



*Ministero dell'Istruzione  
dell'Università e Ricerca*



**XV OLIMPIADI ITALIANE DI ASTRONOMIA – MODENA – 2015**

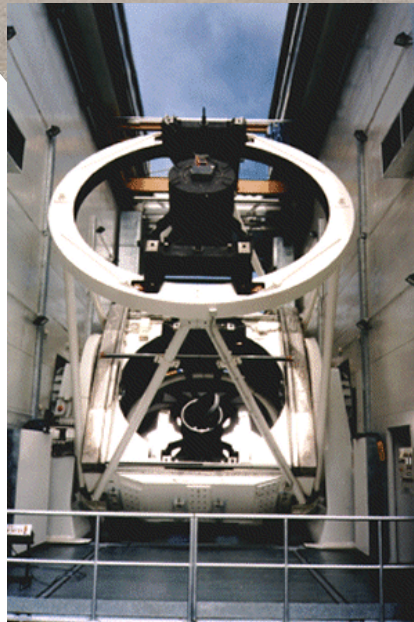
# La luce e gli strumenti per l'Astronomia

20 ottobre 2014

Prof. Angelo Angeletti

# Il telescopio

dal greco **TÊLE** (*lontano*) + **SKÓPIOS** (*guardare*)  
= strumento per osservare oggetti lontani



# Un po' di storia

L'uomo osserva il cielo con curiosità e stupore, ma anche con interesse “scientifico” da migliaia di anni; non si sa quando sia nata l'astronomia, probabilmente con l'uomo.

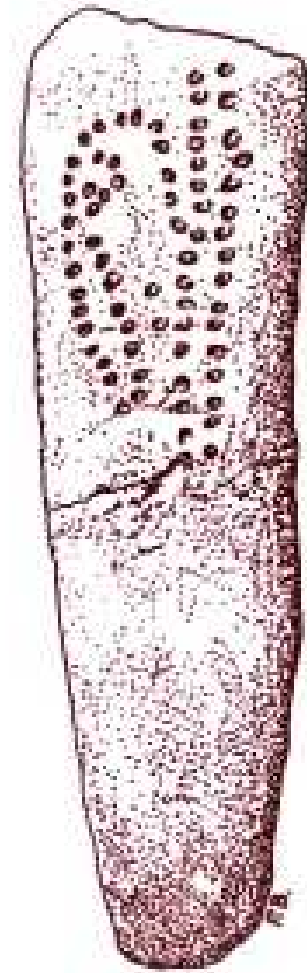
Di certo già 30 000 anni fa qualcuno si prendeva la briga di annotare su un osso le fasi lunari, circa 5 000 anni fa in Europa si costruivano osservatori, o in Cina 4 000 anni fa venivano incisi su gusci di tartaruga segni celesti.



*Un guscio di tartaruga risalente alla dinastia Shang (1600 a.C. – 1046 a.C.)*



*Una veduta del monumento megalitico di Stonehenge*



*L'“Osso di Blanchard”, proviene da Abri Blanchard, in Francia, riporta 69 incisioni fatte probabilmente da un uomo di Cro-Magnon circa 30.000 anni fa.*

# Un po' di storia

Plinio il Vecchio, nel I secolo dopo Cristo, nella sua *Storia Naturale*, dice che i Fenici scoprirono accidentalmente il vetro. Narra infatti che alcuni mercanti approdati sulle rive del fiume Belos in Palestina non trovando una pietra su cui appoggiare il cibo per scaldarlo al fuoco usarono blocchi di salnitro che avevano nel carico della nave; il salnitro esposto al calore del fuoco si sciolse sulla sabbia ricca di quarzo della riva e generò rivoli di un liquido sconosciuto che si solidificò in bolle trasparenti; il vetro appunto.

I Greci (Euclide, Archimede, Tolomeo) studiarono la rifrazione delle immagini attraverso aria e liquidi; scoprirono così che bolle di liquido potevano ingrandire l'immagine di oggetti cui fossero applicate.

Si dice che nel porto di Alessandria, su una torre alta 100 m, usassero degli specchi sferici per osservare immagini ingrandite delle navi in avvicinamento per guidarle con la luce concentrata di grandi fuochi.

Secondo una tradizione riportata da Galeno questi stessi specchi avevano anche la funzione di specchi ustori (furono utilizzati da Archimede nell'assedio di Siracusa).



# Un po' di storia

Ruggero Bacone nel XIII secolo riporta nell'*Opus Maius*:  
“Se le lettere di un libro o qualche oggetto minuto sono visti attraverso un segmento di una sfera di vetro o cristallo che su di essi sia appoggiato, essi saranno visti meglio e ingranditi [...] possiamo dare forma a segmenti di sfere trasparenti e disporli rispetto all'occhio e all'oggetto da osservare in modo che i raggi siano rifratti e deviati come si scelga; [...] e possiamo leggere piccolissime lettere da incredibili distanze [...] il Sole e la Luna e le stelle possono essere fatti apparire discendere verso di noi [...]”.

Probabilmente le prime lenti furono costruite a Venezia, ma l'arte della loro costruzione fu divulgata a Firenze verso la fine del XIII secolo.



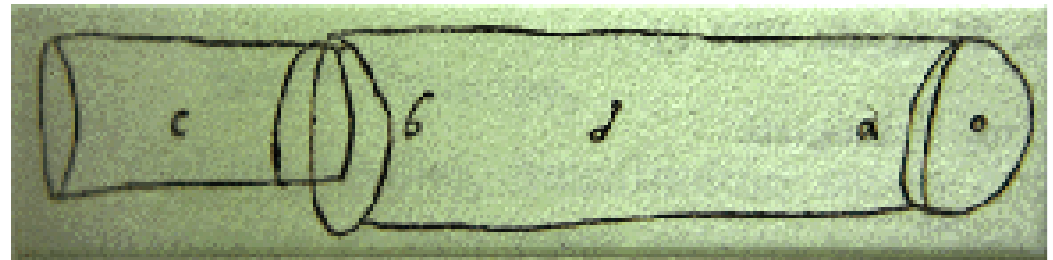
Dettaglio del ritratto di Ugone di Provenza, dipinto da Tommaso da Modena nel 1352. E' la prima volta che vengono rappresentati gli occhiali.

# Un po' di storia

Nei manoscritti di Leonardo da Vinci si legge:  
«Fa occhiali da vedere la luna grande»

Gerolamo Fracastoro (1478–1553) nel suo *Homocentricorum* parla di accoppiamenti di lenti.

Gian Battista della Porta (1535–1615) nel suo *Magia Naturalis* (1558) specifica che le lenti devono essere l'una concava e l'altra convessa, e secondo tali indicazioni erano stati costruiti cannocchiali verso la fine del 1500.



*La più antica illustrazione di un telescopio che si conosca è di Giovanbattista della Porta, la inserì in una lettera che scrisse nell'agosto 1609.*

# Il telescopio

Il 25 settembre 1608 venne presentata una richiesta di brevetto agli Stati Generali d'Olanda da parte di Hans Lippershey, nato a Wesel e abitante a Middleburg.

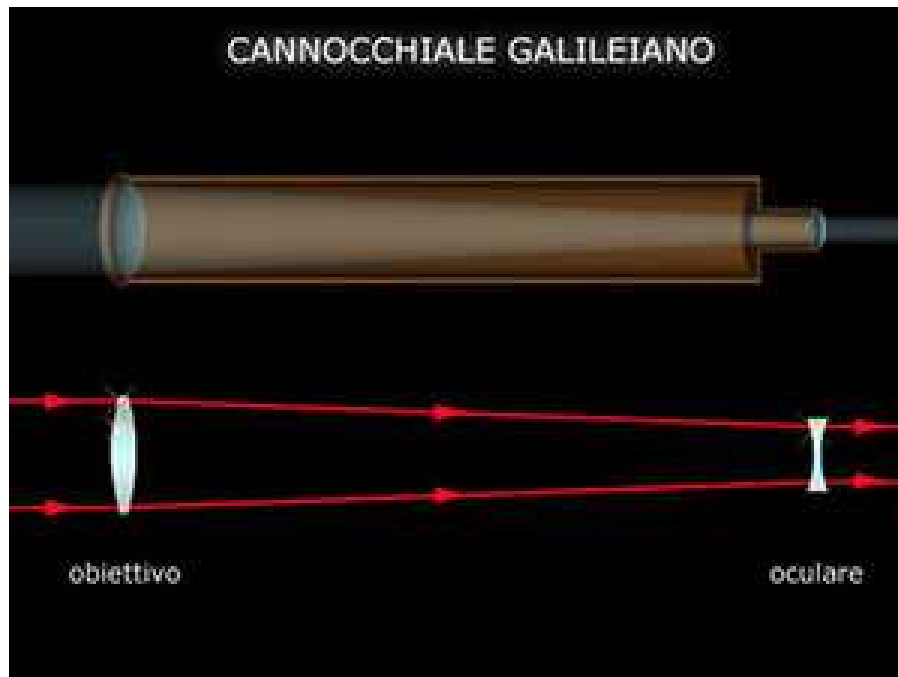
*“[...] inventore di uno strumento per vedere a distanza, come verificato da questi Stati, che detto strumento venga mantenuto riservato e che a lui venga garantito il privilegio di esclusiva per trent'anni affinché a nessuno venga permesso di imitarlo, o che invece gli venga garantita una pensione annua che gli permetta di costruire tali strumenti per l'uso di questo paese soltanto, senza venderlo a re o principi stranieri. È stato deciso che l'Assemblea nomini un comitato che prenda contatto con il richiedente circa la detta invenzione, investigando se non gli sia possibile migliorare lo strumento rendendo possibile il suo uso con i due occhi insieme, ed inoltre quale sia la cifra di remunerazione che sarebbe di suo gradimento. A seguito di un rapporto su tali questioni, sarà deliberato se sia opportuno garantire al richiedente una remunerazione o un privilegio. “*



# Galileo

Nella primavera del 1609 Galileo Galilei viene a conoscenza di un nuovo strumento costruito in Olanda e ne ottiene un esemplare.

Apporta significativi miglioramenti allo strumento e contribuirà in modo determinante alla rivoluzione scientifica del 1600.



*Obiettivo del cannocchiale con  
il quale Galileo scoprì i satelliti di  
Giove  
(Firenze, Museo Galileo)*

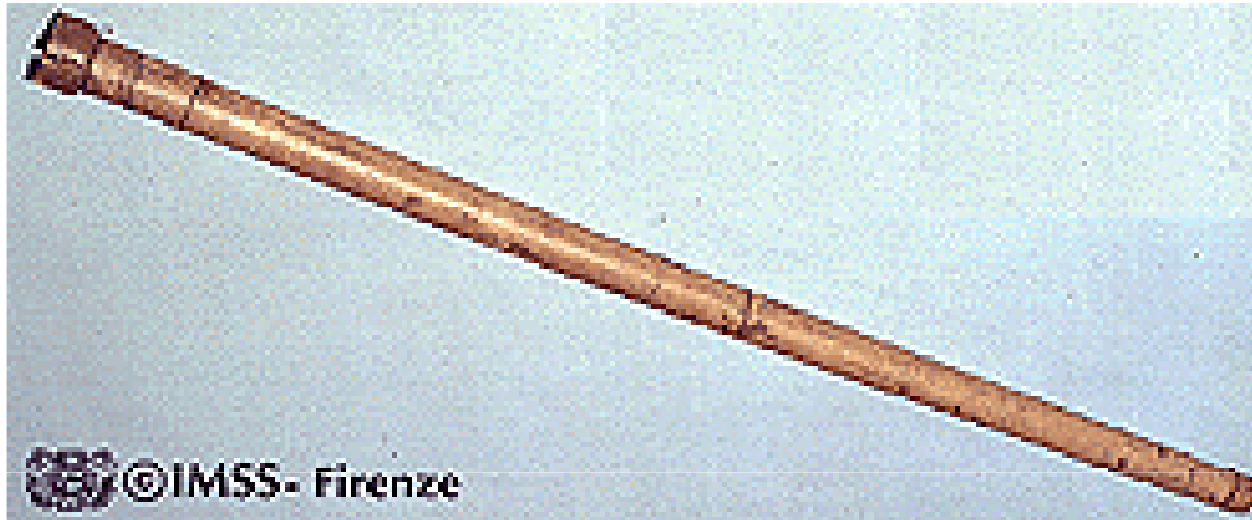
|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| Diametro obiettivo (mm)            | 15,0  |
| Diametro oculare (mm)              | 15,0  |
| Distanza focale obiettivo (mm)     | 980   |
| Distanza focale oculare (mm)       | -47,5 |
| Ingrandimenti                      | 20,6  |
| Magnitudine limite visuale teorica | 7,7   |



# Il telescopio



# Galileo



Il tubo di legno ricoperto di carta, contiene una lente obiettivo biconvessa e un oculare piano concavo. Ha capacità di ingrandimento di 14 volte. La lente obiettivo di questo cannocchiale ha distanza focale di 1330mm e apertura utile di 26mm.

