

Le stelle vanno a scuola

Telescopi e Montature

M.Ciani, L.Donato, C.Zamberlan

1 Introduzione storica

Nessuno sa con esattezza da chi e quando venne inventato il telescopio, anche se è noto che le prime lenti per occhiali risalgono al 1200 e che nell'arco di qualche secolo erano diventate di uso comune in tutta Europa.

Pare che i primi cannocchiali circolassero in Olanda verso il 1608, principalmente ad opera dell'occhialaio Jan Lippershey (?-1619). La leggenda narra che l'invenzione avvenne casualmente per merito dei suoi figli che giocando con alcune lenti scoprirono come ottenere un'immagine ingrandita di oggetti lontani. Il due ottobre del 1608 Lippershey brevettò il cannocchiale presso gli Stati Generali d'Olanda e anche se altri occhialai diedero origine ad una disputa sulla priorità della scoperta oggi viene considerato l'inventore del telescopio.

Galileo venne a conoscenza di quest'invenzione nella primavera del 1609 mentre stava insegnando all'università di Padova sotto la Repubblica di Venezia e nel giro di pochi mesi fu in grado di costruire un suo cannocchiale. Nel gennaio del 1610 lo puntò verso il cielo e le sue prime spettacolari scoperte rappresentarono la nascita dell'astronomia moderna.

Nei secoli successivi il progresso tecnologico permise la costruzione di telescopi sempre più potenti con i quali è migliorata sempre più la comprensione dello spazio che ci circonda, fino ad arrivare agli strumenti moderni che hanno consentito di elaborare le nostre teorie attuali su come è nato e su come si è sviluppato fino ad oggi il nostro universo.

2 Le componenti del telescopio

La fondamentale caratteristica del telescopio è una maggiore capacità di raccolta della luce rispetto alla pupilla. Inoltre il telescopio è uno strumento che permette di amplificare il potere visivo aumentando la capacità di distinguere come separati due oggetti che abbiano una piccola separazione angolare.

Esistono fondamentalmente due grandi famiglie di telescopi, a seconda che siano basati sulla rifrazione o sulla riflessione della luce¹. Nel primo caso vengono utilizzate delle lenti e si parla di telescopi rifrattori, nell'altro si usano degli specchi per la costruzione di telescopi riflettori. Ovviamente esistono anche combinazioni delle due tipologie fondamentali, ovvero telescopi che sfruttano contemporaneamente sia la riflessione che la rifrazione e si dicono catadiottrici, rappresentati ad esempio dagli Schmidt, o dagli Schmidt-Cassegrain.

L'elemento fondamentale e caratteristico di un telescopio è quindi il suo obiettivo, che indica la capacità di raccolta della luce e di conseguenza le prestazioni ottiche che esso può raggiungere, anche in combinazione con altri elementi ottici quali gli oculari.

¹Vedi appendice A

Un elemento di disturbo è costituito dall'ostruzione, dalla quale sono esenti i rifrattori, e che consiste in un elemento (lo specchio secondario) che permette di deviare il raggio luminoso prodotto dalla riflessione degli specchi rispetto al cammino originario, in modo da poterne usufruire tanto visualmente quanto fotograficamente.

2.1 Obiettivo

È l'elemento fondamentale che caratterizza l'intero sistema ottico, e lavora assieme all'oculare che ingrandisce l'immagine reale prodotta nel piano focale dell'obiettivo. I parametri fondamentali che lo caratterizzano sono:

- **Il diametro o apertura dello strumento.** Indica la capacità di raccolta della luce (cioè l'aumento della luminosità) e il potere risolutivo. Maggiore è il diametro dell'obiettivo, maggiore è la quantità di luce raccolta con una relazione direttamente proporzionale al quadrato della superficie secondo la formula $Q = D^2$, dove Q è la quantità di luce raccolta e D è il diametro. Un obiettivo con diametro doppio rispetto ad un altro ha quindi un potere di raccolta luminosa quattro volte superiore.
- **Il potere risolutivo.** Dalla dimensione del diametro dipende direttamente anche il potere risolutivo, che è la capacità di separazione angolare, ovvero la capacità di distinguere come separati dei punti tra loro vicini. Il potere risolutivo teorico aumenta all'aumentare del diametro, anche se è da rilevare che le condizioni atmosferiche (in particolare il seeing) possono abbassare, anche sensibilmente, la risoluzione di cui sono capaci gli strumenti oltre un certo diametro (in genere, dai 150 mm in su). Il potere risolutivo è una misura angolare, normalmente espressa in secondi d'arco, e più è piccola più piccoli sono i dettagli che è possibile distinguere.

