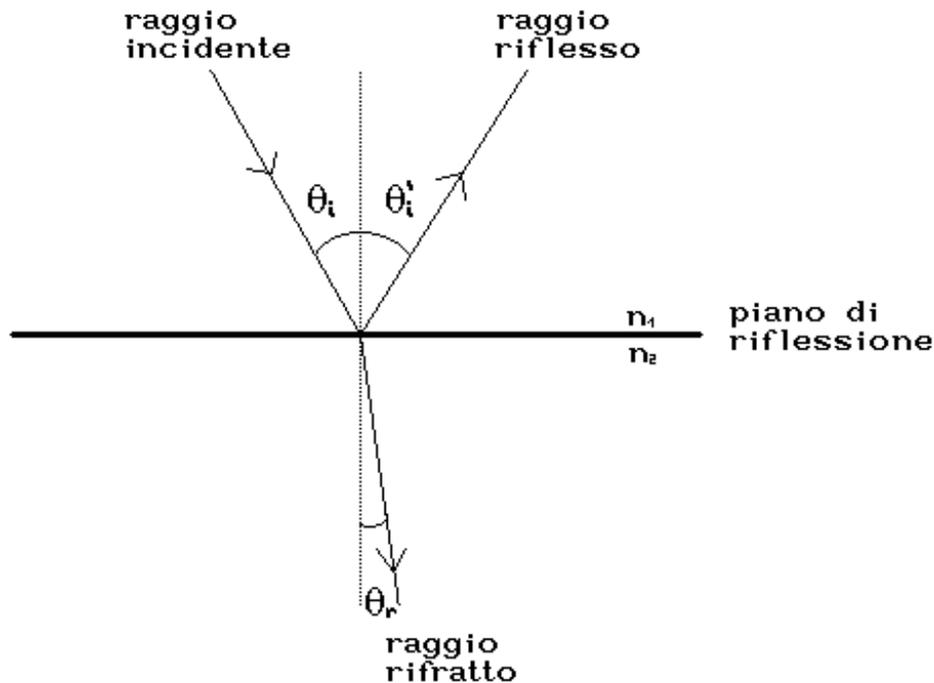


Figura 5.2a

Quest'ultima relazione, importantissima per lo studio e la costruzione dei dispositivi ottici, deriva dal famoso *principio di Fermat*, un postulato che il geniale matematico francese Pierre de Fermat (1601-1665) pose alla base di ogni fenomeno ottico. Tale principio stabilisce che tra tutti i possibili percorsi ottici tra A e B (vedi fig. 5.2b), quello che fisicamente si realizza è quello *minimo*, cioè quello che richiede il minor tempo possibile⁵. Il volenteroso lettore può provare a ricavare la legge di Snell tramite questo postulato, impostando geometricamente un problema di minimo.

Problema 5.1. Si dimostri la legge di Snell applicando il principio di Fermat.

⁵ La moderna ottica geometrica può fare a meno del postulato di Fermat, dato che tutte le sue leggi possono essere ricavate, assumendo opportune ipotesi, dalla teoria generale dell'elettromagnetismo, della quale il principio di Fermat diviene una dimostrabile conseguenza.

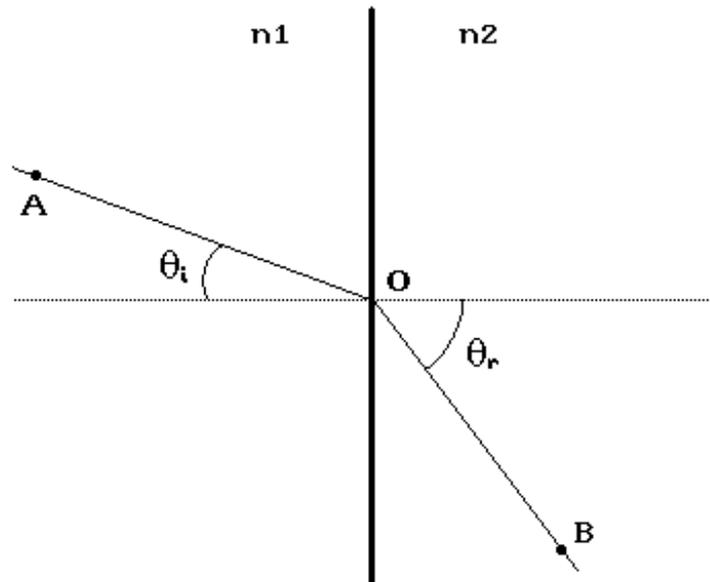


Figura 5.2b

A partire dal principio di Fermat e con le assunzioni da noi fatte sulle proprietà dei raggi luminosi, possiamo ricavare le equazioni che ci descrivono il comportamento dei raggi ottici quando incidono su discontinuità non piane come specchi e lenti. Questo è possibile perché si suppone che la superficie concava o convessa sia piana in prossimità del punto di incidenza. Inoltre, tutti i dispositivi ottici (come i telescopi) sono sistemi *centrati*, in cui le lenti o gli specchi che li compongono sono costituite da superficie simmetriche di rotazione con tutti i rispettivi assi centrati sulla stessa retta (*asse ottico*); è possibile, quindi, studiare il sistema ottico sul piano, lungo una qualsiasi sezione contenente l'asse ottico.

Senza ricorrere ad alcuna equazione, si può descrivere il dispositivo ottico tramite procedimenti grafici, tracciando direttamente alcuni fondamentali raggi luminosi che godono di ben determinate proprietà, alcune delle quali saranno esposte nei paragrafi che seguono.

5.2 Le Lenti e Gli Specchi

Le lenti sono costituite da una porzione di materiale trasparente (nei telescopi si adoperano particolari tipi di vetro) delimitato tra due superficie sferiche. Una lente può essere *convergente* o *divergente*, a seconda della con-

cavità o della convessità di ognuna delle due superficie e in rapporto ai rispettivi raggi di curvatura⁶.

Una lente è convergente quando tutti i raggi paralleli all'asse ottico che incidono su di essa fuoriescono convergenti in un unico punto F detto *fuoco* situato sull'asse ottico dalla parte opposta alla sorgente a distanza f dal centro della lente (vedi fig. 5.3a). In una lente divergente i raggi fuoriescono, ovviamente, divergenti, come se tutti provenissero da un punto F' detto *fuoco virtuale*, situato tra la sorgente e la lente, a distanza f da quest'ultima; in altre parole sono gli immaginari prolungamenti dei raggi a convergere in F' . In entrambi i casi f è detta *focale* o *distanza focale* della lente (vedi fig. 5.3b).

Una lente centrata e simmetrica ha le medesime proprietà, indipendentemente dalla parte in cui è situata la sorgente: possiede, quindi, un solo centro e due fuochi situati alla medesima distanza da esso. Ci sono particolari tipi di lenti convergenti e divergenti, dette *a menisco*, in cui le due superficie che le delimitano hanno curvature diverse; di conseguenza i fuochi saranno situati a due diverse distanze dal centro⁷.

Le lenti godono di tre importanti proprietà che ci permettono, come dicevamo prima, di studiarne il comportamento senza bisogno di fare alcun calcolo. In questo modo si può costruire la cosiddetta *immagine* (reale o virtuale) di una sorgente puntiforme o estesa "vista" attraverso una lente.