Il tubo di legno è ricoperto di pelle rossa con fregi in oro. L'obiettivo è biconvesso e l'oculare biconcavo. Ha capacità di ingrandimento di 21 volte. La lente obiettivo ha apertura utile di 16mm e distanza focale di 980mm.



## Il cannocchiale galileiano di Cleto Rimatori

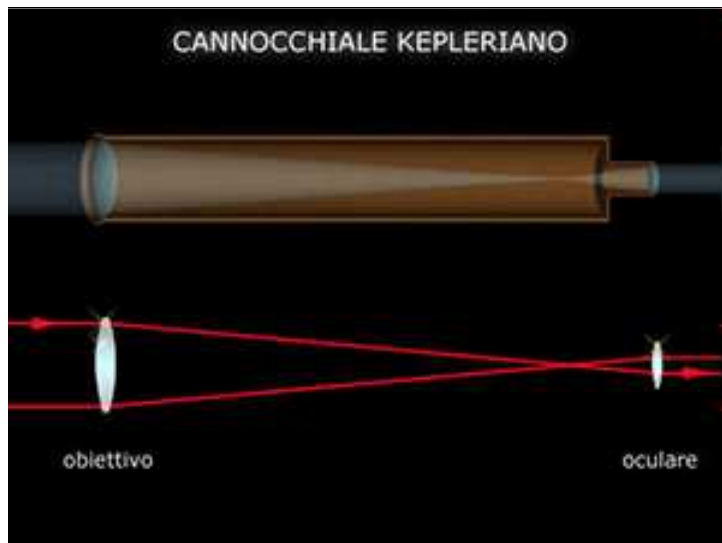


In occasione dell'Anno Internazionale dell'Astronomia (2009), l'Associazione Astrofili "Crab Nebula" di Tolentino ha realizzato un telescopio simile a quelli che utilizzava Galileo Galilei per le sue prime osservazioni.

Il telescopio è stato interamente costruito da Cleto Rimatori su indicazioni del prof. Angelo Angeletti ricavate dall'analisi dei testi di Galileo e dalle pubblicazioni degli studi fatti sui due strumenti conservati presso il Museo Galileo di Firenze.

# Keplero

Nella primavera del 1611 Keplero pubblica il *Dioptrice*, dove descrive il suo modello di telescopio.





# Keplero

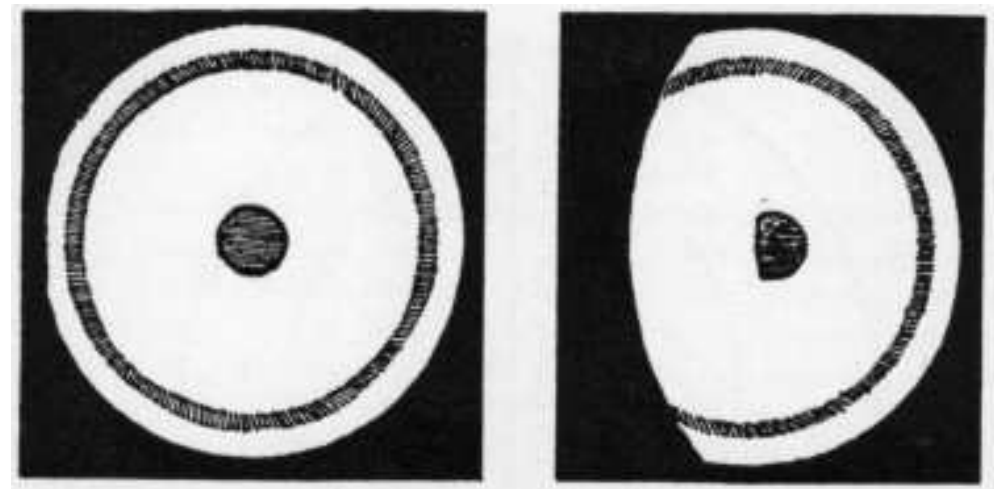
Tra i primi a far uso dello schema kepleriano ci sono il gesuita Christopher Scheiner nel 1623 e in seguito, nel 1629, anche il napoletano Francesco Fontana.



Padre Scheiner



Francesco Fontana



Primo disegno di Marte effettuato da Francesco Fontana

# Il telescopio

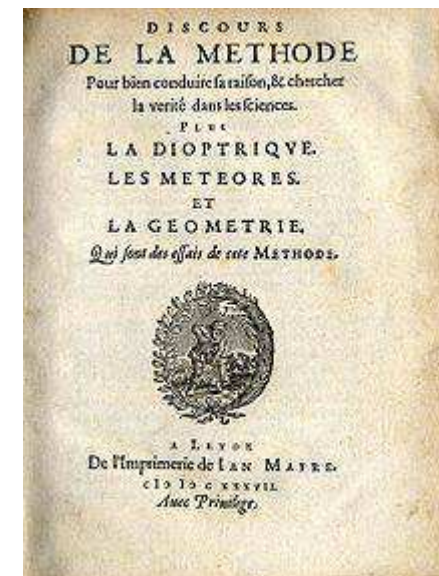
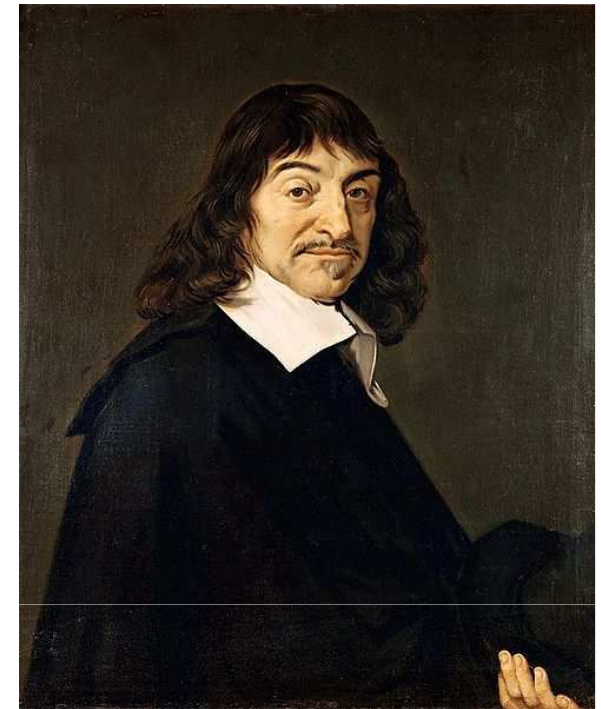
Dopo Galileo il principale contributo al perfezionamento delle lenti si ebbe nel 1637 con la pubblicazione del *Dioptrique* da parte di Cartesio.

Le imperfezioni delle lenti (aberrazioni cromatica e sferica) sono legate alla differenza di spessore dovuta alla curvatura.

Allungando la focale della lente si riducono entrambi.

Cartesio propose diversi progetti per completamente esenti da aberrazioni sferiche, ma non erano, all'epoca, tecnologicamente realizzabili.

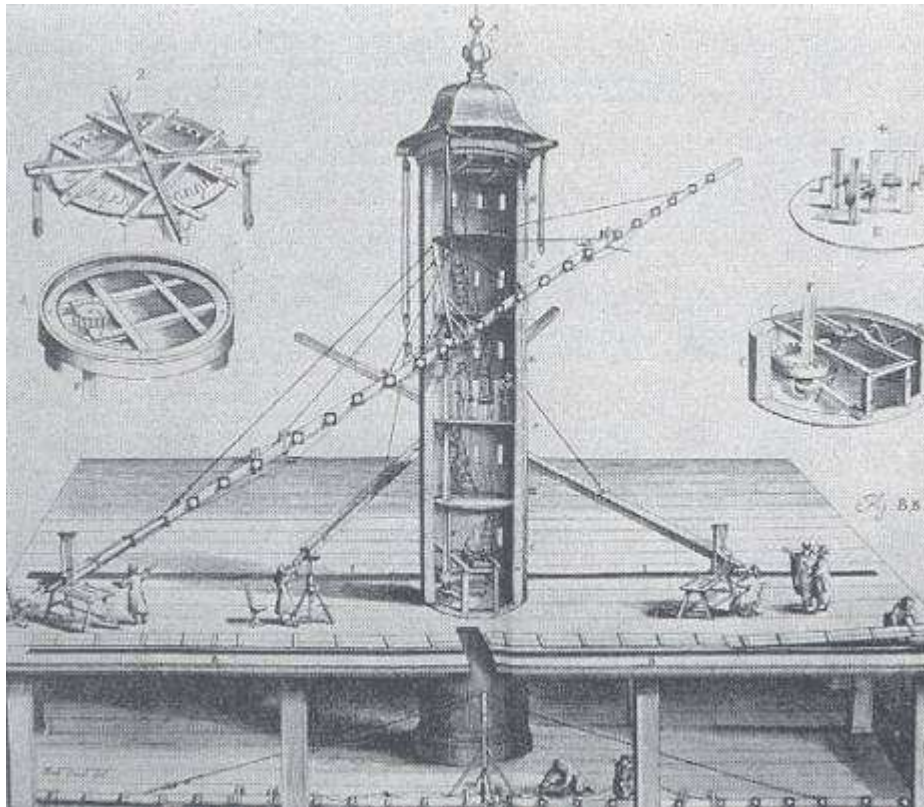
Bisognerà aspettare circa un secolo.



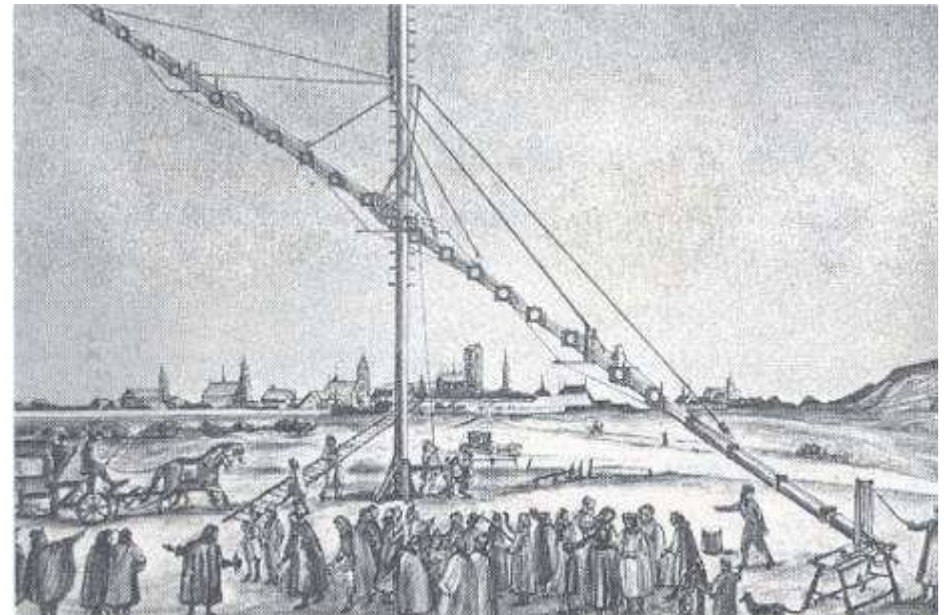
# Il telescopio

Hevelius (1611 – 1687) costruisce un telescopio con un obiettivo a due lenti (l'idea è però di De Rheita (1597 – 1660)) e i suoi telescopi, visti i risultati che ottiene, sono senz'altro migliori dei recedenti.