Il massimo di separazione angolare teorica di uno strumento, è approssimato dalla formula $s = \frac{120}{D}$, dove s è la misura angolare in secondi d'arco dei particolari separabili e D è il diametro dell'obiettivo in millimetri.

- **La lunghezza focale.** Indica la distanza del fuoco dall'obiettivo, e determina anche il rapporto focale, ovvero la luminosità intrinseca del telescopio. Il rapporto focale è dato dal rapporto tra la lunghezza focale ed il diametro dell'obiettivo secondo la formula $F = \frac{f}{D}$, dove F è il rapporto focale, f la lunghezza focale e D il diametro dell'obiettivo.

Questo rapporto, comunemente definito luminosità, è un parametro assoluto che caratterizza il sistema ottico. Minore è il rapporto focale e maggiore è la luminosità dello strumento.

2.2 Oculare

L'obiettivo produce nel suo piano focale una immagine reale piccola e capovolta, che per poter essere osservata deve essere ingrandita. Questo è infatti lo scopo dell'altro elemento ottico fondamentale del telescopio, chiamato oculare proprio perchè consente l'osservazione visuale degli oggetti astronomici inquadrati dal telescopio. I parametri fondamentali che lo caratterizzano sono:

- **La sua lunghezza focale.** Ogni oculare ha una propria lunghezza focale, come l'obiettivo del telescopio. La combinazione di un oculare con una determinata lunghezza focale ad un obiettivo con la propria lunghezza focale determina l'ingrandimento complessivo del sistema, secondo la relazione $I = \frac{f'}{f''}$, dove I è l'ingrandimento, f' è la focale dell'obiettivo e f'' è la focale dell'oculare.

Diminuendo la focale dell'oculare aumentano gli ingrandimenti ottenuti e perciò l'ingrandimento non dipende dal diametro dell'obiettivo, ma solo dalla sua focale. In realtà esiste un limite fisico al massimo ingrandimento realmente utilizzabile perché aumentando la scala a cui viene vista l'immagine fornita dall'obiettivo, questa si fa via via meno luminosa e meno nitida.

- **L'estrazione pupillare.** Rappresenta la distanza alla quale deve essere posto l'occhio dell'osservatore dall'oculare per vedere l'intero campo di vista a fuoco. Dipende dalle caratteristiche costruttive dell'oculare stesso, ed è direttamente proporzionale alla sua lunghezza focale, per cui si riduce al crescere degli ingrandimenti totali.
- **Il campo di vista.** Esistono due concetti legati tra loro, ovvero il campo reale ed il campo apparente. Il campo reale è la dimensione angolare della porzione di cielo visibile nell'oculare applicato al telescopio. Il campo apparente è invece il diametro angolare in gradi del cerchio di luce visibile dall'occhio, ed è fissato dalle caratteristiche costruttive dell'oculare stesso, indipendentemente dal campo reale.

2.3 Camera

La camera è un dispositivo che viene usato al posto dell'oculare quando si vuole conservare un'immagine dell'oggetto osservato. In genere l'immagine formata dall'obiettivo sul piano focale veniva raccolta per mezzo di una lastra fotografica oppure, come negli ultimi anni, per mezzo di un dispositivo elettronico detto CCD (charged coupled device - dispositivo ad accoppiamento di carica). L'uso delle camere permette di registrare dettagli che non sono visibili con l'osservazione visuale. Infatti, con lunghe esposizioni è possibile superare la sensibilità dell'occhio umano, limitato dal fatto che più

volte al secondo l'immagine sulla retina viene cancellata e sostituita da una nuova. Le nuove camere CCD grazie alla superiore sensibilità rispetto alle lastre fotografiche hanno permesso un notevole miglioramento della qualità delle immagini, anche grazie alla possibilità di elaborarle al computer in un secondo tempo.