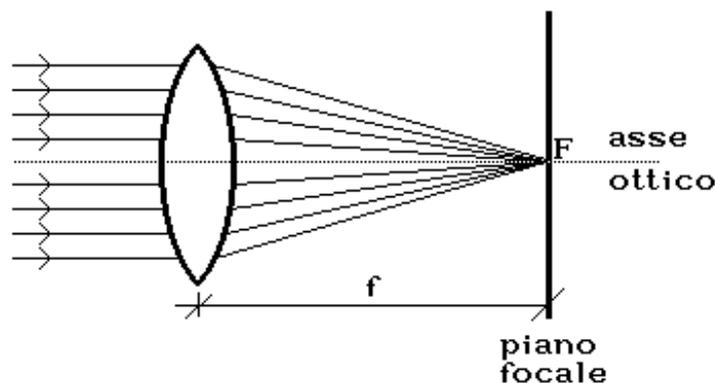


Figura 5.3a

⁶ Per *raggio di curvatura* di una superficie sferica si intende semplicemente il raggio della sfera alla quale la superficie appartiene.

⁷ Sono a menisco le lenti degli occhiali, che hanno sempre una convessità rivolta verso l'esterno, mentre all'interno hanno una concavità che può avere rispetto alla prima curvatura maggiore per le lenti divergenti usate dai miopi e minore per quelle convergenti usate dagli ipermetropi (vedi §5.9).

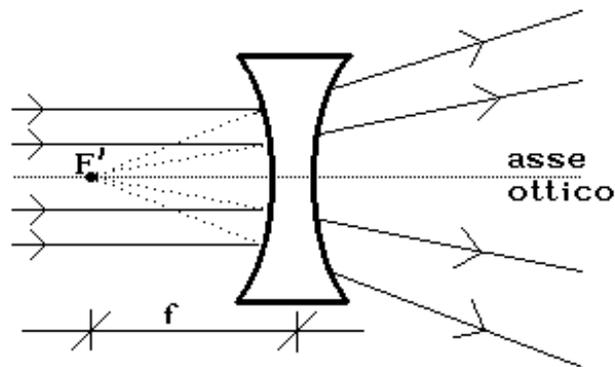


Figura 5.3b

- **I raggi ottici paralleli all'asse della lente convergono, realmente o virtualmente, in un unico punto detto fuoco che è situato dalla parte opposta (lenti convergenti), ovvero dalla stessa parte (lenti divergenti) rispetto alla sorgente.**
- **I raggi ottici passanti per il centro della lente la attraversano senza essere deviati.**
- **I raggi ottici, o i relativi prolungamenti virtuali, passanti per il fuoco, fuoriescono paralleli all'asse ottico.**

Nelle due figure 5.4a e 5.4b, vediamo applicate queste tre regole per costruire graficamente l'immagine di una sorgente estesa. Nel primo caso (fig. 5.4a), l'oggetto è posto ad una distanza superiore rispetto alla focale: si vede che i raggi ottici convergono dall'altra parte e ci restituiscono un'immagine reale (potremmo proiettarla su uno schermo, ad esempio, oppure sfruttarla come sorgente per una seconda lente). Nel secondo caso (fig. 5.4b), l'oggetto è posto tra il fuoco e il centro della lente: i prolungamenti virtuali dei raggi si incontrano dietro la sorgente reale, dandoci in prossimità del secondo fuoco un'immagine ingrandita di essa che, essendo virtuale, può essere soltanto osservata dal nostro occhio ma non può essere proiettata su uno schermo, né usata come sorgente per una seconda lente.

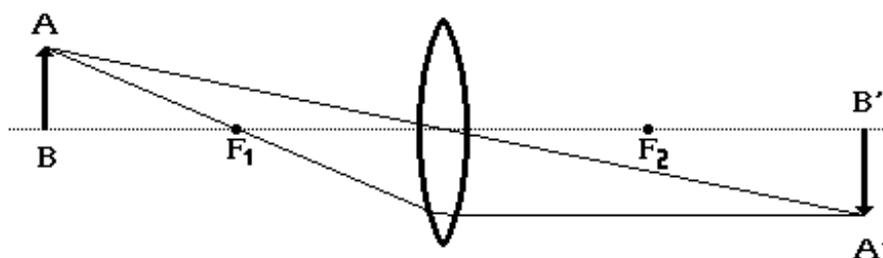


Figura 5.4a

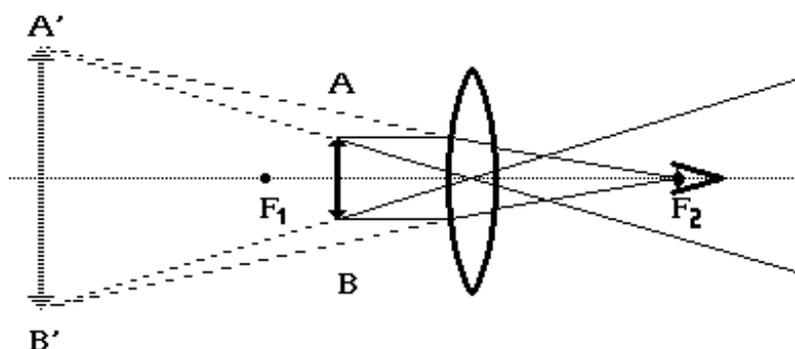


Figura 5.4b

Gli *specchi* sono costituiti da un supporto di vetro ricoperto da un sottile ed uniforme strato di materiale riflettente, di solito platino, argento o alluminio. Le forme degli specchi che si usano nei telescopi astronomici sono *piana, sferica, parabolica o iperbolica*⁸. La lavorazione di tali dispositivi deve avere un alto grado di accuratezza, al fine di assicurare un'elevatissima qualità degli strumenti ottici in cui sono adoperati.

Uno specchio ben costruito riflette la quasi totalità della radiazione incidente su di esso e non ha comportamenti dispersivi, ovverosia le sue proprietà non dipendono dalla frequenza.

Esaminiamo brevemente le proprietà degli specchi parabolici e sferici (vedi fig. 5.5). Uno specchio parabolico ha la proprietà di concentrare i raggi luminosi che incidono parallelamente all'asse ottico in un punto F (fuoco) dell'asse stesso situato ad una distanza f (focale) dal vertice del paraboloide. In uno specchio sferico, invece, i raggi ottici che incidono parallelamen-

⁸ Una parabola o un ramo di iperbole, fatte ruotare attorno al loro asse, generano una superficie rispettivamente parabolica e iperbolica della quale una sezione perpendicolare all'asse e contenente il vertice della parabola o dell'iperbole costituisce la forma geometrica di uno specchio parabolico o iperbolico. Uno specchio sferico ha la forma di una calotta sferica.

te all'asse non convergono in un unico punto, ma si distribuiscono in prossimità del centro della sfera generatrice su una superficie detta *caustica*.