Generalmente utilizzò strumenti di 5 cm di diametro e di 2 m di lunghezza focale, ma ne costruì di 10 e 20 m arrivando fino a 50 m di focale.

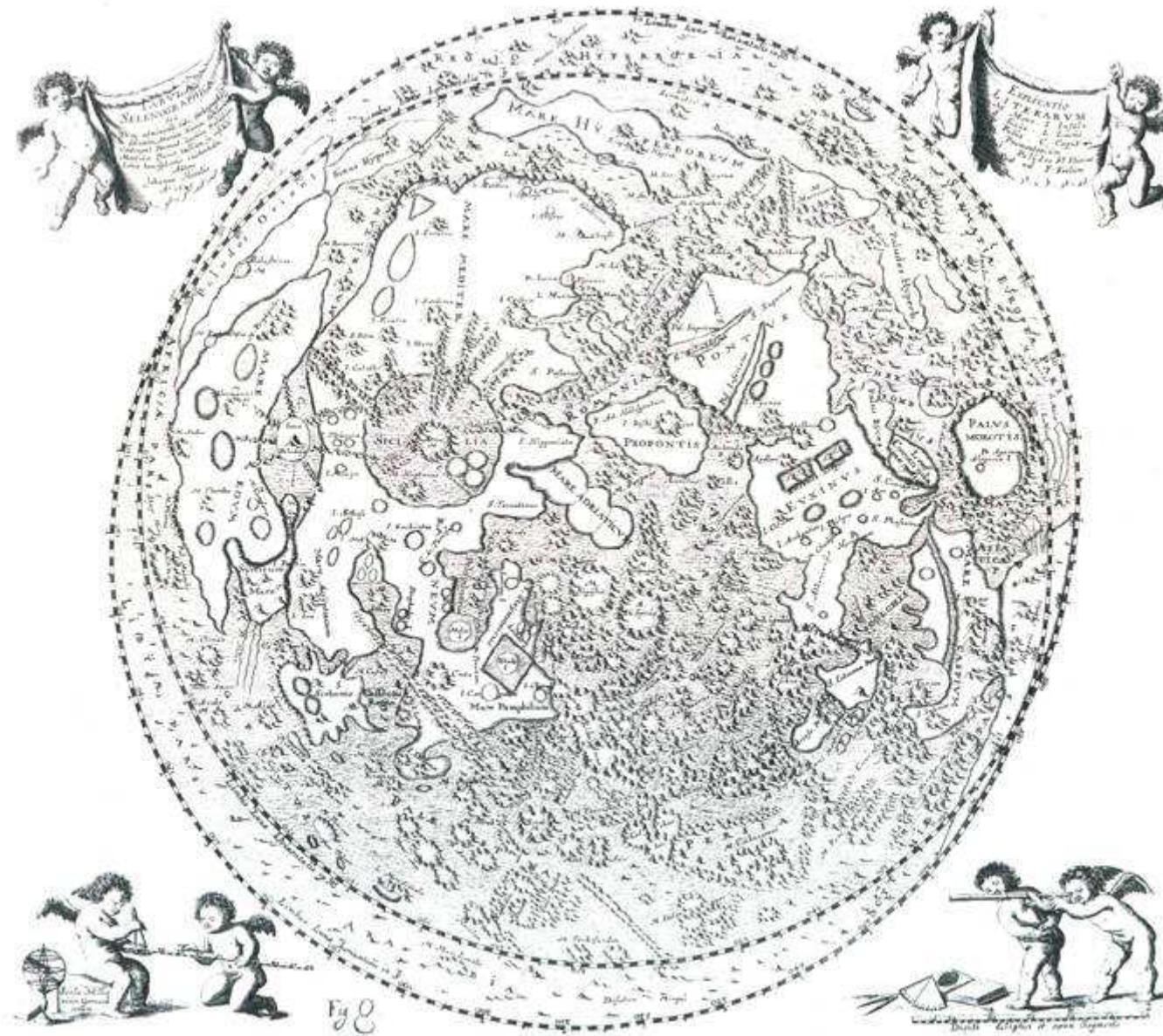


I cannocchiali di Hevelius, in basso quello da 50 m.





# Il telescopio



Mappa della Luna disegnata da Hevelius tra il 1643 e il 1644

# Huygens

Negli anni tra il 1650 e il 1660 i migliore telescopi furono costruiti da Christian Huygens (1629 – 1695) .

Con un telescopio di 7 m di focale e 6 cm di apertura scoprì la natura gli anelli di Saturno .

Con lo stesso strumento che consentiva fino a 100 ingrandimenti, misurò anche la rotazione di Marte.

Insieme al fratello costruivano telescopi utilizzando la regola della radice quadrata della focale:

$$\frac{d}{d_0} = \sqrt{\frac{f}{f_0}}$$

Se con una focale di 2 m usavano un diametro di 3 cm, con una focale di 8m utilizzavano un obiettivo da 6 cm.

Riuscirono a realizzare lenti fino a 68m di focale (diametro di 22 cm).



# Eustachio Divini

Nato a San Severino Marche (MC) il (4.10.1610 – 22.2.1685) si trasferì a Roma dove studiò con Benedetto Castelli (discepolo di Galileo) e divenne amico di Evangelista Torricelli. Divenne famoso come costruttore di orologi e di lenti. I suoi telescopi erano concorrenziali con quelli di Huygens.



Cannocchiale ottagonale 1664  
Legno, cartone, carta fiorentina  
Lunghezza 2980 mm

# Giuseppe Campani

Nato a Castel San Felice (in Umbria, presso Spoleto) nel 1635 si trasferì a Roma dove divenne famoso per aver costruito, con i fratelli un orologio silenzioso che fu regalato al papa Alessandro VII. Successivamente si dedicò a tempo pieno alla costruzione di lenti, e per circa 50 anni costruì telescopi e lenti per persone e istituzioni importanti, fra cui l'Osservatorio Reale di Parigi, diretto a quell'epoca da Cassini.

Inventò, tra l'altro, della prima smerigliatrice e lucidatrice per lenti.

Morì a Roma il 28 luglio 1715.

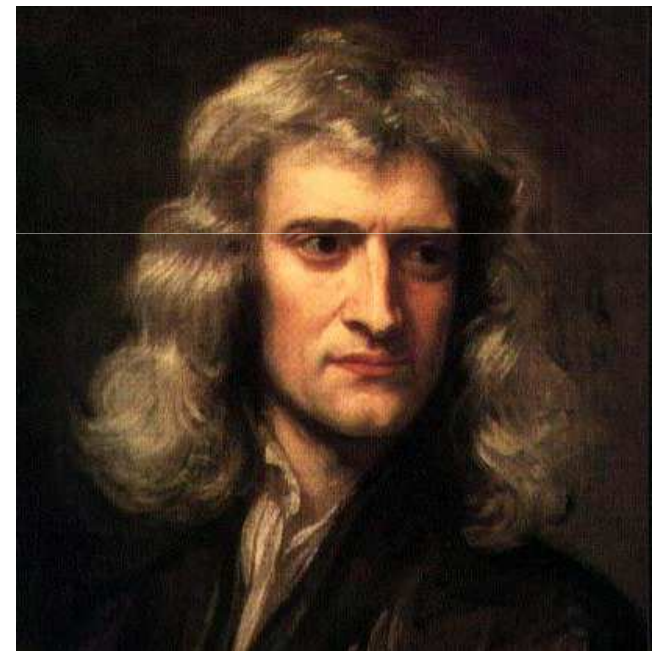
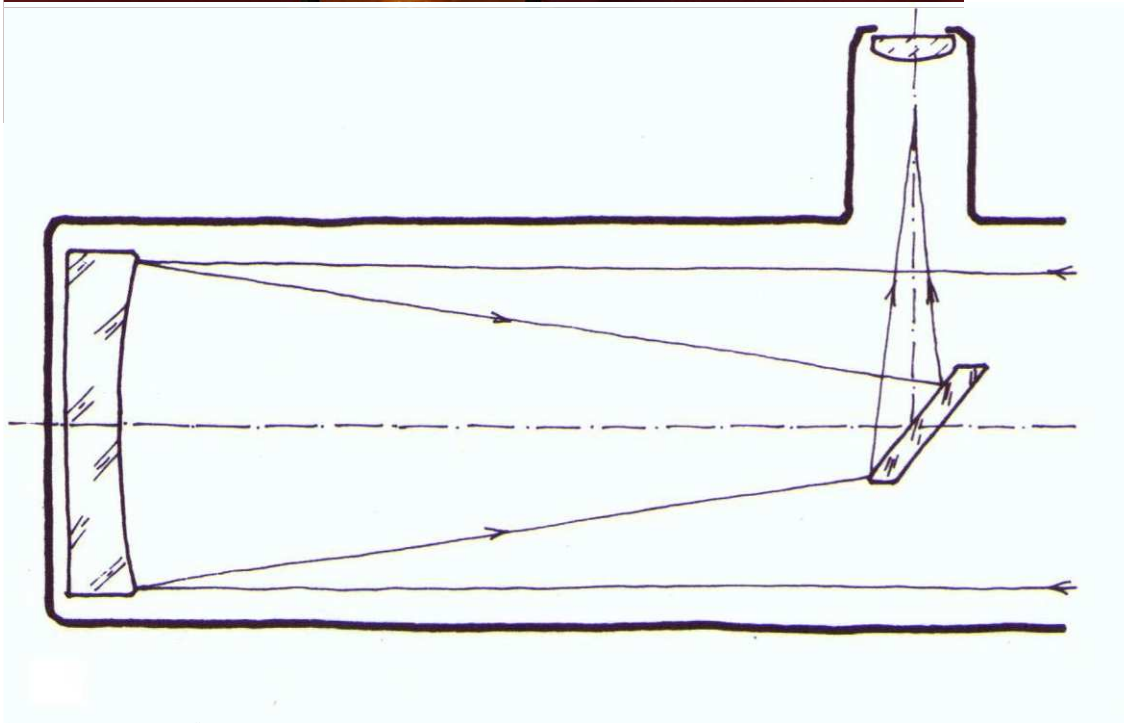


Cannocchiale c. 1664  
Cartone, pelle  
Lunghezza 2250 mm

# Telescopio newtoniano

Costruito nel 1668, fu presentato alla riunione dell'11 gennaio 1672 della Royal Society riscuotendo un enorme successo.