3 Schemi ottici dei telescopi

Abbiamo già visto che i telescopi si possono dividere in tre categorie: rifrattori se usano delle lenti, riflettori se usano specchi o catadiottrici se li usano entrambi. Vedremo adesso in dettaglio i principali schemi ottici usati per la loro costruzione.

3.1 Rifrattori

Il rifrattore usa il principio ottico della rifrazione della luce. L'obiettivo è costituito da una lente che costituisce un sistema ottico convergente in grado di creare un'immagine dell'oggetto inquadrato in corrispondenza del piano focale. Quando si introduce la legge di Snell per la rifrazione della luce² si dà per scontato che questa legge sia la stessa indipendentemente dalla lunghezza d'onda della luce incidente.

In realtà lunghezze d'onda diverse, e quindi raggi di luce di colori diversi, vengono deviati in misura differente e quindi focalizzati in punti diversi. In pratica una lente non ha un solo fuoco, ma una serie di fuochi per le varie lunghezze d'onda e tale situazione genera un difetto nell'immagine, che viene chiamato aberrazione cromatica. In pratica osservando una stella si vede che le sue componenti cromatiche vengono focalizzate in punti diversi dando origine ad un'immagine sfrangiata in cui si possono riconoscere i colori dell'arcobaleno.

Per ovviare a questo difetto sono stati ideati schemi ottici più sofisticati in cui si fa spesso ricorso ad un sistema di due o più lenti appositamente disegnate, che permettono di ridurre notevolmente l'effetto dell'aberrazione cromatica.

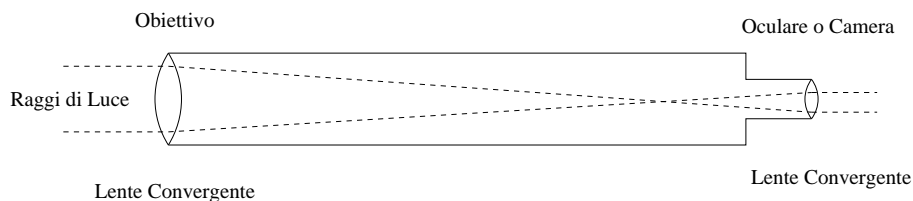


Figura 1: telescopio rifrattore

²Vedi appendice A

3.2 Riflettori

3.2.1 Newton

Il primo telescopio riflettore fu costruito da Newton e viene ancora usato nell'astronomia amatoriale. Ha come obiettivo uno specchio concavo metallico che forma un'immagine degli oggetti posti all'infinito (come possono considerarsi gli oggetti astronomici) in corrispondenza del suo piano focale. Poichè uno specchio sferico presenta la cosiddetta aberrazione sferica (cioè i raggi non vengono messi a fuoco tutti esattamente nello stesso punto e questo produce un'immagine sfocata), l'obiettivo, nei telescopi newtoniani, è uno specchio parabolico, che non presenta questo tipo di aberrazione. I raggi riflessi dallo specchio parabolico (primario) vengono deviati per mezzo di uno specchio piano (secondario), in modo che l'immagine degli oggetti osservati si formi al di fuori del tubo che sorregge lo specchio primario, in posizione comoda per l'osservazione.