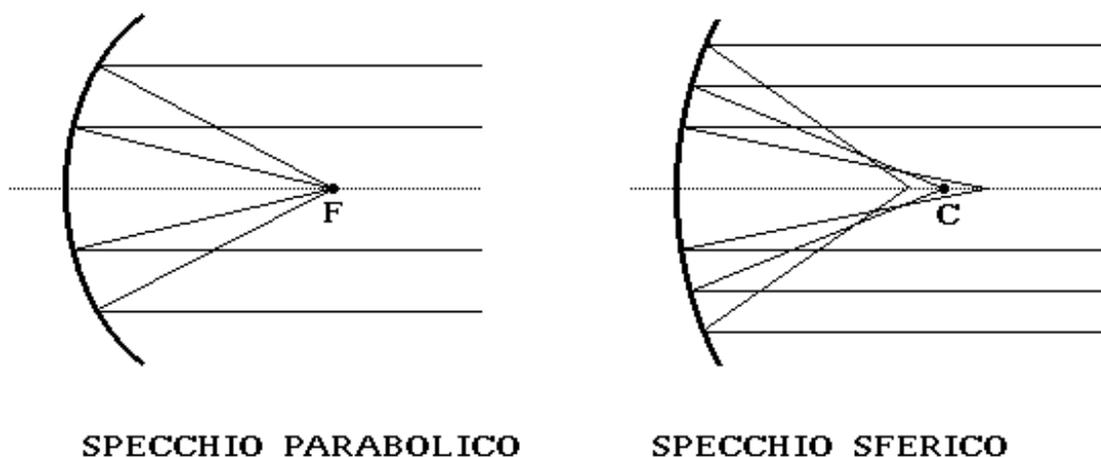


Figura 5.5

Entrambi questi specchi si adoperano nei telescopi riflettori (vedi §5.6); quello parabolico è più preciso, ma di più costosa lavorazione, mentre quello sferico necessita di dispositivi di correzione (vedi §5.5), ma il suo costo inferiore ne consente l'utilizzo anche in strumenti di fascia economica (e alla portata delle tasche degli astrofili...).

Per avere un'idea della precisione che ci vuole nella lavorazione delle superficie riflettenti dei telescopi, è interessante sapere che uno specchio "fuori misura" come il parabolico di 5 metri del telescopio *Hale* di Monte Palomar in California (inaugurato nel 1948) è stato ottenuto a partire da uno sferico di 34 m di curvatura dopo molti anni di rifinitura visto che la differenza tra superficie sferica e parabolica era dell'ordine del decimo di millimetro e la precisione richiesta inferiore al decimillesimo di millimetro!

5.3 Il Cannocchiale

Il primo cannocchiale dovrebbe essere stato costruito da un ottico fiammingo all'inizio del XVII secolo. Galileo, avuta notizia dell'invenzione, ne produsse uno proprio, perfezionandolo in seguito, e lo rivolse subito al cielo, facendo le sue importantissime scoperte. Keplero ne migliorò ancora le prestazioni sostituendo con una lente convessa quella concava dell'oculare (vedi più avanti) di Galileo.

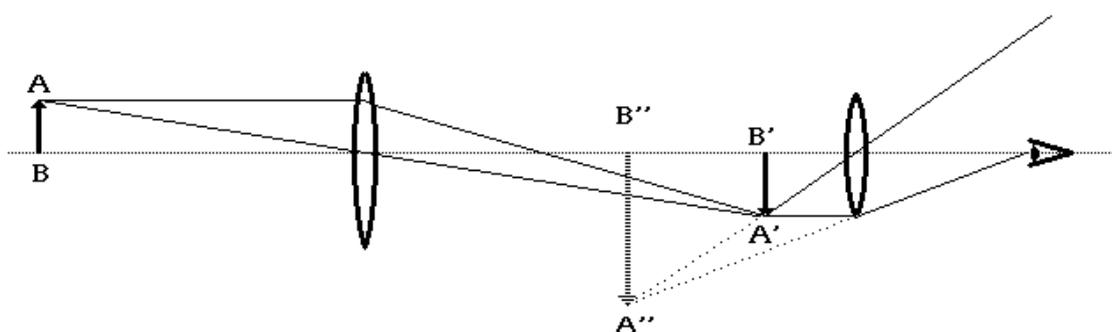


Figura 5.6a

In figura 5.6a è riportato lo schema di un semplice cannocchiale; abbiamo un sistema centrato di due lenti convergenti, una detta *obbiettivo* e rivolta verso la sorgente, un'altra detta *oculare*, rivolta verso l'occhio dell'osservatore e con la possibilità di traslare lungo l'asse ottico del sistema. Nella figura l'oggetto da osservare è situato a distanza finita e molto maggiore della focale dell'obbiettivo (nel disegno la scala non è stata rispettata per ragioni di praticità); l'oculare viene posto in modo che l'immagine $A'B'$ della sorgente AB cada in prossimità del suo fuoco e agisce, in questo modo, come una lente di ingrandimento, dandoci un'immagine $A''B''$ virtuale ingrandita e capovolta di AB (vedi §5.2). Il rapporto tra le dimensioni di $A''B''$ e AB è detto *ingrandimento lineare*.

Le sorgenti astronomiche sono poste a distanza praticamente infinita dall'obbiettivo (vedi fig. 5.6b), quindi la funzione del cannocchiale è quella di ingrandire gli angoli sotto i quali sono visti gli oggetti celesti, migliorando l'acuità visuale dell'occhio nudo (vedi §5.10). L'oculare (di focale f) viene posto in modo che il suo fuoco coincida con quello dell'obbiettivo (di focale f'). Il rapporto α' / α è detto *ingrandimento angolare* e si può dimostrare sfruttando la sola geometria piana che

$$\frac{a'}{a} = \frac{y}{y'} = \frac{f'}{f}$$

essendo y e y' rispettivamente le dimensioni trasversali di un fascio di raggi luminosi uscenti dall'obbiettivo e dall'oculare.

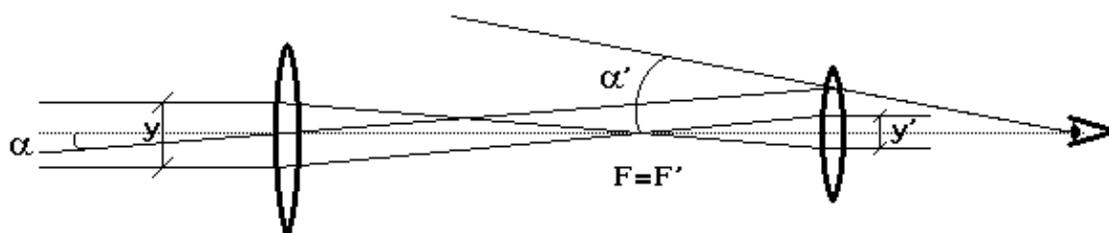


Figura 5.6b

Un cannocchiale di questo tipo è inadatto all'osservazione terrestre perché l'immagine osservata è capovolta; con l'inserzione di una terza lente tra le prime due si può raddrizzare l'immagine, a scapito della sua qualità perché ogni lente introduce alcuni difetti (vedi §5.5); per l'uso astronomico l'inversione dei riferimenti non crea eccessivi problemi, quindi non si usano dispositivi raddrizzatori.

Numerosi miglioramenti sono stati fatti al "primitivo" cannocchiale che noi abbiamo esaminato, fino ad arrivare al monumentale rifrattore di Yerkes (Wisconsin, USA), con un obiettivo di 102 cm di diametro...

Una lente, inoltre, assorbe una considerevole parte della radiazione luminosa incidente e questo degenera le prestazioni dei telescopi rifrattori al crescere del diametro e dello spessore delle lenti (vedi nota 4). Gli specchi che si usano negli strumenti ottici, al contrario, riflettono almeno il 90% della radiazione incidente e non sono dispersivi; per questo motivo i telescopi di qualità sono tutti riflettori (vedi §5.6).

5.4 Caratteristiche degli Strumenti di Osservazione

Un telescopio (o un cannocchiale) deve raccogliere la maggior quantità di luce possibile, ingrandire gli oggetti e separare particolari molto vicini tra loro. La capacità di raccogliere luce è una caratteristica molto importante perché permette, a parità di altre condizioni, di osservare corpi celesti più distanti e deboli. Essa è funzione del diametro dell'obiettivo.