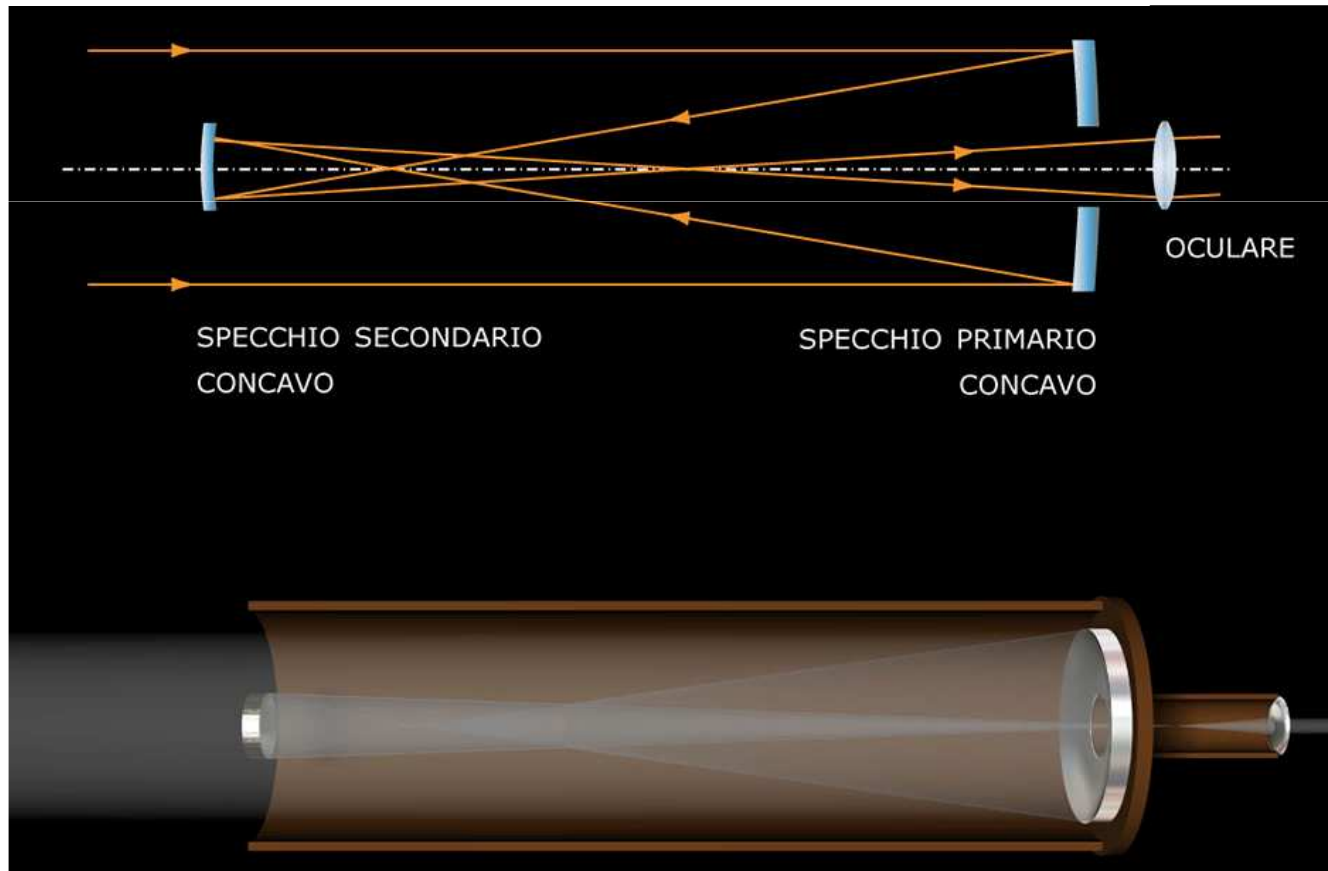
$d = 37 \text{ mm}$ ;  $f = 16 \text{ cm}$



# Telescopio gregoriano

Proposto da James Gregory (1639 – 1675) nel 1663 doveva avere entrambi gli specchi concavi: il primario parabolico e il secondario ellittico.

Non realizzò mai il suo telescopio.



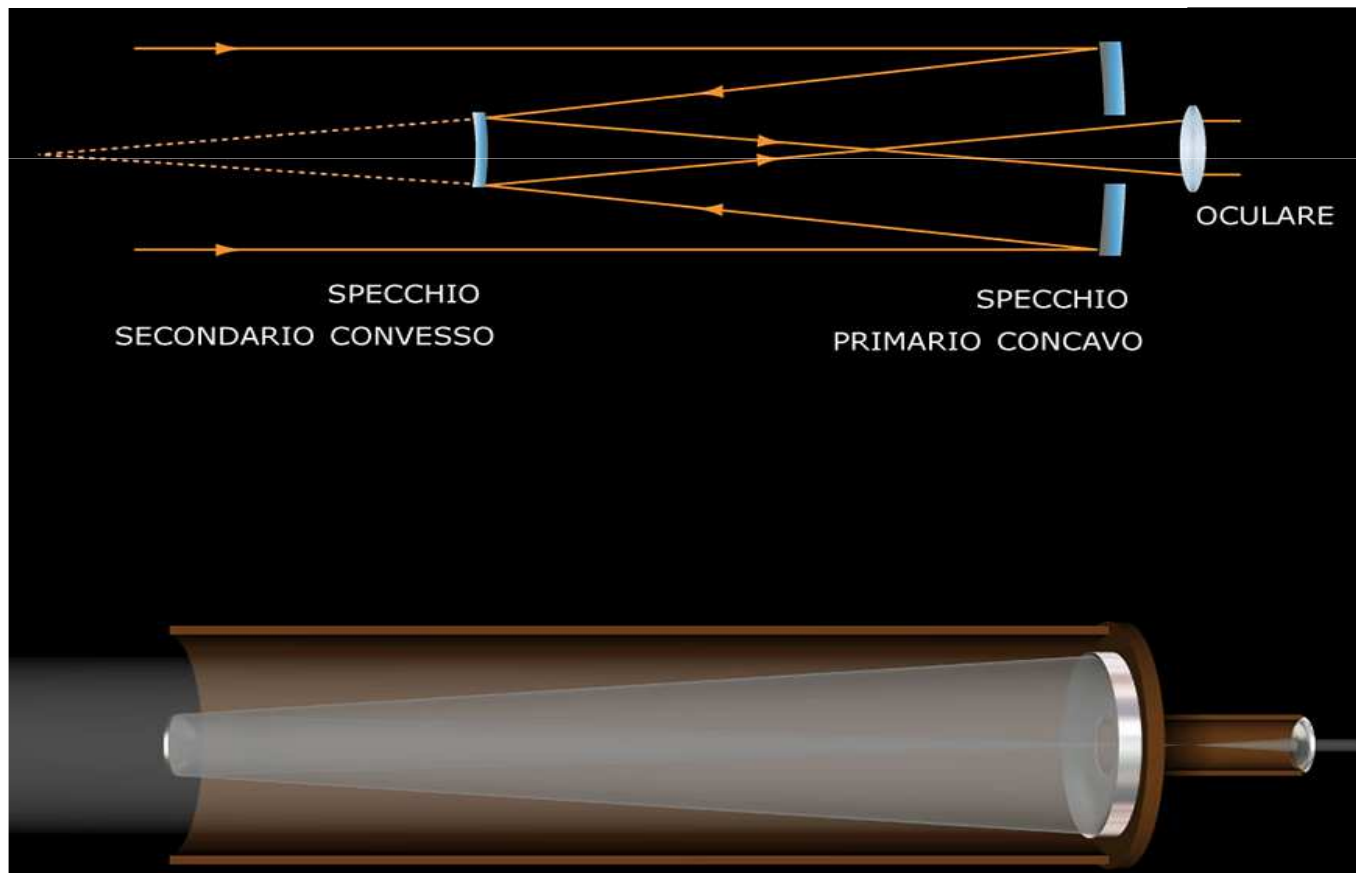
Telescopio gregoriano costruito da John Dollond (1706 – 1761) e conservato al Museo della Storia dell'Università di Pavia



# Il telescopio Cassegrain

Attribuito al prete cattolico francese Laurent Cassegrain (1629–1693) dopo l'apparizione di disegni da lui fatti sul *Journal des sçavans* il 25 aprile 1672.

E' un riflettore con un primario concavo e il secondario convesso.



Disegni simili furono pubblicati nel 1632 da Bonaventura Cavalieri e da Marin Mersenne nel 1636.

Risulta che lo stesso Gregory, nel 1662 fece esperimenti con secondari convessi

# Il telescopio

Il riflettore però non ebbe grande successo in quanto la tecnologia per la costruzione degli specchi non era molto sviluppata.

Newton utilizzò metallo di campana reso lucido da una soluzione di arsenico.

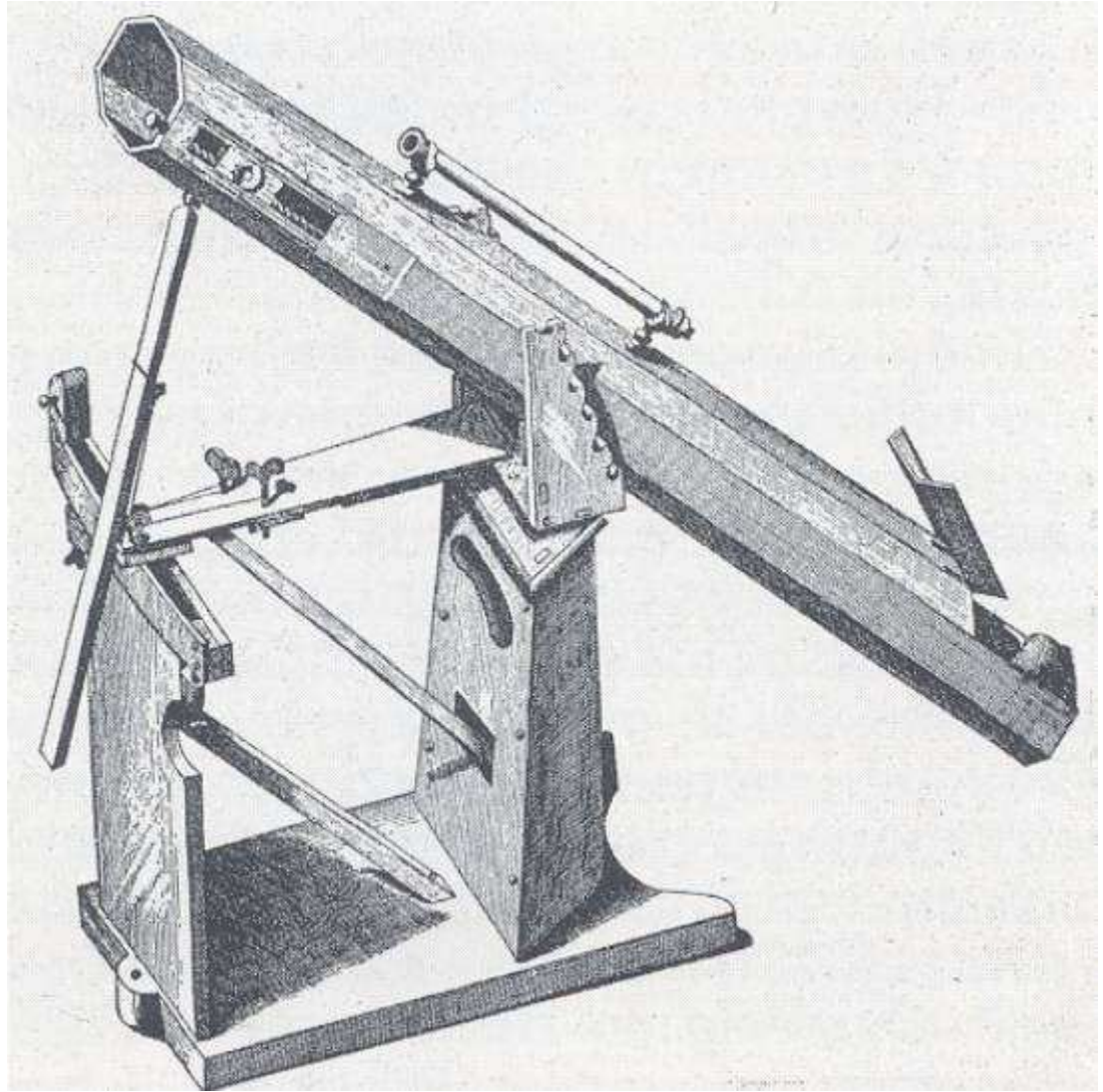
Tentativi contemporanei con una lega di rame e arsenico non ebbero risultati migliori.