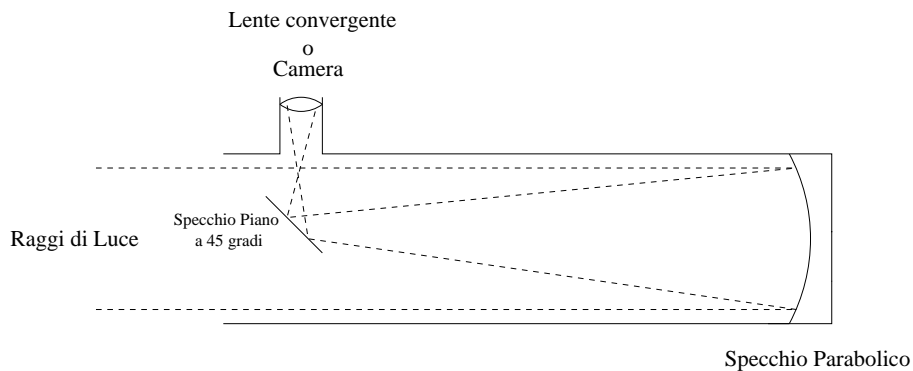


Figura 2: telescopio newtoniano

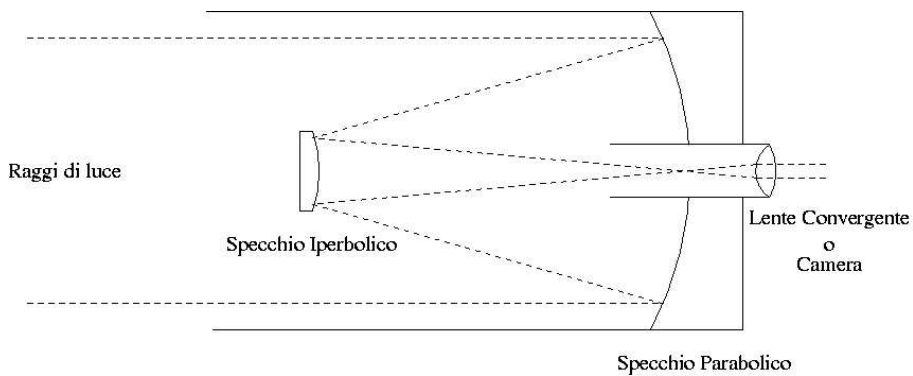


Figura 3: telescopio cassegrain

3.2.2 Cassegrain

Uno schema ottico migliore di quello newtoniano è sicuramente quello del telescopio Cassegrain, in cui lo specchio primario è ancora parabolico e invece il secondario è convesso e di forma iperbolica. I raggi da esso riflessi vengono focalizzati in un punto dove si forma l'immagine degli oggetti osservati. Si hanno così due fuochi: il primo è quello fornito dallo specchio parabolico; il secondo è quello dove convergono i raggi dopo la riflessione sullo specchio iperbolico. I raggi luminosi escono da un foro nello specchio primario e così l'immagine può essere osservata comodamente con un oculare da dietro tale specchio.

L'esempio più famoso di telescopio cassegrain è quello di Monte Palomar entrato in servizio nel 1948, che grazie ai suoi cinque metri di diametro per lungo tempo è stato il più grande telescopio al mondo.

Più recentemente è stato introdotto un nuovo sistema ottico, il Ritchey-Chretien, che con degli specchi leggermente modificati rispetto allo schema Cassegrain riesce a compensare le aberrazioni e a fornire delle immagini di qualità superiore. Per questo motivo tutti i più grandi telescopi attualmente in uso, compreso quello spaziale, sono stati costruiti secondo questo schema.

3.3 Catadiottrici

I telescopi con specchi principali parabolici hanno il vantaggio di avere una buona correzione dell'aberrazione sferica assiale, ma lo svantaggio di presentare forti aberrazioni extrassiali. I telescopi Schmidt risolvono questo problema utilizzando uno specchio principale sferico, ma facendo passare la luce attraverso una lastra di forma opportuna per correggere l'aberrazione sferica.

Il telescopio catadiottrico più famoso è senz'altro lo Schmidt-Cassegrain, composto da uno specchio primario sferico e da un secondario sferico convesso inserito in una lastra correttiva posta all'imboccatura del tubo. L'immagine si forma posteriormente al tubo, dietro un foro praticato al centro dello specchio primario.