La capacità di separare particolari molto vicini, o *potere risolutivo*, espresso in secondi d'arco, dipende dal diametro dell'obiettivo secondo la formula approssimata:

$$P = 115 / D \quad (D=\text{diametro in mm})$$

La formula è teorica poiché bisogna tener conto di diversi fattori esterni, il più importante dei quali è la *turbolenza atmosferica* che pregiudica notevolmente il potere risolutivo di un telescopio.

Abbiamo già visto che per l'ingrandimento vale la formula:

$$I_v = f_{OB} / f_{OC}$$

in cui f_{OB} e f_{OC} sono rispettivamente le focali dell'obiettivo e dell'oculare; **risulta evidente che se si vuole variare l'ingrandimento è sufficiente disporre di oculari con focali diverse.**

Un altro dato che caratterizza il telescopio è il *rapporto focale* dato dalla formula f / D dove D è il diametro dell'obiettivo e f la sua focale. Più questo rapporto è piccolo, più il telescopio è luminoso. In linea di massima, per rapporti che vanno da 3 a 8 il telescopio, oltre che per l'osservazione visuale, è adatto anche per la fotografia; per rapporti maggiori è adatto alle sole osservazioni visuali, eccetto per oggetti luminosi quali il Sole, la Luna, i pianeti.

5.5 Le Aberrazioni di Lenti e Specchi

Come abbiamo accennato nel §5.1, l'angolo di rifrazione di un raggio luminoso incidente dipende dalla frequenza della radiazione; più precisamente, esso diminuisce al crescere della frequenza. Poiché un fascio di *luce bianca*, come vedremo nel §5.10, è costituito dall'insieme di tutte le lunghezze d'onda spettrali, ogni componente verrà rifratta secondo angoli diversi, scomponendo spazialmente il raggio luminoso nelle sue diverse componenti *monocromatiche*, costituite, cioè, da una sola frequenza.

Ciò comporta che i raggi rifratti da una lente sono scomposti nei colori dell'iride, come avviene anche con un prisma; ogni colore, quindi, viene focalizzato in un punto diverso. Questa *aberrazione*⁹ si chiama *cromatismo* ed il suo effetto è che l'immagine avrà i contorni colorati, rendendo fastidiosa la visione. E' da sottolineare che il cromatismo è una caratteristica delle lenti e non degli specchi. Per correggere questa aberrazione si deve applicare sulla lente convessa una lente divergente a menisco (vedi nota 7) di un vetro con un coefficiente di rifrazione più alto; in questo modo si riesce a introdurre un'aberrazione cromatica uguale e contraria a quella della lente convessa, con la sola conseguenza di allungare un po' la distanza focale. La lente risultante è detta *doppio acromatico* ed è presente, in pratica, su tutti i moderni telescopi rifrattori.

La *sfericità* è un'aberrazione di lenti e specchi sferici (vedi §5.2) e consiste nella focalizzazione dei raggi in punti diversi (vedi fig. 5.5); attorno all'immagine si forma, quindi, un alone luminoso. Anche questa aberrazione

⁹ Non bisogna pensare alle aberrazioni come difetti costruttivi: le aberrazioni esisterebbero, infatti, anche in lenti o specchi perfetti – se potessimo realizzarli...

viene corretta abbastanza bene progettando opportunamente il doppietto acromatico; con gli specchi sferici occorre invece interporre una *lastra asferica*, cioè una particolare lente che introduce una sfericità uguale e contraria a quella dello specchio da correggere.

La *coma*, infine, è un'aberrazione presente sia nelle lenti che negli specchi ed è dovuta ad un imperfetto allineamento degli assi ottici. Essa produce sul piano focale un'immagine di una stella che non è più un puntino, ma un piccolo ventaglio di luce simile ad una cometa (“coma” in latino significa “chioma”) le cui dimensioni aumentano quanto più lontana è l'immagine dall'asse ottico, sul quale la coma è assente. Questa aberrazione, fastidiosa soprattutto quando si devono ottenere delle immagini su una superficie di grande estensione (quella della lastra fotografica ad esempio) viene corretta in modo accettabile da speciali obbiettivi chiamati appunto *correttori di coma*.

5.6 Il Telescopio Riflettore

I telescopi *riflettori* si distinguono dai *rifrattori* per l'uso di specchi invece che di lenti (a parte l'oculare che è praticamente lo stesso nei due strumenti).

La prima teorizzazione sul funzionamento dei riflettori fu fatta da Newton nelle sue *Lectiones Opticae* (1669) e lui stesso costruì un piccolissimo prototipo con specchio di 25 mm e focale di 15 cm. Da quel momento i riflettori soppiantarono progressivamente i rifrattori, fino ad arrivare ai “giganti” di oggi, come il *Bolshoi Telescop* situato nel Caucaso (specchio parabolico di 6 metri) in funzione dal 1975, attualmente il più grande telescopio del mondo. In un telescopio tradizionale, 3 o 4 metri di diametro per lo specchio principale sono considerati un buon compromesso tra costi e benefici. Gli strumenti amatoriali hanno specchi che vanno dai 12 ai 30 cm di diametro. E come non menzionare il Telescopio Spaziale (240 cm) che, dopo uno sfortunato avvio dovuto a errori di progetto, si è rivelato lo strumento ottico più prezioso attualmente a disposizione degli astronomi.

La maggiore facilità di lavorazione, l'assenza di cromatismo e il bassissimo assorbimento, fanno preferire i riflettori ai rifrattori. Si possono inoltre raggiungere rapporti focali più bassi rispetto ai rifrattori il che rende i riflettori molto più luminosi.

Lo svantaggio principale è la necessità di eseguire periodicamente la *rialuminatura* delle superficie riflettenti per ripristinarne le proprietà ottiche che si deteriorano col tempo. Inoltre, nei modelli più grandi, il tubo è aperto e, quindi, si creano delle turbolenze d'aria al suo interno che infastidiscono la visione.

Nella figura 5.7 vediamo gli schemi dei quattro tipi di telescopio che verranno brevemente descritti nei paragrafi che seguono.