Solo in seguito, con lo “speculum” ( $\text{SnCu}_4$ ), una lega composta al 68% di rame e al 32% di stagno, si ebbero risultati migliori.

# Il telescopio di Hadley

Il primo riflettore in grado di competere con i rifrattori dell'epoca fu il telescopio di John Hadley (1682 – 1744) presentato alla Royal Society di Londra nel 1722.

La qualità dello specchio parabolico da 15 cm, in Speculum, con una focale di 1,6 m e la montatura altazimutale con moti micrometrici ne fecero il primo vero strumento di questo tipo tanto che in molti ritengono che il vero inventore dei telescopi riflettori si appunta Hadley.



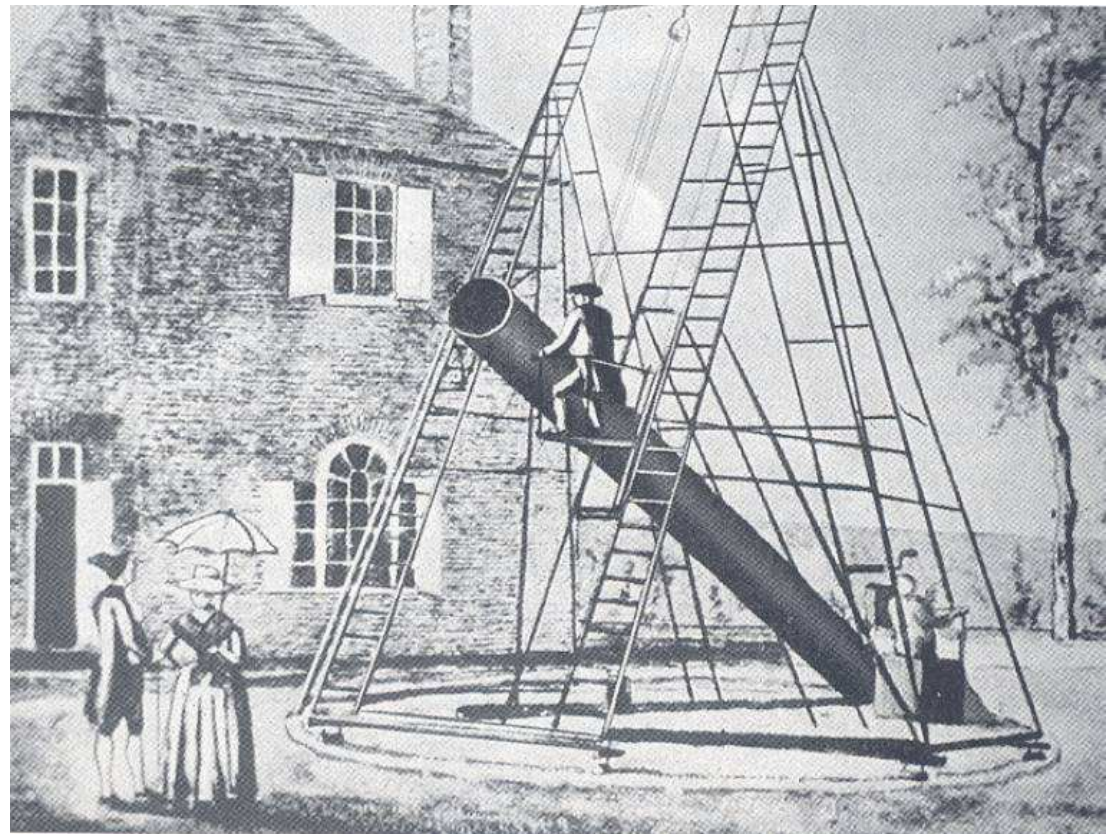
# Il telescopio di Herschel

Un impulso ancora maggiore allo sviluppo dei riflettori si ebbe con William Herschel, lo scopritore di Urano nel 1781. Il suo telescopio da 16 cm di diametro e 2 m di focale fu messo a confronto con uno dei migliori dell'epoca (un telescopio di di Short di 24 cm) risultando nettamente migliore.



Nel 1782 completò con successo un 30 cm da 6,1 m di focale e nel 1788 un 46 cm con la stessa focale.

Tranne in un caso di grégoriano, costruì sempre newtoniani

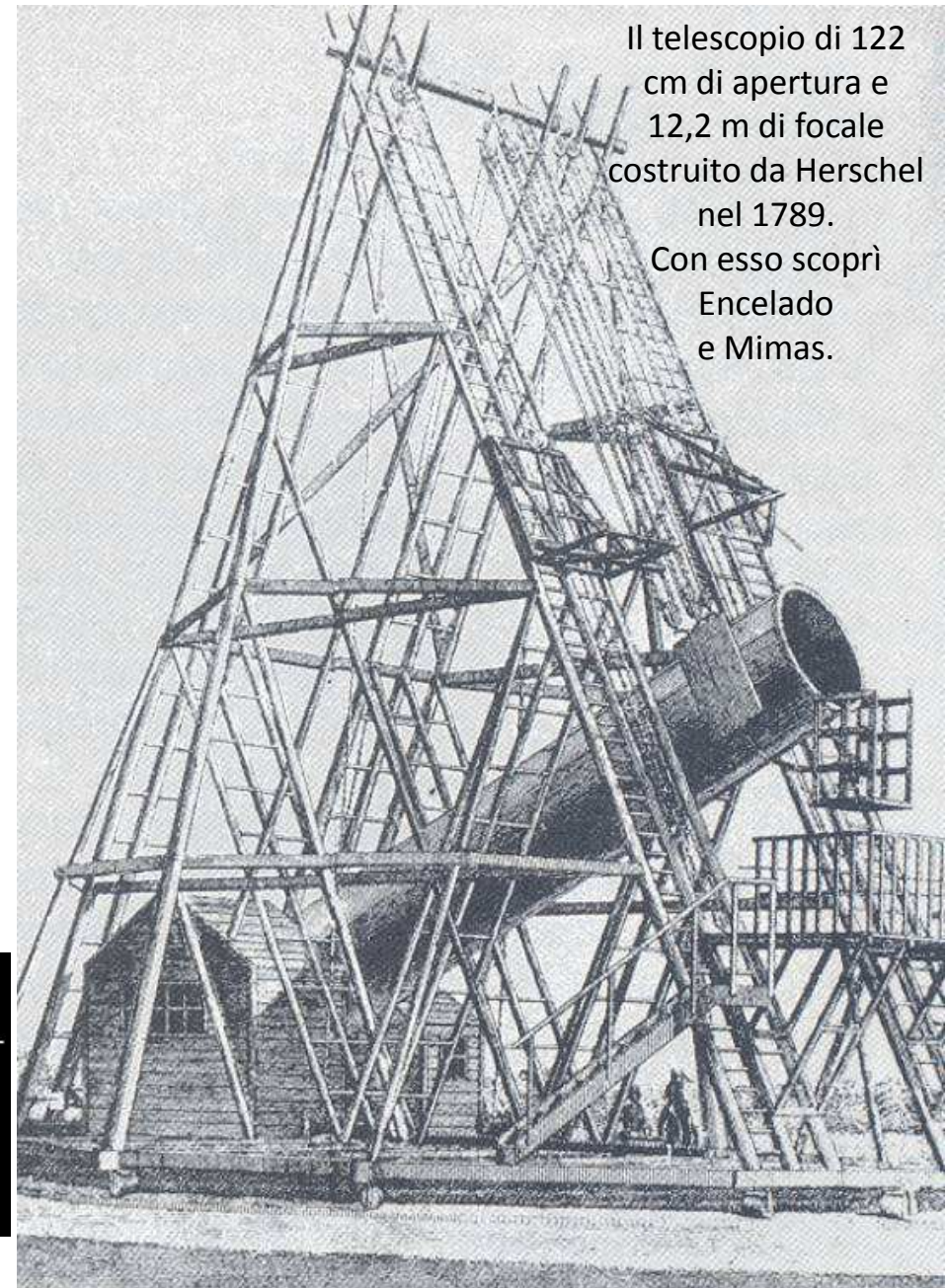
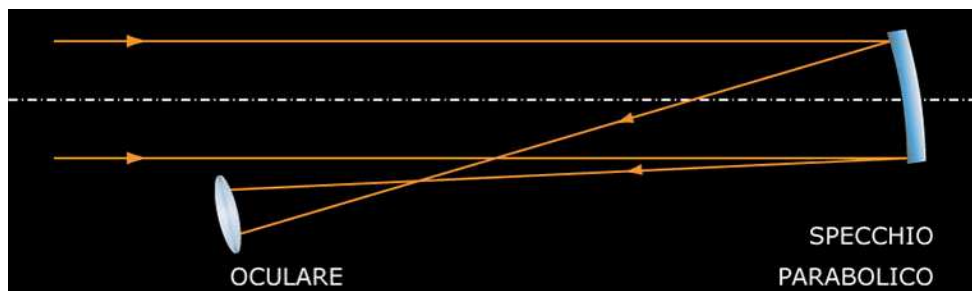




# Il telescopio di Herschel

Nonostante il miglioramento nella levigatura degli specchi, questi assorbivano ancora circa il 40% della luce e se si aggiunge l'ostruzione del secondario, ce comportava un altro 40% di perdita di luminosità, questi strumenti erano abbastanza bui.

Herschel inclinò lo specchio primario in modo che l'immagine si formasse dal bordo del tubo. Questa configurazione è nota come configurazione herscheliana.

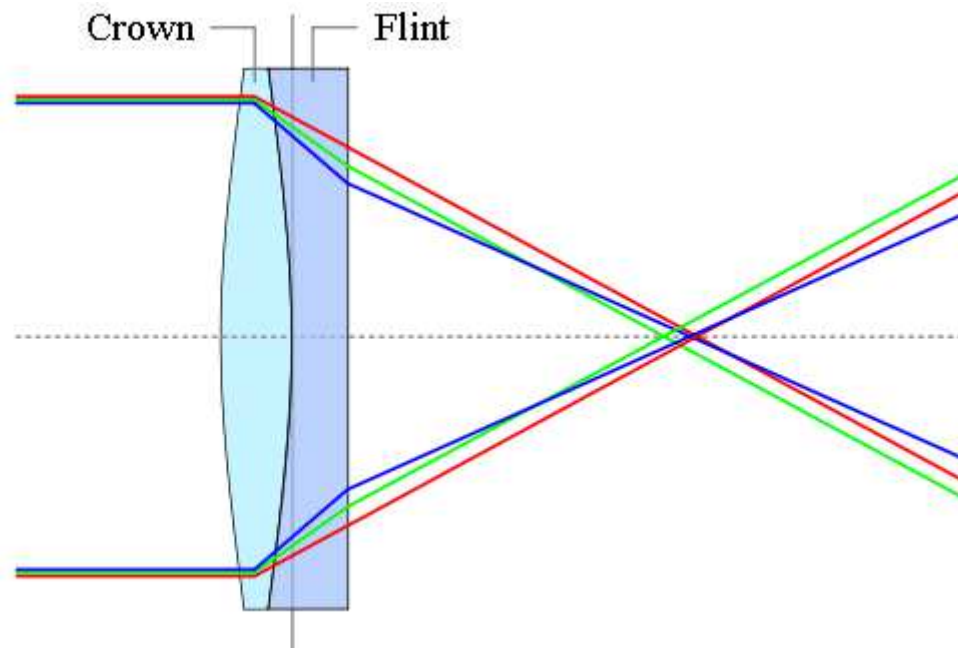


# Il doppietto acromatico

Nello stesso secolo che vide i giganti di Herschel, anche i rifrattori ebbero un nuovo impulso.