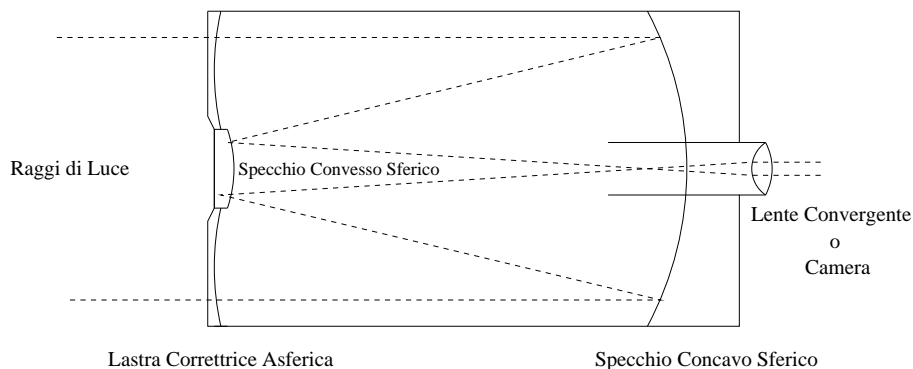


Figura 4: telescopio schmidt-cassegrain

4 Montature

I telescopi devono poter essere puntati con facilità verso qualsiasi punto del cielo. Inoltre, per permettere l'osservazione di oggetti deboli, che richiedono esposizioni fotografiche molto lunghe, devono essere dotati di un movimento automatico che compensi il movimento apparente della sfera celeste.

A questo scopo i telescopi sono dotati di opportune montature che permettano il movimento attorno a due assi tra loro perpendicolari. Le principali montature sono sostanzialmente di due tipi: equatoriali e altazimutali. Nel primo caso, i due assi sono detti asse polare e asse di declinazione: l'asse polare viene diretto parallelamente all'asse terrestre, mentre l'altro viene orientato sull'astro in esame. Una volta orientato correttamente l'asse di declinazione, per mantenere l'asse ottico del telescopio puntato sull'oggetto in esame, basta far ruotare il telescopio attorno all'asse polare con la stessa velocità di rotazione della Terra.

Nelle montature altazimutali, un asse è orizzontale e l'altro è verticale, permettendo un movimento in altezza e in azimuth (cioè parallelamente all'orizzonte). Questi telescopi hanno quindi bisogno di due movimenti per poter seguire le stelle, a differenza dei telescopi con montature equatoriali che hanno bisogno di un movimento soltanto.

Il puntamento di un telescopio con montatura altazimutale risulta molto più complesso del puntamento di un telescopio equatoriale. Per questa ragione appena negli anni settanta lo sviluppo dell'informatica ha reso possibile la progettazione di montature altazimutali di precisione e grazie alla loro maggiore stabilità rispetto a quelle equatoriali è stata possibile la costruzione dei maggiori telescopi oggi a disposizione.