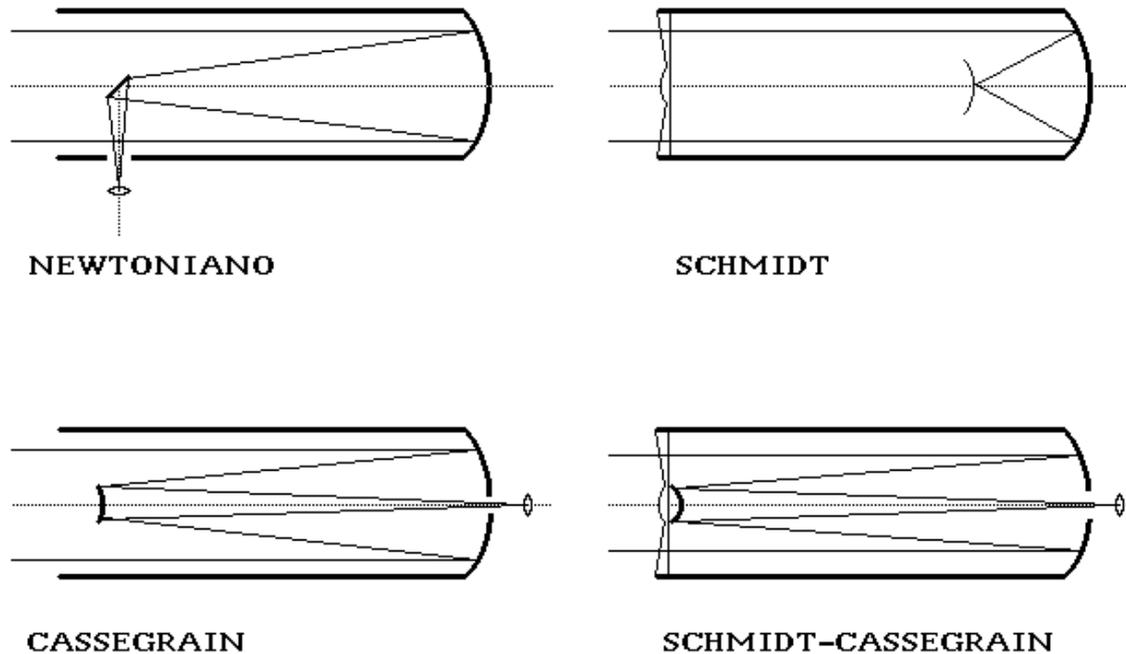


Figura 5.7

5.6.1 Telescopio Newtoniano

In un riflettore *newtoniano* i raggi dopo essere stati riflessi dallo specchio principale parabolico, vengono deviati di 90° da uno specchio piano detto *secondario*, prima di convergere nel fuoco. Questo sistema, molto semplice costruttivamente, richiede che il tubo del telescopio sia lungo quanto la focale del suo specchio e quindi un ingombro notevole per strumenti di una certa potenza. Il punto di osservazione è situato all'estremità opposta dello specchio principale.

5.6.2 Telescopio Cassegrain

Il sistema *Cassegrain* possiede uno specchio principale parabolico con un foro al centro e uno specchietto convesso iperbolico¹⁰ per secondario.

I raggi riflessi dal primario vengono fatti convergere sul secondario; da questo sono riflessi di nuovo verso il primario e, attraverso il foro, convergono nel fuoco situato all'esterno del tubo portante, dietro lo specchio principale. La riflessione del secondario permette di conseguire un allungamento della focale dello specchio principale. Si parlerà quindi di *focale equivalente*. Questo tipo di telescopio è molto compatto pur mantenendo lunghe focali. L'oculare è posto sul retro dello specchio, come nei rifrattori. È molto maneggevole, poco ingombrante, molto costoso ed adatto soprattutto all'osservazione di pianeti o comunque di oggetti relativamente luminosi.

5.6.3 Telescopio Schmidt

Questo tipo di telescopio è adatto solamente all'osservazione fotografica avendo il fuoco che cade all'interno. È costituito da uno specchio sferico e da una *lastra correttrice asferica* posta nel centro di curvatura dello specchio.

La lastra correttrice serve ad eliminare l'aberrazione sferica introdotta dallo specchio (vedi §5.5). La lastra fotografica dovrà essere posta nel fuoco all'interno e dovrà essere curva, in quanto il campo di questo strumento è curvo. Il diametro della lastra è più piccolo del diametro dello specchio. Ciò contribuisce ad eliminare le aberrazioni di sfericità e coma.

I vantaggi di questo telescopio sono due: grande luminosità e campo esteso. Il rapporto f/D (con D diametro della lastra correttrice) può essere molto piccolo e il telescopio può avere, quindi, focali cortissime. L'estensione del campo può arrivare, in alcuni casi, fino a 25° : con un'unica lastra fotografica si riesce cioè a riprendere una porzione di cielo di 25° di diametro con una buona definizione fino al bordo.

5.6.4 Telescopio Schmidt-Cassegrain

Il telescopio Schmidt-Cassegrain è uno strumento sia fotografico che visuale ed ha trovato largo impiego tra gli astrofili sia per maneggevolezza che per compattezza. Questo telescopio è una combinazione tra uno Schmidt e un Cassegrain. Lo specchio sferico è forato al centro; i raggi che esso riflette verso la lastra correttrice sono raccolti da uno specchietto divergente iperbolico che, oltre ad allungare la focale, li convoglia verso il foro dello specchio principale.

5.7 Gli Oculari

¹⁰ Uno specchio iperbolico possiede un fuoco virtuale dalla parte della sua concavità ed ha la proprietà di focalizzare i raggi luminosi che convergono virtualmente sul fuoco stesso.

L'oculare è un elemento essenziale del telescopio; serve a dare l'ingrandimento desiderato dell'immagine. Ne esistono vari tipi che si differenziano soprattutto per il numero di lenti usate.

Gli oculari di *Huygens* e di *Ramsden* sono i più economici e vanno bene con telescopi aventi grandi rapporti focali (da $f/10$ in su). La ragione sta nel fatto che, con piccole focali, non riescono a correggere le maggiori aberrazioni dando un'immagine accettabile solo al centro. Per queste si preferiscono oculari di *Kellner*, di *Plössl*, *ortoscopici* e di *Erfle*, aventi un minimo di tre lenti, che consentono di ottenere delle immagini accettabili anche ai bordi del campo.

Un altro fattore del quale bisogna tener conto è la focale dell'oculare che non dovrà essere né troppo lunga, né troppo corta rispetto al diametro dell'obbiettivo. Il minimo ingrandimento dovrà essere all'incirca $1/6$ del diametro, il massimo due volte il diametro.

Un'altra caratteristica è l'*estrazione pupillare*, ossia la distanza dall'oculare alla quale si deve mettere l'occhio per raccogliere tutti i raggi luminosi della immagine. È buona nei *Plössl*, negli *ortoscopici* e negli *Erfle*, un po' meno negli *Huygens* e nei *Ramsden*.

Il *campo apparente* è l'estensione dell'immagine che si può vedere con un oculare. L'*Huygens* ha un campo da 25° a 40° , il *Ramsden* da 30° a 40° , il *Kellner* da 35° a 50° , il *Plössl* da 35° a 50° , l'*ortoscopico* da 30° a 50° e l'*Erfle* da 50° a 70° .

Per concludere, qualche cenno sulla *lente di Barlow*: interposta tra oculare e telescopio, serve per aumentare l'ingrandimento e normalmente si trova in commercio da $2\times$, ovvero raddoppia l'ingrandimento. Essa agirà sulla lunghezza focale dell'oculare come divisore; ad esempio, con un oculare da 26 mm e una *Barlow* $2\times$ la focale equivalente diventerà 13 mm. Infatti, ricordando che per l'ingrandimento visuale vale la formula

$$I_v = f_{OB} / f_{OC}$$

possiamo verificare che dimezzando f_{OC} raddoppia l'ingrandimento.

5.8 La Percezione Visiva come Caratteristica Soggettiva

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto alcune proprietà fisiche che riguardano i raggi luminosi, come essi vengono rifratti o riflessi da lenti e specchi e come, sfruttando le leggi dell'ottica, si possono costruire gli insostituibili strumenti per lo studio del cielo.

Un telescopio può essere usato essenzialmente in due modi: per l'osservazione visuale e quella fotografica (vedi Cap. 6). Entrambe sono alla

portata dell'astrofilo (e quindi anche alla nostra portata!), ma a livello di ricerca scientifica l'astronomia si avvale esclusivamente della registrazione degli oggetti celesti su pellicola fotografica o in forma elettronica con i moderni CCD¹¹, seguita da un'attenta analisi delle immagini raccolte che vengono anche confrontate con altre in archivio inerenti allo stesso soggetto.

