

# I telescopi ottici

## 0.1 Introduzione

I telescopi costituiscono i collettori delle informazioni inviate dagli oggetti celesti sotto forma di radiazione elettromagnetica. Poiché tale radiazione ha uno spettro che si estende dalle onde radio ai raggi  $\gamma$ , in ognuna delle bande di interesse astrofisico sono stati costruiti e sviluppati telescopi appropriati.

## 0.2 Definizioni e parametri fondamentali

I telescopi ottici hanno come archetipo il cannocchiale astronomico che schematicamente è costituito da una coppia di lenti, dette obiettivo ed oculare, poste all'estremità di un tubo rigido in modo da avere un fuoco in comune: l'obiettivo raccoglie e concentra la radiazione proveniente dal corpo celeste in esame su di un piano detto piano focale dove l'immagine può essere osservata tramite l'oculare [*cf* **Figura 1**].

L'ingrandimento o magnificazione dello strumento è definito come il rapporto

$$I = \frac{f_{ob}}{f_{oc}} \quad (1)$$

essendo, come indicato nella **Figura 1**,

$f_{ob} = f_1$  la distanza focale dell'obiettivo;

$f_{oc} = f_2$  la distanza focale dell'oculare.

Poiché la distanza focale dell'obiettivo è fissa per ogni dato telescopio, l'ingrandimento può essere variato modificando la distanza focale dell'oculare ovvero sostituendo lo stesso.

Per apertura assoluta di un telescopio si intende il diametro  $D_{ob}$  dell'obiettivo mentre si indica con il termine rapporto focale  $o$ , con terminologia inglese, f-number il rapporto

$$F_{\#} = \frac{f_{ob}}{D_{ob}} \quad (2)$$

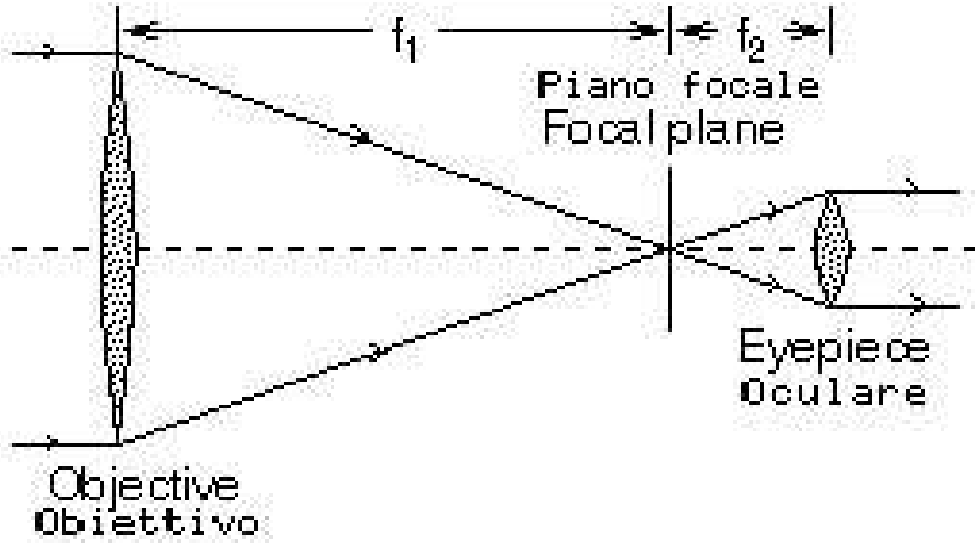


Figure 1: Schema di cannocchiale astronomico:  $f_1$  indica la distanza focale  $f_{ob}$  dell'obiettivo mentre  $f_2$  indica la distanza focale  $f_{oc}$  dell'oculare.

Poiché l'angolo solido sotto il quale l'obiettivo risulta visto dal centro del piano focale è

$$\Omega = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D_{ob}}{f_{ob}} \right)^2 \quad (3)$$

dalle equazioni (2) e (3) si ha

$$\Omega = \frac{\pi}{4} \frac{1}{F_{\#}^2} \quad (4)$$

Siccome la potenza radiativa trasferita da una sorgente è direttamente proporzionale a  $\Omega$ , quanto più è piccolo il valore di  $F_{\#}$  tanto maggiore è la quantità di energia raccolta per unità di tempo su di una stessa superficie del piano focale e quindi tanto più luminosa risulta l'immagine.