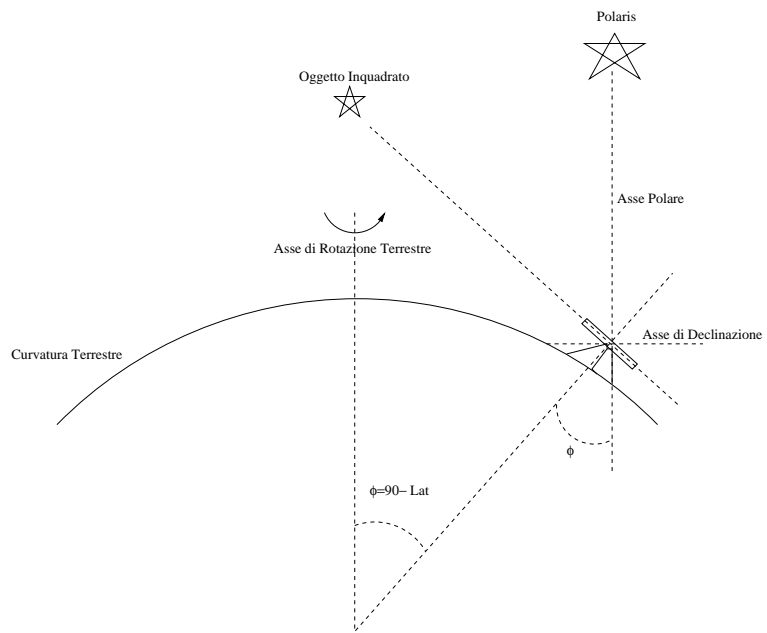


Figura 5: compensazione moto apparente

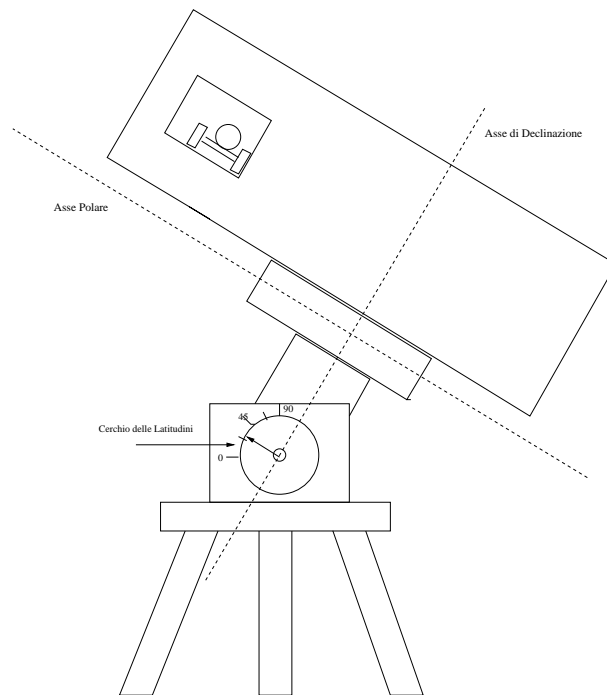


Figura 6: montatura equatoriale

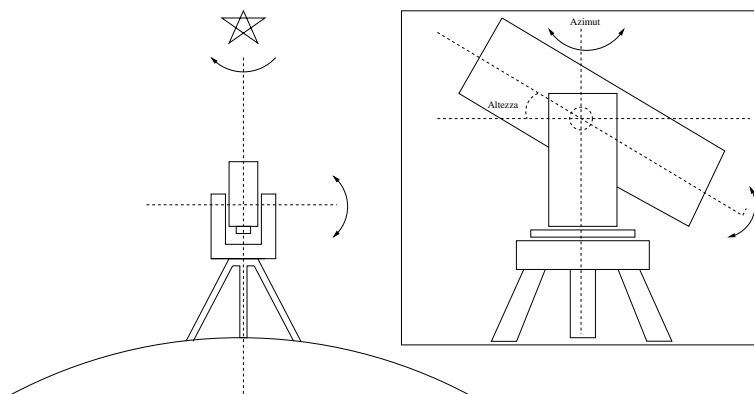


Figura 7: montatura altazimutale

5 Telescopi moderni

Lo sviluppo dei telescopi moderni, si è basato in gran parte sulla computerizzazione dei movimenti e sul controllo delle deformazioni delle parti ottiche e meccaniche.

I primi specchi erano di metallo e quindi cambiavano facilmente di dimensioni per effetto della dilatazione termica. Ovviamente, anche la focale, e quindi l'ingrandimento, cambiava notevolmente e anche imprevedibilmente. Solo nel 1865, con l'invenzione del procedimento chimico di J. von Liebig per metallizzare il vetro, si costruiscono i primi specchi di vetro metallizzati. Successivamente, in anni relativamente recenti, gli specchi vennero ricoperti di una sottile pellicola metallica riflettente mediante i procedimenti di evaporazione del metallo sotto vuoto.

Per diverso tempo il miglior materiale per la costruzione dei vetri fu il quarzo e il pyrex; attualmente si usano tre tipi di materiali per i quali il coefficiente di dilatazione termica è tanto basso da potersi considerare praticamente nullo: l'ULE (Ultra Low Expansion), il CerVit (Ceramica Vetrificata) e lo Zerodur, con cui sono stati costruiti i 4 specchi da 8,2 m di diametro ciascuno del Very Large Telescope, il grandissimo telescopio europeo (VLT, <http://www.eso.org>), e anche lo specchio da 3.58 metri del Telescopio Nazionale Galileo, il maggiore telescopio italiano, situato alle Canarie (TNG, <http://www.tng.iac.es>).

Le dimensioni raggiunte dagli specchi principali dei telescopi sono probabilmente al limite delle possibilità tecnologiche attuali, anche se sono stati proposti specchi di 25 m di diametro. Il costo di un tale specchio sarebbe però proibitivo. L'alternativa alla costruzione di un unico specchio di 25 m lavorato alla perfezione ottica consiste nell'utilizzare una serie di specchi più piccoli.