I limiti dell'osservazione visuale derivano dalle limitazioni insite nella percezione delle immagini da parte dell'occhio umano. Ed è proprio delle caratteristiche della visione che parleremo in questi ultimi tre paragrafi.

Ad uno *stimolo* luminoso costituito da onde elettromagnetiche dello spettro visibile (vedi § 5.1) provenienti dall'oggetto che stiamo osservando, per esempio il campo all'interno dell'oculare, corrisponde una *sensazione visiva* riprodotta dal nostro cervello sulla base di quanto raccolto dall'occhio (o da entrambi gli occhi in caso di *visione binoculare*).

La percezione visiva è, come tutte le sensazioni umane, *soggettiva* poiché, come vedremo, dipende da come noi filtriamo ed elaboriamo gli stimoli esterni, con variazioni da individuo a individuo. E' evidente che la sensazione visiva è correlata alle caratteristiche fisiche dell'immagine; si possono, quindi, descrivere le sue proprietà tramite parametri *psicofisici* che permettono di *quantificare* la percezione visiva sulla base delle caratteristiche *medie* della visione umana.

Come è possibile far corrispondere tali parametri psicofisici a quelli fisici ad essi relativi esulerebbe dallo scopo di questa trattazione. Noi ci limiteremo a descrivere le principali proprietà della percezione visiva e come queste caratterizzino l'osservazione visuale astronomica.

5.9 L'Occhio Umano

Prima di tutto è opportuno dare una descrizione sommaria del funzionamento del "sensore" della percezione visiva, cioè l'occhio umano, le parti principali del quale sono rappresentate in figura 5.8.

La superficie esterna anteriore dell'occhio è ricoperta da una membrana trasparente, detta *cornea*, che, insieme al *cristallino*, una vera e propria "lente", focalizza un'immagine reale e capovolta degli oggetti sulla *retina*, una membrana sensibile interna all'occhio. La luce che incide sulla retina viene convertita in segnali elettrici. Attraverso il *nervo ottico*, questi vengono condotti al cervello che provvede ad elaborarli e a generare la sensazione visiva.

¹¹ Coupled Charge Device (Dispositivo ad Accoppiamento di Carica); componente elettronico in grado di memorizzare un'immagine a colori sotto forma di una matrice di punti costituita da determinati valori di carica elettrica. Oltre ad essere usato nelle videocamere portatili, sta progressivamente sostituendo la pellicola fotografica in molti campi dell'osservazione astronomica.

La retina è costituita da uno strato di 0,2 mm di due tipi di cellule diverse: i *coni* e i *bastoncelli*, in totale 125 milioni di elementi. I bastoncelli sono sensibili all'*intensità luminosa*, i coni al *colore*. In situazioni di bassa luminosità (*luce crepuscolare*) i coni non sono eccitati ed è per questo che in tali condizioni vediamo “in bianco e nero”. Siamo nella tipica situazione in cui ci si trova durante un'osservazione astronomica; solo delle stelle più luminose possiamo percepire il colore, mentre tutte le altre, come pure le sgargianti nebulose (nelle foto delle riviste specializzate...) che puntiamo col nostro telescopio, ci appaiono di un bianco un po' sbiadito.

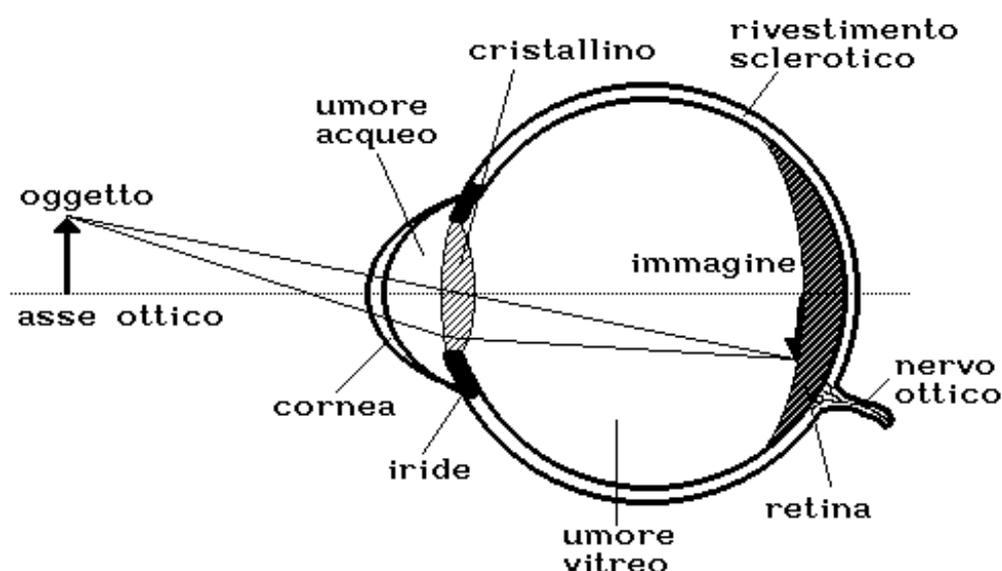


Figura 5.8

Di coni ce ne sono di tre tipi sensibili a tre colori fondamentali: il *rosso*, il *verde* e il *blu*. Essi, inoltre, sono circa un quarto in numero rispetto ai bastoncelli; ciò significa che il nostro occhio ha maggiore *potere risolutivo* per punti luminosi piuttosto che per punti colorati. Infatti, a meno di variazioni individuali, possiamo distinguere due punti luminosi su sfondo scuro che formano con la pupilla un angolo di un primo d'arco (due punti separati da 1 mm visti dalla distanza di 3,44 m), ma se i due punti fossero di diverso colore, non saremmo in grado di apprezzare anche la differenza cromatica se non raddoppiando (almeno) la distanza fra di essi.

I coni sono più concentrati al centro della retina (*macchia lutea*), i bastoncelli predominano all'esterno; per questo motivo, **per aumentare l'acuità visuale e la sensibilità quando si osserva col telescopio, si**

consiglia di tenere l'occhio obliquo, affinché l'immagine si proietti in una zona della retina ricca di bastoncelli.

L'occhio comprende anche un diaframma opaco, detto *iride*, che regola le dimensioni dell'apertura (la *pupilla*) attraverso la quale la luce entra: un'azione muscolare riflessa provvede a restringerla se l'intensità luminosa è troppo elevata e ad allargarla se è bassa. Il diametro della pupilla può variare tra un minimo di poco più di 1 mm (luce forte) e un massimo di circa 6 mm (al buio).

Anche la curvatura del cristallino può essere regolata tramite un'azione muscolare. In questo modo, l'occhio è in grado di mettere a fuoco oggetti posti a varie distanze da esso: una persona dotata di vista normale può focalizzare oggetti tra l'infinito e la *distanza minima di visione distinta*, il cui valore è di circa 20÷25 cm. Il processo di messa a fuoco è detto *accomodamento*.

La *sensazione visiva* è il risultato dell'elaborazione da parte dell'occhio stesso e del cervello delle due immagini focalizzate sulle retine dei due occhi. Si è scoperto, infatti, che i segnali elettrici provenienti dai 125 milioni di cellule sensibili della retina vengono affasciati in un numero molto minore di terminazioni nervose che costituiscono il *nervo ottico*; quest'ultimo porterà al cervello il risultato di questa prima elaborazione, il quale provvederà a darci la sensazione visiva.

Gli occhi possono presentare difetti che pregiudicano la corretta visione. Tra questi, i più comuni sono le *ametropie*, la *presbiopia* e l'*astigmatismo*.