Il potere risolutivo di un telescopio è la minima distanza angolare sotto la quale possono essere viste come distinte due sorgenti luminose. Dalla trattazione di Fraunhofer della diffrazione attraverso una apertura circolare di diametro  $D$  è noto che se  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione, una sorgente puntiforme viene vista al di là dell'apertura come un disco centrale,

detto disco di Airy, circondato da una serie di anelli concentrici di intensità decrescente. Il raggio di tale disco espresso in radianti è

$$\rho_{rad} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

e rappresenta, secondo il criterio di Rayleigh, la minima distanza necessaria per poter considerare distinte due sorgenti luminose. Quindi, ricordando che

$$1 \text{ rad} = 206265'' \quad (6)$$

la minima distanza tra due sorgenti, espressa come d'uso in secondi d'arco, che un telescopio può apprezzare è, almeno teoricamente,

$$\rho'' = 2.516433 \times 10^5 \frac{\lambda}{D_{ob}} \quad (7)$$

In pratica l'immagine osservata di una qualunque sorgente puntiforme ha dimensioni maggiori di quelle del disco di Airy a causa principalmente delle variazioni dell'indice di rifrazione durante l'attraversamento dell'atmosfera da parte della radiazione luminosa. Tali variazioni, dovute a cambiamenti di pressione e temperatura tra i vari strati d'aria, hanno infatti come conseguenza quella di provocare rapide fluttuazioni di intensità, la cosiddetta scintillazione, di dimensioni e di posizione sul piano focale dell'immagine il cui profilo, detto di seeing con parola inglese ormai entrata a far parte anche della terminologia scientifica italiana, risulta perciò diverso da quello che si otterrebbe solo per diffrazione.

Il campo di vista dello strumento è definito come l'angolo solido sotto il quale è visto l'oculare dal centro dell'obiettivo e per campo corretto si intende il campo dello strumento corretto per le varie aberrazioni che affliggono le immagini e che consistono nel mancato focheggiamento o nel focheggiamento non simmetrico sul piano focale dei raggi luminosi provenienti da una sorgente.

I telescopi in cui l'obiettivo è una lente sono detti rifrattori mentre quelli in cui esso è sostituito da uno specchio o da un sistema di specchi sono detti riflettori e per essi sono sempre valide le definizioni dei parametri caratteristici introdotte per i rifrattori. Sono poi detti catadiottrici quei telescopi che utilizzano combinazioni di lenti e specchi soprattutto allo scopo di correggere le aberrazioni.

## Le aberrazioni ottiche

Le aberrazioni si presentano sia nel caso di telescopi rifrattori che riflettori ad eccezione dell'aberrazione cromatica che si ha solo per i telescopi rifrattori.

L'aberrazione cromatica è dovuta alla dipendenza dell'indice di rifrazione di un mezzo dalla lunghezza d'onda della radiazione che lo attraversa: i diversi colori che compongono la luce vengono messi a fuoco in punti diversi del piano focale di una lente producendo come immagine della sorgente un alone a più colori. Questa aberrazione viene corretta utilizzando non semplici lenti ma i cosiddetti doppietti acromatici ossia coppie di lenti con indici di rifrazione scelti in modo opportuno.

Qualunque specchio che abbia la forma di una conica di rivoluzione che non sia un paraboloide concentra i raggi luminosi paralleli all'asse ottico in punti diversi dello stesso producendo come immagine una macchia invece che un punto, dando cioè origine a quella che viene detta aberrazione sferica.

Anche le superfici paraboliche presentano però delle aberrazioni, le cosiddette aberrazioni fuori asse in quanto sono generate dai raggi non paralleli all'asse ottico che vengono concentrati in zone diverse del piano focale.

Le aberrazioni fuori asse sono:

la coma,

così detta perché la figura che si osserva ha la forma di una cometa con il nucleo in prossimità del fuoco parassiale<sup>1</sup> e la coda rivolta verso l'esterno rispetto all'asse ottico;

l'astigmatismo,

che produce una macchia simmetrica rispetto al raggio centrale;

la distorsione,

che deforma l'immagine alterando le distanze tra i punti della stessa.

Una ulteriore aberrazione fuori asse è la curvatura di campo che consiste nella concentrazione non sul piano focale ma su di una superficie curva dei raggi luminosi che provengono da direzioni diverse rispetto all'asse ottico: l'immagine osservata sul piano focale risulta in questo caso poco nitida.

Le aberrazioni vengono corrette con l'adozione di particolari configurazioni di lenti e specchi opportunamente sagomati.

---

<sup>1</sup>Il raggio del fascio inclinato rispetto all'asse ottico e passante per il vertice della superficie parabolica è detto raggio centrale ed il punto in cui viene focalizzato è detto fuoco parassiale.