Questo è stato realizzato con i due telescopi gemelli Keck 1 e Keck 2 installati a 4150 m di quota sulla sommità del vulcano Mauna Kea alle Hawaii (<http://www2.keck.hawaii.edu>).

Lo specchio di ciascun telescopio consiste in un mosaico di 36 specchi esagonali formante un'unica superficie riflettente di dieci metri di diametro che da un rendimento equivalente a quello fornito da quattro specchi tipo Monte Palomar. Nei telescopi Keck sono state inoltre introdotte le moderne tecnologie di controllo interattivo sulle ottiche e i due telescopi gemelli possono lavorare congiuntamente ottenendo prestazioni ancora migliori.

Per quanto la costruzione di telescopi di tipi sempre nuovi sia in pieno sviluppo sulla Terra, le prospettive forse più interessanti sono quelle dei telescopi in orbita attorno al pianeta. Infatti, l'atmosfera terrestre taglia gran parte delle radiazioni elettromagnetiche che arrivano dagli oggetti celesti e per effetto della turbolenza atmosferica, il potere risolutivo reale dei grandi telescopi terrestri è molto al di sotto di quello teorico.

Sono stati posti in orbita telescopi per l'infrarosso, per i raggi X, per l'ultravioletto e per i raggi gamma, ma i successi più straordinari sono legati all'attività dell'Hubble Space Telescope (HST, <http://hubblesite.org>), il Telescopio Spaziale. Posto in orbita il 12 aprile 1990 grazie a un progetto della NASA, è stato migliorato in orbita nel 2002, in modo da poter svolgere i suoi compiti almeno sino al 2010 e perciò ancora per qualche anno sarà il miglior strumento per l'astronomia a disposizione degli scienziati.

Appendice A: La fisica dei telescopi

I principi fisici che sono alla base della costruzione dei diversi tipi di telescopi sono:

- **La rifrazione**
- **La riflessione**

Rifrazione

La rifrazione è un fenomeno che si verifica ogni volta che la luce passa da un mezzo a un altro dotato di proprietà fisiche diverse, ad esempio con una maggiore densità. Un tipico esempio di rifrazione è quello che si verifica quando si immerge un bastoncino in un bicchiere d'acqua: il bastoncino appare spezzato in corrispondenza della superficie del liquido.

Ogni mezzo di propagazione è caratterizzato da un indice di rifrazione, indicato con n e che quasi sempre aumenta all'aumentare della densità del mezzo stesso; per definizione l'indice di rifrazione del vuoto è uguale a uno, l'aria ha un indice poco superiore a 1, l'acqua ne ha uno pari a 1.33 e quello del vetro è compreso tra 1.4 a 1.7 .

La rifrazione è governata dalla cosiddetta legge dei seni, detta anche legge di Snell dal nome del suo scopritore, che può essere scritta in forma molto semplice:

$$\frac{\sin I}{\sin R} = \frac{n_2}{n_1}$$

Secondo questa legge il rapporto tra il seno dell'angolo d'incidenza e quello dell'angolo di rifrazione è uguale al rapporto fra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e l'indice di rifrazione del primo mezzo.

In pratica un raggio di luce nel passare da un mezzo meno denso a uno più denso si avvicina alla normale e al contrario se ne allontana nel passare da un mezzo più denso a uno meno denso. Questo comportamento della luce è visibile quando attraversa uno spessore di un materiale più denso dell'aria, come ad esempio il vetro ed è ben rappresentato nella figura 8.

Riflessione

Quando un raggio di luce incide su una superficie riflettente viene rimandato indietro secondo la legge cartesiana della riflessione. Questa legge afferma semplicemente che l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione misurato rispetto la normale alla superficie. Il principio viene illustrato dallo schema in figura 9.