Le ametropie sono connesse ad una deformazione dell'occhio lungo il suo asse longitudinale (vedi fig. 5.9). Nella *miopia*, l'immagine di un oggetto lontano, da cui provengono quindi raggi luminosi pressoché paralleli, viene a formarsi su un piano anteriore a quello retinico e l'oggetto viene visto sfocato; se, invece, l'oggetto si trova a distanza ravvicinata, esso può ancora essere visto distintamente. La miopia si corregge utilizzando lenti divergenti.

Nell'*ipermetropia* accade esattamente l'opposto: l'immagine si forma posteriormente alla retina e perciò sono gli oggetti vicini ad apparire sfocati. L'*ipermetropia* si corregge attraverso lenti convergenti.

La presbiopia è una progressiva perdita di elasticità del cristallino che riduce la capacità di accomodamento dell'occhio e, di conseguenza, fa aumentare la distanza minima di visione distinta. La presbiopia si instaura lentamente anche nell'occhio normale a partire dai 40-45 anni, ed è più avvertita dagli ipermetropi (che, come detto, hanno già problemi a vedere da vicino) che non dai miopi. Anche la presbiopia si corregge con lenti convergenti.

L'*astigmatismo* è un'anomalia della curvatura della cornea la quale, da sferica, tende a diventare cilindrica: i raggi luminosi, allora, non sono più focalizzati in un punto ma lungo un determinato asse e l'oggetto viene visto

sfocato indipendentemente dalla distanza a cui si trova. L'astigmatismo si corregge con lenti *cilindriche*¹².

In ogni caso, **mai usare gli occhiali quando si osserva dall'oculare di un telescopio**; tramite l'apposita manopola si può adattare la messa a fuoco al proprio occhio correggendo miopia e ipermetropia. Usare gli occhiali, oltre che rendere difficoltosa l'osservazione, può rigare la superficie antiriflesso dell'oculare, come pure le parti dure di quest'ultimo possono graffiare i vostri occhiali!

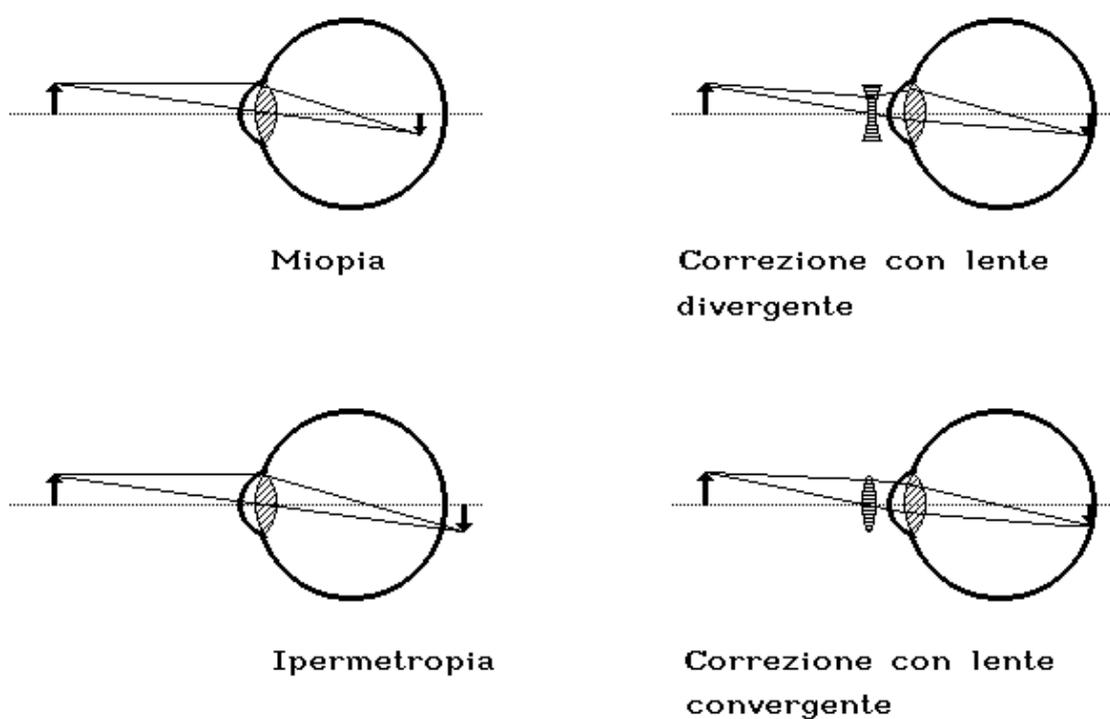


Figura 5.9

5.10 Generalità sulla Sensazione Visiva

¹² Le lenti cilindriche sono un dispositivo ottico non simmetrico e sono costituite da due superficie cilindriche di diverso raggio; hanno la proprietà di focalizzare i raggi luminosi incidenti lungo una linea parallela agli assi dei cilindri generatori.

La sensazione visiva è un fenomeno assai complesso che comporta informazioni di diversa natura. Tra di esse distinguiamo:

- 1) *informazione spazio-temporale*: conformazione degli oggetti nel campo visivo, loro estensione, posizione e movimenti.
- 2) *informazione luminosa e cromatica*: intensità della sensazione di luminosità o brillantezza degli oggetti e loro caratteristiche cromatiche.

Nei limiti di queste dispense, ci interessa dare qualche elemento sulle informazioni del secondo tipo, studiate dalla *fotometria* e dalla *colorimetria* che costituiscono due branche della *fisica tecnica*.

Una caratteristica fondamentale della visione è che la sensazione di luminosità di un oggetto, sia esso una sorgente (una lampadina, una stella), o un corpo da essa illuminato (un dipinto, una parete), non è proporzionale alla potenza fisica emessa o riflessa dall'oggetto. Per *potenza fisica* W intendiamo l'intensità del campo elettromagnetico che costituisce i raggi luminosi (vedi § 5.1).

Il nostro occhio è più sensibile alla luce monocromatica *giallo-verde* di lunghezza $0,55 \mu\text{m}$. Radiazioni monocromatiche di lunghezza maggiore (verso il rosso fino a $0,77 \mu\text{m}$) o minore (verso il blu fino a $0,38 \mu\text{m}$) vengono percepite sempre meno intensamente secondo una curva ricavata sperimentalmente (vedi fig. 5.10) e definita *curva normale di visibilità* $V(\lambda)$.

Tramite questa curva possiamo definire il *flusso luminoso* di una radiazione monocromatica

$$\Phi = V(\lambda) \cdot W$$

che rappresenta una misura equivalente dello stimolo percepito; uguale flusso luminoso significa uguale sensazione di luminosità, essendo diverse, per quanto detto sopra, le potenze luminose W che danno tali sensazioni. Il flusso luminoso costituisce una *grandezza psicofisica* che lega, cioè, una grandezza fisica come la potenza ad una psichica come la visibilità. In figura 5.10 è rappresentato il grafico del *coefficiente di visibilità* $v(\lambda)$, ottenuto dividendo $V(\lambda)$ per il valore massimo V_{max} che la curva raggiunge in corrispondenza della radiazione a $0,55 \mu\text{m}$.

Altra grandezza psicofisica è l'*intensità luminosa* che rappresenta il flusso emesso in un angolo solido unitario; si misura in *candele* (cd) e costituisce l'unità di misura primaria della fotometria; la candela è inserita nel Sistema Internazionale (SI) delle unità di misura.