Un difetto che invece non dipende dai singoli elementi ottici presenti nel sistema è quello che va sotto il nome di vignettatura: esso è funzione dell'angolo di ingresso nel telescopio del fascio di luce. Il campo che si osserva appare più scuro ai bordi che al centro ricordando appunto le vignette dei primi fumetti apparsi sul mercato.

### 0.3 I telescopi a due specchi

Il più semplice telescopio riflettore è quello in cui l'osservatore e gli strumenti di raccolta ed analisi della radiazione vengono collocati direttamente nel fuoco al finito, detto fuoco primario o primo fuoco, dello specchio che riceve direttamente tale radiazione dalla sorgente, che può considerarsi posta nel fuoco all'infinito dello specchio [cfr schema (a) della **Figura 2**].

Nell'ambito dei telescopi riflettori i più utilizzati sono però i telescopi a due specchi perché essi, grazie al ripiegamento del fascio di luce che si produce con la riflessione sui due specchi, occupano uno spazio fisico relativamente ristretto pur avendo lunghe distanze focali ed inoltre permettono una migliore

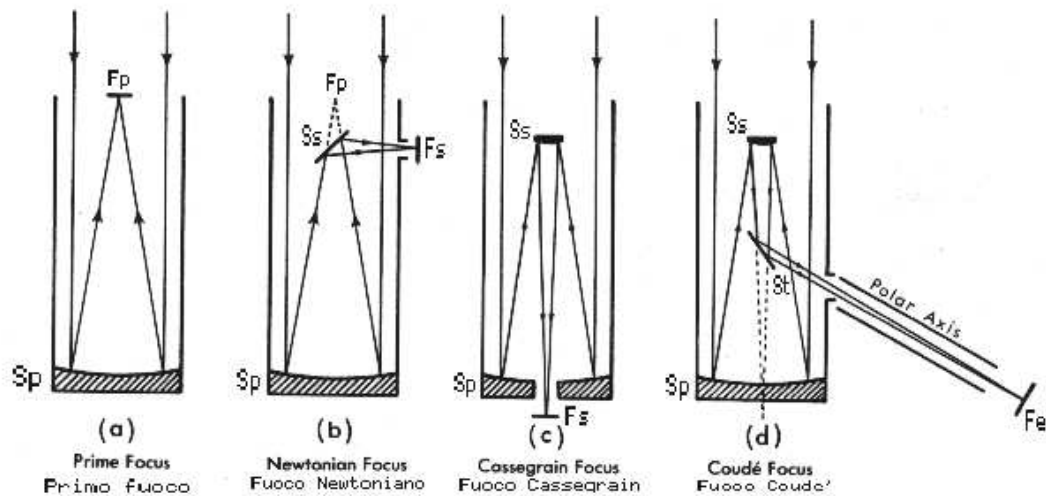


Figure 2: Alcune configurazioni di lavoro per i telescopi. La strumentazione può essere collocata: (a) nel primo fuoco, (b) nel fuoco Newtoniano, (c) nel fuoco Cassegrain, (d) nel fuoco Coudé.

compensazione delle aberrazioni.

I due specchi sono montati in modo da avere lo stesso asse ottico e quello concavo, più grande, che riceve direttamente i raggi luminosi della sorgente, è detto primario e il suo fuoco al finito è detto primo fuoco, o fuoco primario del telescopio. Il secondo specchio, più piccolo e di superficie o convessa o piana, è detto specchio secondario e viene interposto tra il vertice e il fuoco del primario in modo da modificare il cammino dei raggi luminosi che vengono focalizzati così in quello che è detto secondo fuoco o fuoco secondario del telescopio ed in cui l'immagine viene osservata.

Una configurazione molto usata è quella Newtoniana, illustrata nello schema **(b)** della **Figura 2**: lo specchio primario  $S_p$  è un paraboloide mentre il secondario  $S_s$  è uno specchio piano inclinato rispetto all'asse ottico in modo da deviare di  $90^\circ$  il cammino del fascio luminoso riflesso. Il fuoco secondario  $F_s$  del telescopio, in cui viene collocata la strumentazione, cade quindi lateralmente ad esso.

Un'altra configurazione molto usata è quella detta Cassegrain classica, illustrata nello schema **(c)** della **Figura 2**, nella quale lo specchio primario è sempre un paraboloide mentre il secondario è un iperboloide: la superficie riflettente concava  $S_p$  del paraboloide concentra i raggi provenienti dalla sorgente luminosa in un fuoco  $F_p$  al finito e la superficie convessa  $S_s$  dell'iperboloide concentra i raggi provenienti da tale fuoco in un altro fuoco al finito  $F_s$  che cade al di là dello specchio primario che deve quindi essere forato.