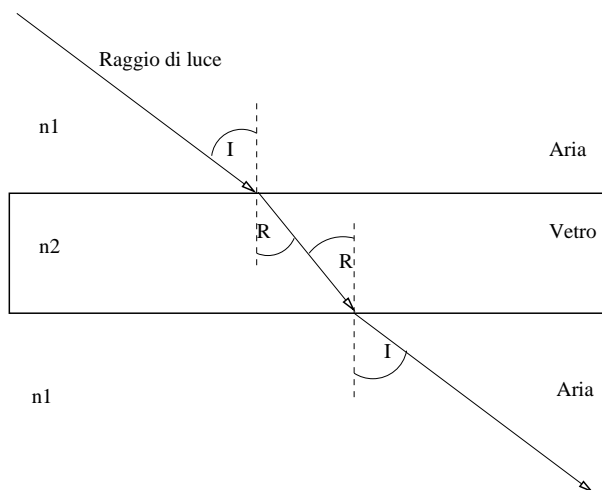


Figura 8: rifrazione della luce

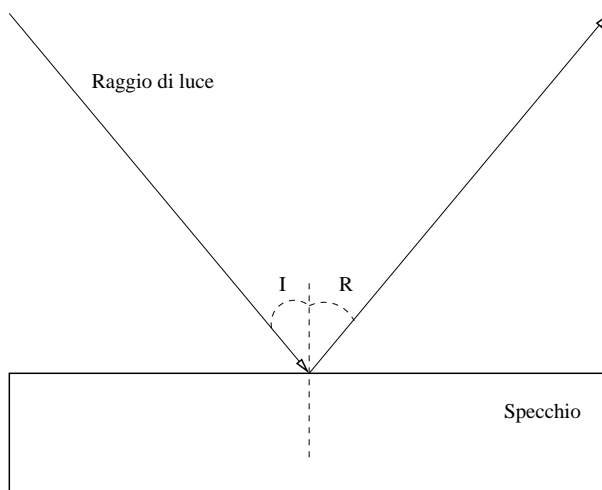


Figura 9: riflessione della luce

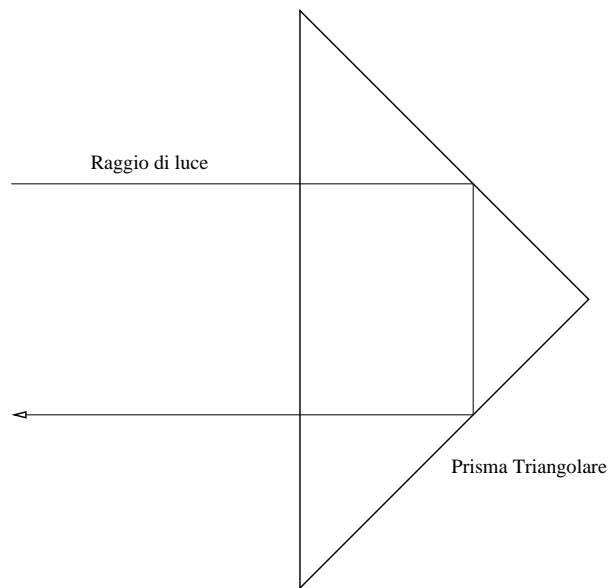


Figura 10: riflessione interna

Un tipo particolare di riflessione è la cosiddetta riflessione interna. Abbiamo già visto che quando un raggio di luce passa da un mezzo più denso a uno meno denso si allontana dalla normale. Quando però l'angolo di incidenza è superiore a un valore limite il raggio viene riflesso dalla superficie di separazione fra i due mezzi e rimane imprigionato in quello più denso.

Questo effetto viene sfruttato per costruire degli elementi ottici in grado di cambiare la direzione dei raggi di luce in arrivo. Un esempio è dato dal classico prisma triangolare che, come indicato in figura 10, è in grado di riflettere all'indietro un raggio di luce grazie a una doppia riflessione interna.

Appendice B: Il nostro telescopio

- **Modello:** CELESTRON CM1400
- **Schema ottico:** Schmidt-Cassegrain
- **Diametro obiettivo:** $14'' = 356\text{ mm}$
- **Focale:** 3910mm
- **Rapporto focale:** $f/11$
- **Potere risolutivo teorico:** $0.32''$
- **Campo di vista col nostro CCD:** $540'' \times 540'' = 9' \times 9'$
- **Potere risolutivo di un singolo pixel:** $0.1''$
- **Montatura:** Equatoriale alla tedesca