Nel 1733 il londinese Chester Moor Hall (1703 – 1771) costruì il primo doppietto acromatico con una lente convergente di vetro crown e una divergente di vetro flint (verso l'oculare).

Le lenti tipiche erano di 5 cm di diametro e 50 cm di focale.



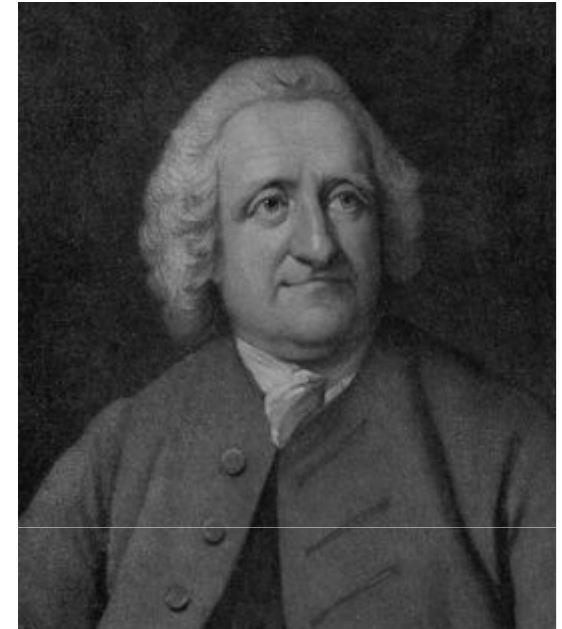
# Il doppietto acromatico

Un notevole miglioramento si ebbe solo nel 1758 con John Dollond (1706 – 1761) che brevettò il modello e per diversi anni si credette che fosse stato lui l'inventore.

I suoi primi obiettivi erano di 1,5 m di focale e aperture di 6-7 cm.

Ma le prestazioni non erano ancora eccezionali.

I problemi maggiori erano legati alla lente convessa in flint, vetro difficile da reperire e da fondere in modo che fosse adeguatamente omogeneo.



Comunque i doppietti dell'epoca offrivano ottime prestazioni rispetto agli obiettivi a singola lente. Il francese Lalande riteneva che un obiettivo acromatico da 76 mm e 2,37 m di focale offriva prestazioni migliori di una lente semplice di Campani da 10,85 m di focale.

La difficoltà di avere grosse fusioni di vetro flint, all'inizio del 1800, faceva ritenere un obiettivo di 15 cm di diametro, “grande”.



# Guinand e Fraunhofer

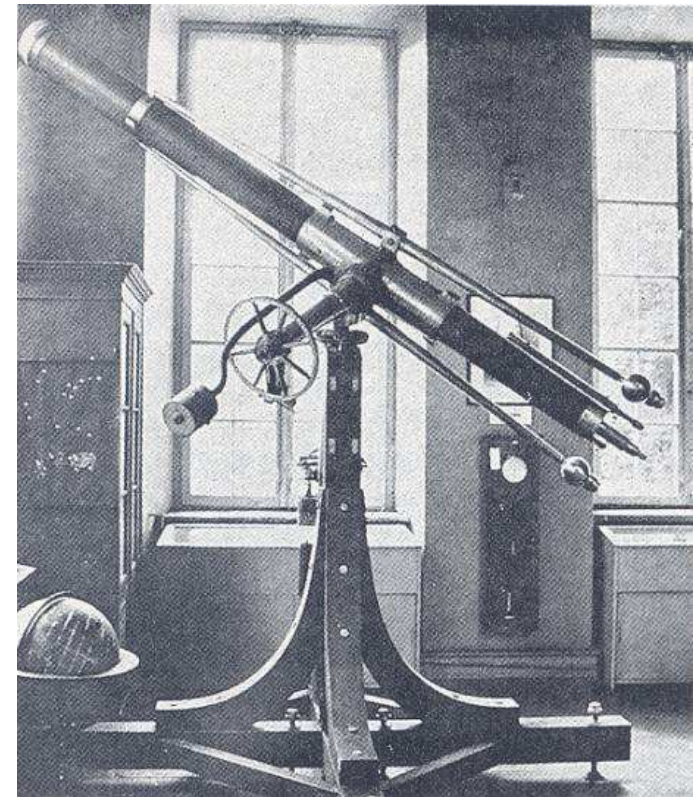


Un considerevole salto di qualità si ebbe agli inizi dell'800 quando Pierre Louis Guinand (1758 – 1824) e Joseph Fraunhofer (1787 – 1826) riuscirono ad ottenere la fusione regolare di grossi dischi di vetro flint.



Il punto di riferimento per l'epoca è il rifrattore di Dorpat che Fraunhofer costruì nel 1824 per Wilhelm. Un acromatico da 24 cm di diametro e 4,3 m di focale.

Anche il telescopio con cui Galle nel 1831 riconobbe Nettuno era un 23 cm di Fraunhofer.



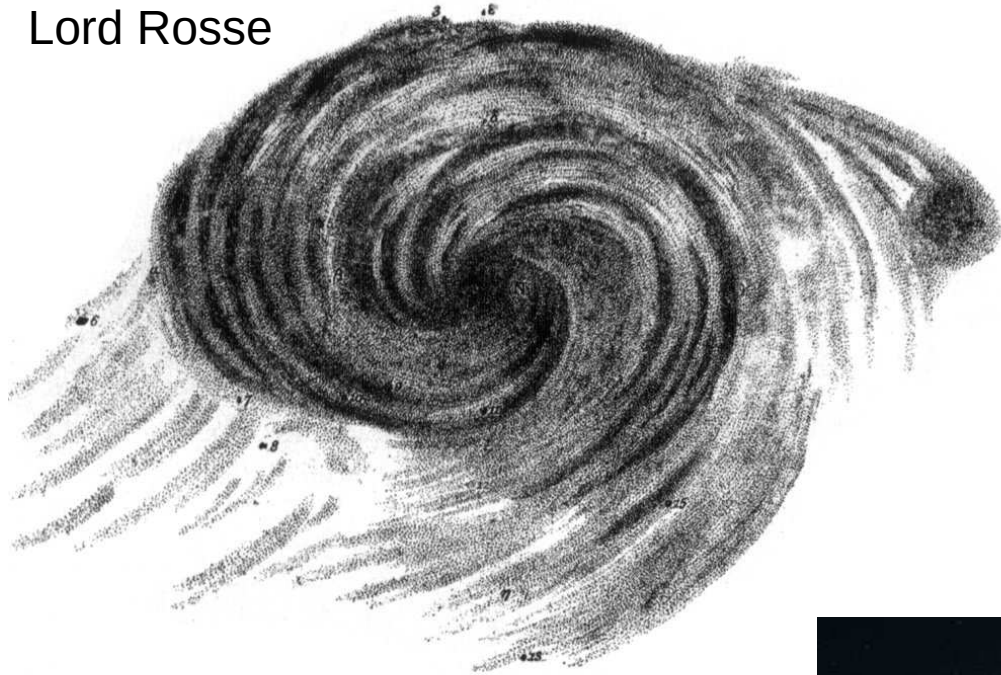


Nel 1840, a Birr nella contea di Offaly, Lord Rosse costruì il suo "Leviathan of Parsonstown", un telescopio da 182 centimetri di diametro, che fu per molti decenni il più grande telescopio del mondo.





Lord Rosse

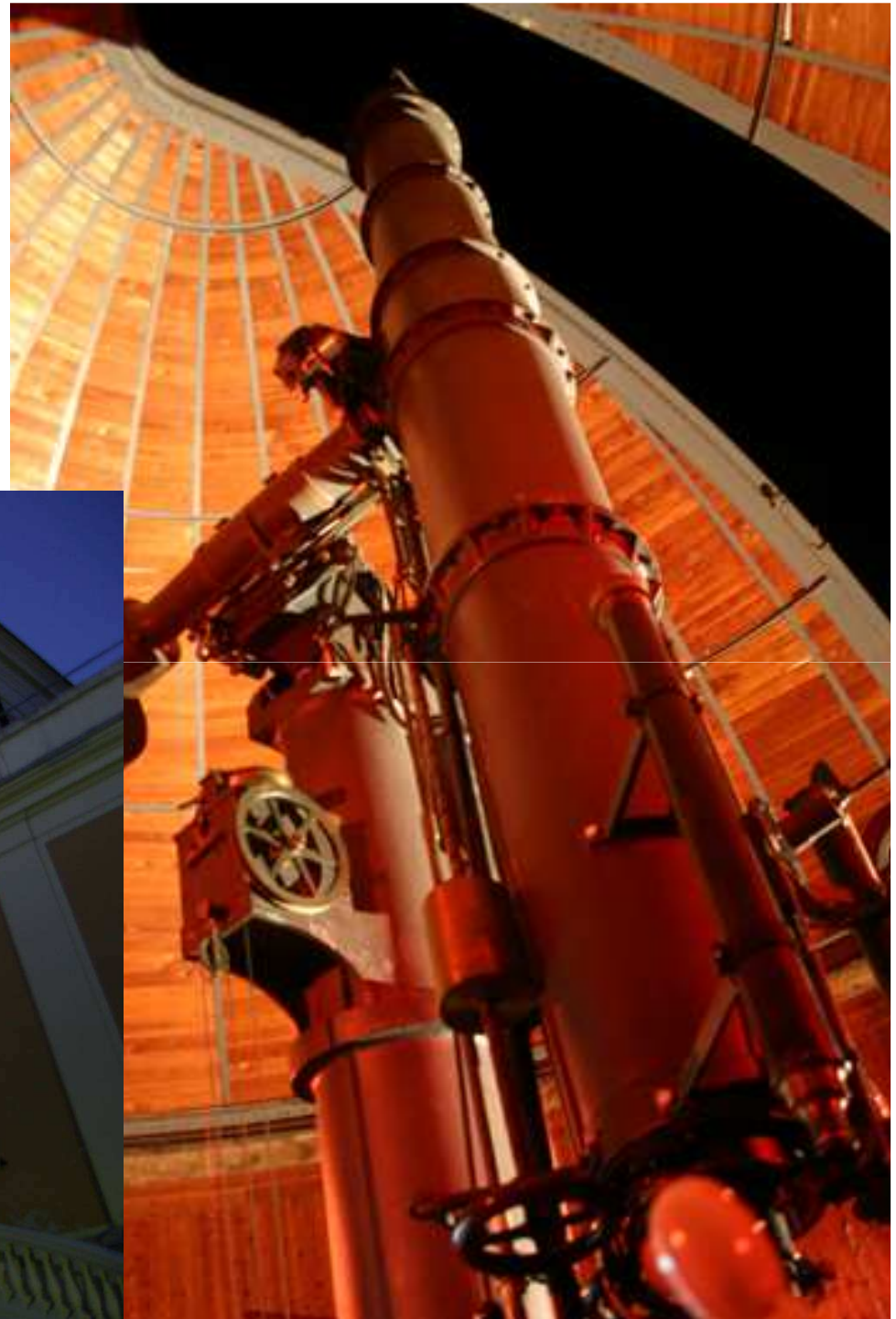


Lord Rosse eseguì pionieristici studi astronomici e scoprì la natura a spirale di alcuni oggetti nebulosi, che oggi sappiamo trattarsi di galassie a spirale.

La prima galassia a spirale che scoprì fu M51, ed i suoi disegni della galassia assomigliano molto alle fotografie moderne (oggi M51 è nota come Galassia vortice).



Il telescopio Cooke dell'Osservatorio INAF di Collurania a Teramo. Fu con questo telescopio che Vincenzo Cerulli (1859-1927) capì che i cosiddetti "canali" di Marte, scoperti da Giovanni Virginio Schiaparelli (1835-1910) nel 1877, erano illusioni ottiche dell'osservatore.