Altre configurazioni prevedono l'uso di specchi di forme diverse e la collocazione del fuoco in posizioni differenti anche a seconda del tipo di osservazioni che si vogliono eseguire e delle dimensioni e delle caratteristiche dei rivelatori che si devono utilizzare: a titolo di esempio nello schema **(d)** della **Figura 2** è riportata la configurazione Coudé nella quale con un sistema di specchi piani  $S_t$  il fascio luminoso riflesso dagli specchi primario  $S_p$  e secondario  $S_s$  viene indirizzato nella direzione dell'asse polare in un fuoco  $F_e$  posto esternamente al telescopio in una posizione opportuna per il posizionamento di strumenti ingombranti o per lavori in cui si necessita di grandi lunghezze focali.

In genere i grandi telescopi sono costruiti in modo da poter utilizzare sia il fuoco primario che il fuoco Cassegrain che il fuoco Coudé.

## 0.4 Puntamento e guida di un telescopio

Per poter raccogliere le immagini degli oggetti celesti è necessario che il telescopio possa puntare l'oggetto in esame ed inseguirlo mentre esso, per effetto della rotazione della Terra attorno al proprio asse, appare descrivere un arco di circonferenza sulla volta celeste.

Il puntamento su tutto il cielo è realizzabile se il telescopio è assicurato ad una struttura meccanica, detta montatura, che permette movimenti attorno a due assi di rotazione perpendicolari tra loro.

Siccome il movimento apparente degli astri è una rotazione in senso orario attorno al polo Nord celeste, la cui posizione attuale cade in prossimità della stella Polare  $\alpha$  Ursae Minoris, la montatura più naturale è quella detta equatoriale in cui un asse, detto asse polare o asse orario, è parallelo all'asse terrestre e l'altro asse, detto asse di declinazione, è appunto perpendicolare a questo.

Con questo tipo di montatura il puntamento avviene a partire dalle coordinate equatoriali locali dell'oggetto di interesse nel momento dell'inizio dell'osservazione: si effettua una rotazione dell'asse del telescopio attorno all'asse polare di un angolo uguale all'angolo orario  $H$  e una rotazione attorno all'asse di declinazione pari all'angolo di declinazione  $\delta$ .

Le posizioni dell'asse di declinazione e dell'asse del telescopio sono lette su due cerchi graduati, il cerchio orario, fissato all'asse polare, e il cerchio di declinazione, fissato all'asse di declinazione. Nei telescopi in cui il puntamento avviene tramite calcolatore la lettura di tali posizioni è eseguita da opportuni trasduttori che, con termine inglese ormai entrato a far parte della terminologia scientifica italiana, sono detti encoder.

Per rendere più agevole il puntamento in genere i telescopi hanno montato sul tubo un altro piccolo cannocchiale, detto puntatore o cercatore, a pochi ingrandimenti ma con campo di vista largo. Il cercatore è fissato parallelamente all'asse ottico del telescopio in modo che quando esso viene puntato sulla sorgente desiderata l'immagine di essa, visibile all'oculare del cercatore, cada all'interno del campo visto dallo strumento principale.

L'inseguimento si ottiene, mantenendo fissa la posizione rispetto all'asse di declinazione, mediante la rotazione di tutto il sistema attorno all'asse polare con velocità angolare uguale a quella del moto diurno apparente degli astri. Tale rotazione viene in genere realizzata con una grande ruota dentata mossa da una vite senza fine azionata da un motore elettrico che gira a velocità costante. Nella realtà questo movimento non è mai sufficientemente

accurato a causa di inevitabili imperfezioni meccaniche e strutturali e quindi, affinché durante l'osservazione la radiazione della sorgente in esame cada per quanto possibile sempre nella stessa zona del piano focale, è necessario apportare delle piccole correzioni istantanee, operazione che va sotto il nome di guida del telescopio.

Per la guida del telescopio si utilizza una stella di opportuna luminosità, nel campo dell'oggetto di interesse o in prossimità di esso, che viene inizialmente collocata al centro di un crocicchio di riferimento e poi mantenuta in tale posizione mediante correzioni micrometriche eseguite agendo sulla pulsantiera che comanda i motori del telescopio che permettono gli spostamenti attorno agli assi. Il crocicchio di riferimento è visibile in genere al centro dell'oculare di un altro cannocchiale, detto cannocchiale di guida, posizionato parallelamente all'asse ottico del telescopio principale.

In alcuni telescopi invece del cannocchiale di guida si preferisce utilizzare un secondo oculare, a forte ingrandimento, che osserva sul piano focale i bordi del campo di interesse.