La magnitudine di un corpo celeste è basata proprio sull'intensità luminosa della radiazione dell'astro in questione.

Altre caratteristiche fotometriche della visione che influenzano l'osservazione astronomica sono l'*acuità visuale*, la *soglia di visibilità* e l'*abbagliamento*.

L'acuità visuale rappresenta la capacità di distinguere punti vicini (una stella doppia, per esempio); in condizioni ottimali è pari a 1' d'arco.

La soglia di visibilità rappresenta la minima intensità luminosa percepibile.

Uno strumento ottico come il telescopio è in grado di aumentare sia l'acuità che la soglia di visibilità proprie dell'occhio umano.

L'abbagliamento è la momentanea riduzione delle facoltà visive provocata dalla presenza nel campo visivo di un oggetto molto brillante rispetto agli altri circostanti.

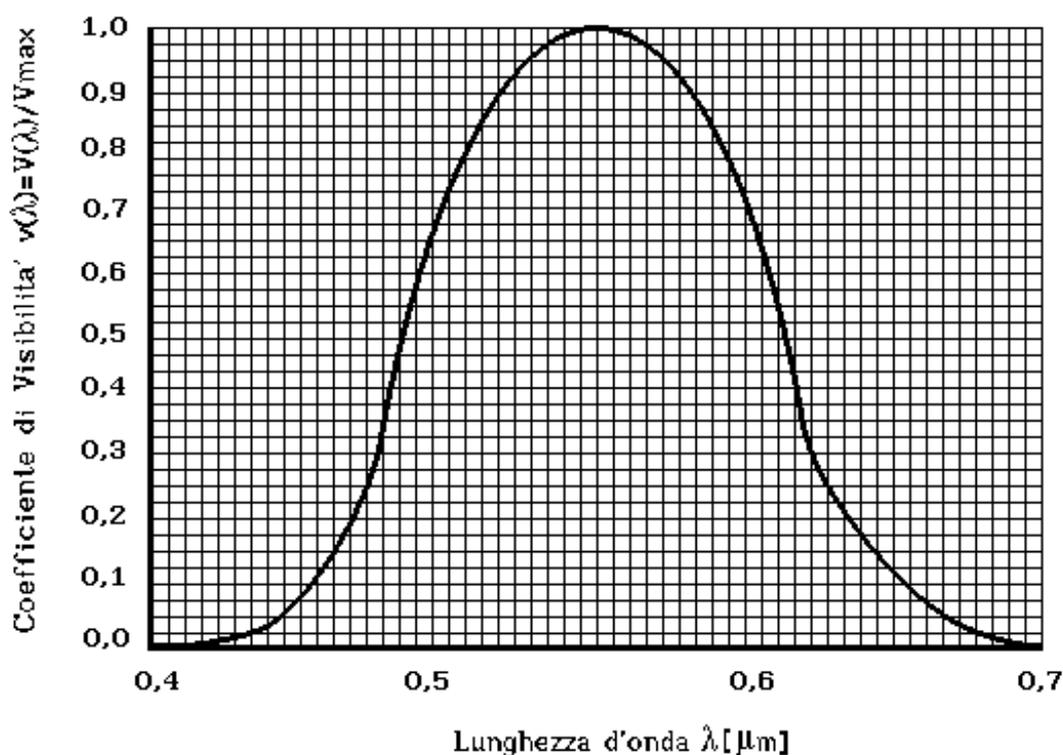


Figura 5.10

Questi parametri non sono assoluti; la visione è una sensazione “con memoria”, ovvero è fortemente influenzata da ciò che si è osservato in precedenza. Il nostro cervello è in grado di adattare la percezione all'intensità globale dello stimolo. Se la luminosità media degli oggetti nel campo visivo

è elevata, la soglia di visibilità tende a salire, mentre se è bassa, la soglia tende a scendere. Questo adattamento non è istantaneo, ma richiede un certo numero di minuti che dipende dalla differenza tra i due stimoli medi.

Quando si arriva sul campo di osservazione essendo prima passati per luoghi illuminati, si ha una ridotta percezione del cielo stellato; occorre aspettare al buio un po' di tempo per permettere al cervello di adattarsi alle nuove condizioni di luminosità. Se il cambiamento è troppo repentino, si ha un abbagliamento momentaneo; è come quando si esce da un luogo buio verso uno spazio assolato, o quando qualcuno accende improvvisamente una luce nella nostra camera buia appena ci siamo svegliati...

Per questo motivo, durante le osservazioni astronomiche bisogna evitare di accendere luci di qualsiasi tipo; anche una semplice torcia elettrica può disturbare la visione per vari minuti.

La percezione dell'intensità luminosa è, inoltre, legata al *contrasto* presente nel campo visivo; le macchie solari ci appaiono quasi nere perché molto meno luminose del resto del disco solare, ma prese singolarmente sarebbero anch'esse molto brillanti, così come ad occhio nudo vediamo scuri i "mari" della Luna perché contrastati dalle altre zone della superficie più riflettenti, mentre isolati nel campo del nostro oculare gli stessi si rivelano molto più chiari.

Diamo ora qualche breve cenno di colorimetria. Oltre all'intensità, infatti, abbiamo altri due attributi della sensazione visiva legati alla percezione del *colore*: il *tono* (o *tinta*) e la *saturatione*.

Il tono si riferisce al colore base con cui classifichiamo la sensazione luminosa: rosso, verde, blu, giallo, ecc...

La saturazione si riferisce alla purezza del colore; possiamo avere un rosso più o meno vivo o sbiadito. Colori a bassa saturazione tendono al *grigio*, perdendo così l'attributo cromatico della sensazione. Il grigio, infatti, non è un colore, ma una sensazione di sola luminosità più o meno intensa.

Le radiazioni monocromatiche vengono percepite come colori puri (o saturi): i cosiddetti *colori spettrali*. Le radiazioni composte da onde di lunghezza diversa, come sono le tipiche sorgenti che illuminano il nostro campo visivo (luce del sole, lampadine, ecc.), sono percepite come colore più o meno saturo che rappresenta la sensazione risultante dalla combinazione di una radiazione di *spettro continuo*.

Luci di differenti caratteristiche cromatiche si possono sommare tra di loro per ottenere un terzo colore. Le regole sperimentali che definiscono l'*additività* dei vari colori sono le *leggi di Grassmann*. E' grazie a tale principio che funzionano la televisione, il cinema, la fotografia e la stampa.

Da tre sorgenti fondamentali, il rosso, il verde e il blu, si riescono ad ottenere, per additività, quasi tutti i colori normalmente visibili.

Se ricordiamo quanto detto nel §5.9, nel nostro occhio vi sono tre tipi di recettori (coni) per tre diverse bande luminose fondamentali: rosso, verde e blu; ognuno viene stimolato in modo differente a seconda dell'intensità della gamma cromatica a cui esso è sensibile. La sensazione risultante dall'elaborazione da parte del sistema nervoso dei tre diversi stimoli è il colore, che è una nostra percezione e non una proprietà fisica della radiazione luminosa. La sensazione del colore verde, per esempio, può essere data da una radiazione pura (monocromatica) a $0,5 \mu\text{m}$, oppure da una radiazione costituita da onde nella banda del giallo insieme ad onde della banda del blu (vedi fig. 5.1). Nel primo caso "verde" è un attributo convenzionalmente dato ad una radiazione in un ben determinato campo spettrale, nel secondo caso è una caratteristica della sensazione visiva.