# I record dell'800

## I maggiori rifrattori del mondo dal XIX secolo

| Anno                | apertura utile cm | costruttore    | località                 |
|---------------------|-------------------|----------------|--------------------------|
| 1824                | 24                | Fraunhofer     | Dorpat (URSS)            |
| 1835                | 30                | Cauchois       | Cambridge (Inghilterra)  |
| 1839                | 38                | Merz & Mahler  | Pulkovo (URSS)           |
| 1852*               | 60                | Slater         | Wandsworth (Inghilterra) |
| 1862                | 47                | Alvan Clark    | Dearborn (USA)           |
| 1871                | 63,5              | Cooke          | Newcastle (Inghilterra)  |
| 1873                | 66                | Alvan Clark    | Washington (USA)         |
| 1878                | 68                | Grubb          | Vienna (Austria)         |
| 1885                | 76                | Alvan Clark    | Pulkovo (URSS)           |
| 1888                | 91                | Alvan Clark    | Mount Hamilton (USA)     |
| 1897                | 102               | Alvan Clark    | Williams Bay (USA)       |
| 1900                | 125               | Gautier        | Parigi (Francia)         |
| (in Italia)<br>1886 | 49                | Merz & Repsold | Milano                   |

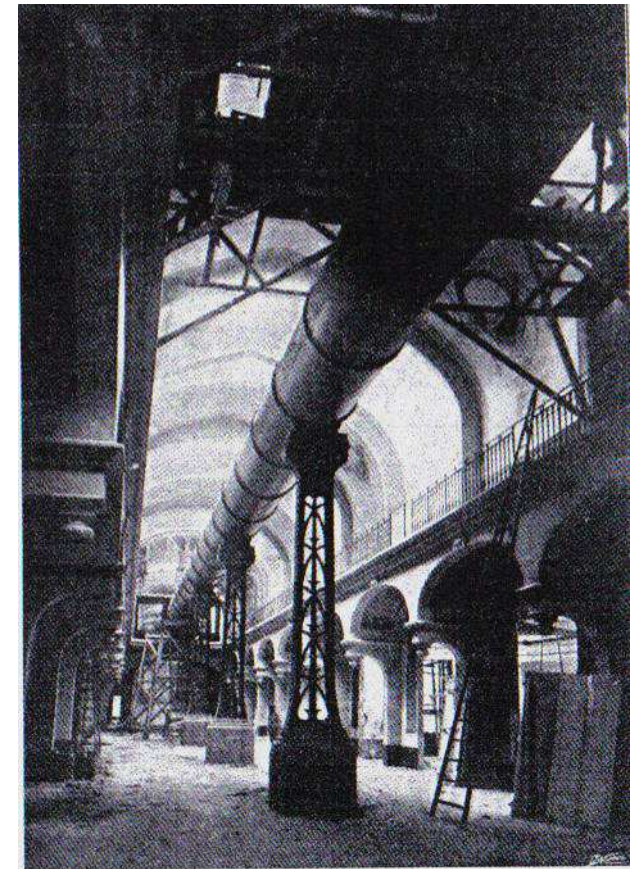
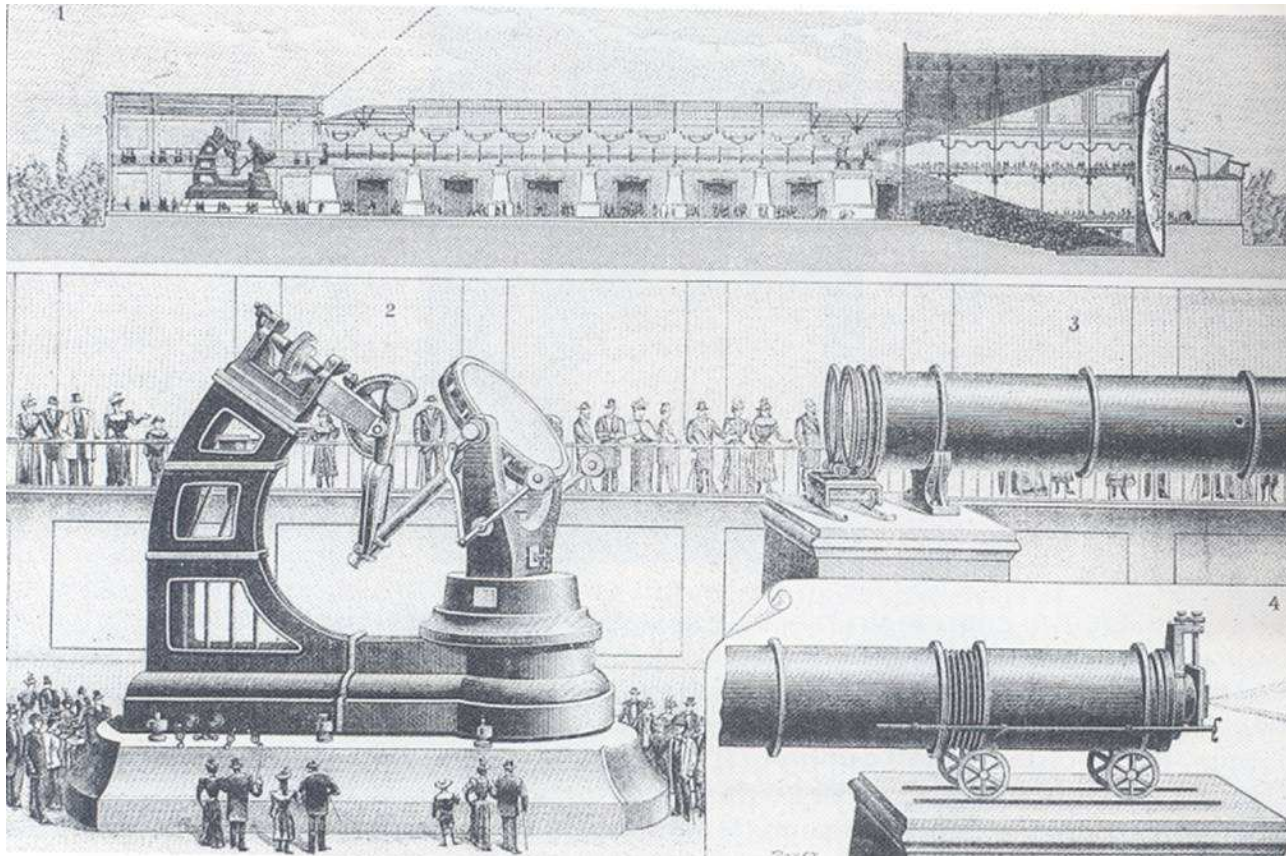
\* Di cattiva qualità; smantellato sei anni dopo.



# I telescopi del XX secolo

Il nuovo secolo si apre con la costruzione del più grande rifrattore mai realizzato.

Costruito per la l'Esposizione Universale di Parigi del 1900 aveva un obiettivo di 1,25 m e focale di 57 m. Non era adatto per uso scientifico e terminata l'esposizione, i suoi costruttori non sono riusciti a venderlo a nessun osservatorio. È stato rottamato, ma le lenti sono ancora conservate all'Osservatorio di Parigi .

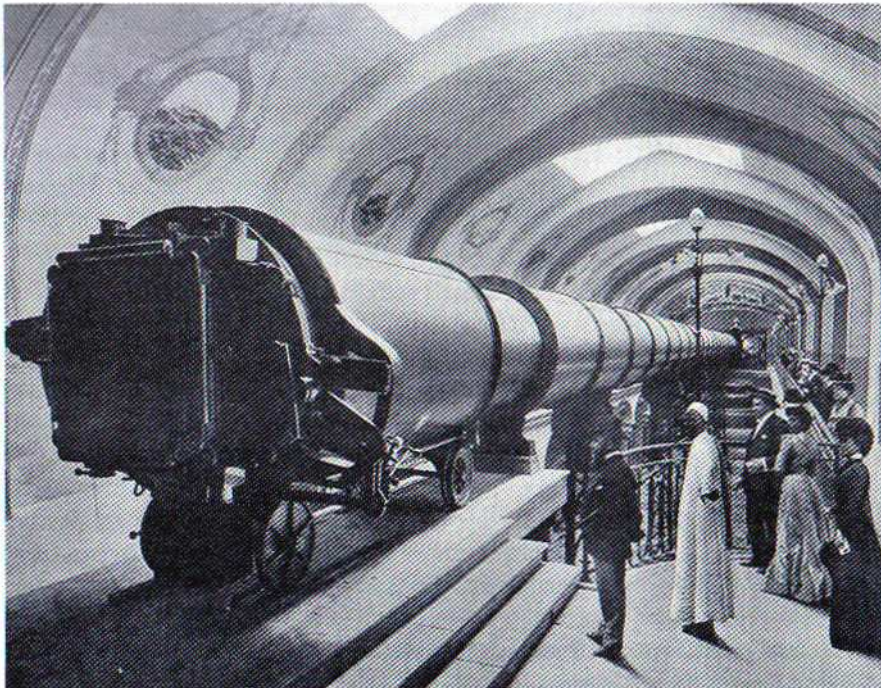




# I telescopi del XX secolo

A causa delle dimensioni il telescopio fu montato in posizione fissa orizzontale. La luce degli oggetti astronomici veniva inviata al tubo ottico attraverso un siderostato di Foucault: uno specchio piano mobile da 2 m di diametro, montato in un telaio in ghisa di grandi dimensioni, posto davanti all'obiettivo del cannocchiale.

L'oculare era montato su rotaie, per la messa a fuoco.  
L'ingrandimento minimo era di 500 x con un campo di 3'.

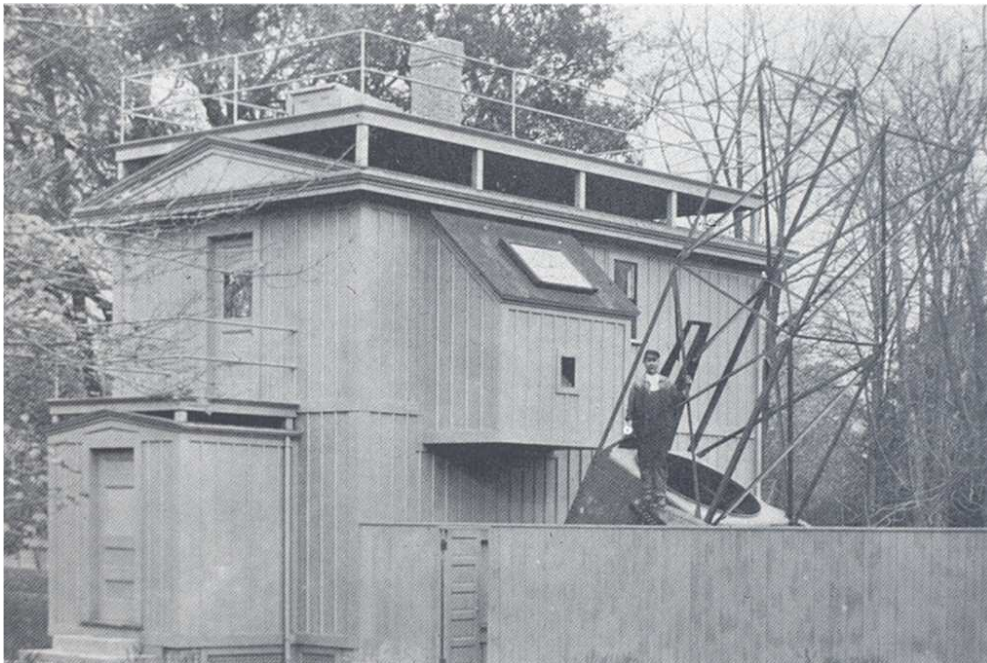


# Il riflettore Common

Le dimensioni necessarie per avere sempre strumenti più potenti fece riprendere la costruzione di riflettori.

Il prototipo dei grandi riflettori del XX secolo si deve all'inglese Andrew Ainslie Common (1841 – 1903) che nel 1888 costruì un riflettore da 152 cm (60 pollici) di diametro e 8,7 m di focale. Questo strumento aveva una montatura a forcina e l'asse polare galleggiava in un grosso volume d'acqua.

Era stato costruito come strumento per la fotografia ed ottenne notevoli successi.

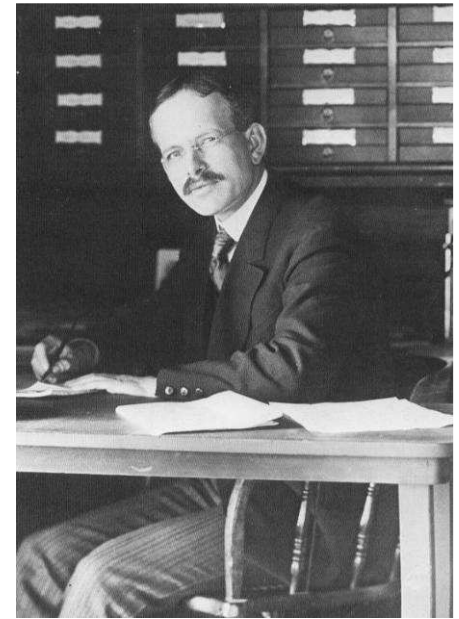




# Monte Wilson

L'osservatorio di Monte Wilson (MWO) si trova nella Contea di Los Angeles, in California, sul Monte Wilson, vicino a Pasadena, a 1742 metri di quota.

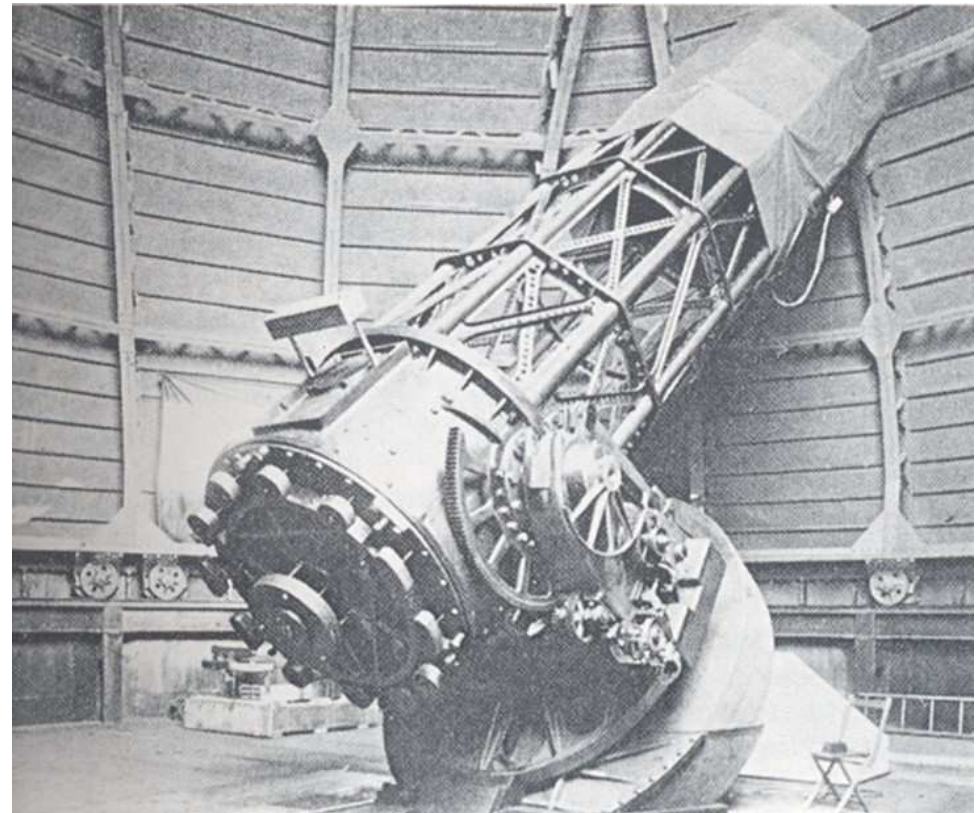
Il primo direttore fu George Ellery Hale (1868 – 1938), che fece costruire un telescopio riflettore da 152 cm di diametro e 7,6 m di focale.



Realizzato da George Willis Ritchey (1864 – 1945) nel 1905, è tuttora esistente.

Ha una montatura a forcella il cui asse polare galleggia su mercurio.

Con un sistema di specchi si può mandare la luce verso uno spettrografo, attraverso l'asse polare.



# Monte Wilson

Il più famoso telescopio di Monte Wilson è il telescopio Hooker, un riflettore di 2,5 m.

Lo specchio, lavorato ancora da Ritchey, ha una focale di 12,9 m e pesa 4,5 tonnellate.

È posto su una montatura a culla che però pregiudica l'osservazione in prossimità del polo.

Entrato in funzione nel 1917, rimarrà, fino al 1948 il più grande telescopio al mondo.



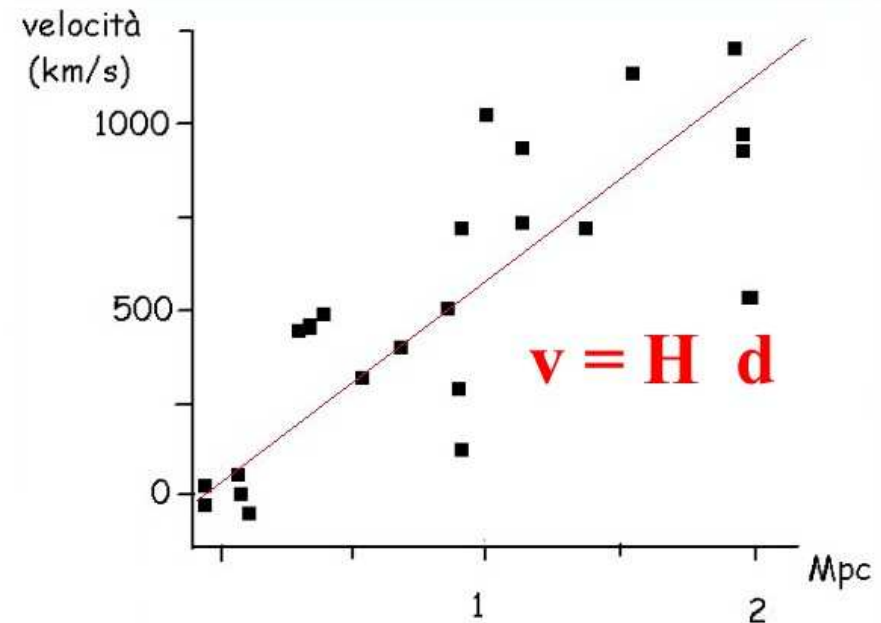
# Monte Wilson

Con questo strumento, per la prima volta, si sono risolte le stelle della galassia di Andromeda.

Nel 1929, con esso, Edwin Hubble (1889 – 1953) scoprì l'espansione dell'universo.

È stato utilizzato proficuamente fino agli anni '60.

Ristrutturato, è ancora in uso.





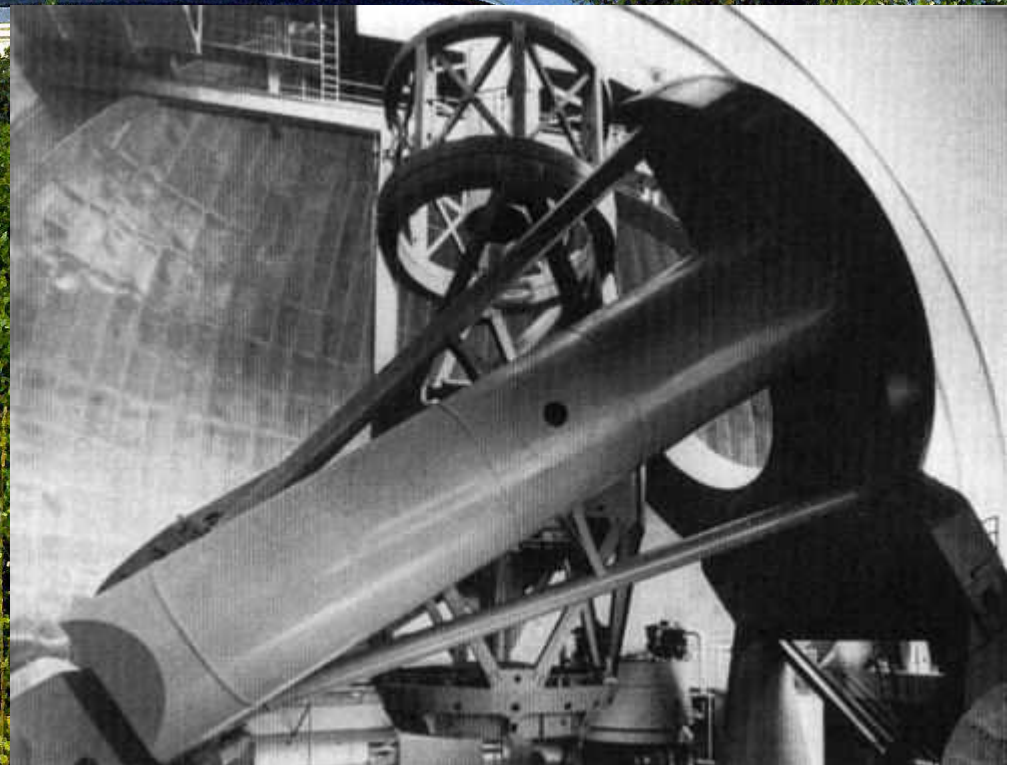
# Il telescopio di Monte Palomar

L'Osservatorio di Monte Palomar è uno dei più celebri ed è stato uno dei più importanti al mondo.

Ospita il famoso telescopio Hale di 5,08 m di diametro.

Fu completato nel 1949 e gestito dal California Institute of Technology.

È situato nella Contea di San Diego, circa 150 km a sud-est di Los Angeles, ad un'altitudine di 1710 metri.

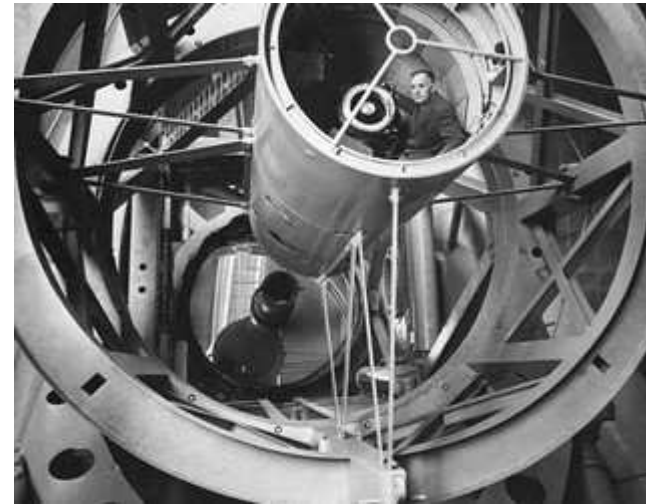




# Il telescopio Hale

Nel 1928 Hale ottenne dalla Rockefeller Foundation un finanziamento di 6 milioni di dollari per "la costruzione di un osservatorio, dotato di un telescopio riflettore di 200 pollici" che sarebbe stato gestito dal Caltech.

Il progetto fu supervisionato da Hale, la costruzione dello specchio fu affidata alla Corning Glass Works, che utilizzò un nuovo tipo di vetro, il Pyrex.



La costruzione dell'osservatorio iniziò nel 1936, ma a causa della Seconda guerra mondiale, il telescopio fu completato nel 1948.

Il Telescopio Hale è rimasto il telescopio più grande al mondo fino al 1976.

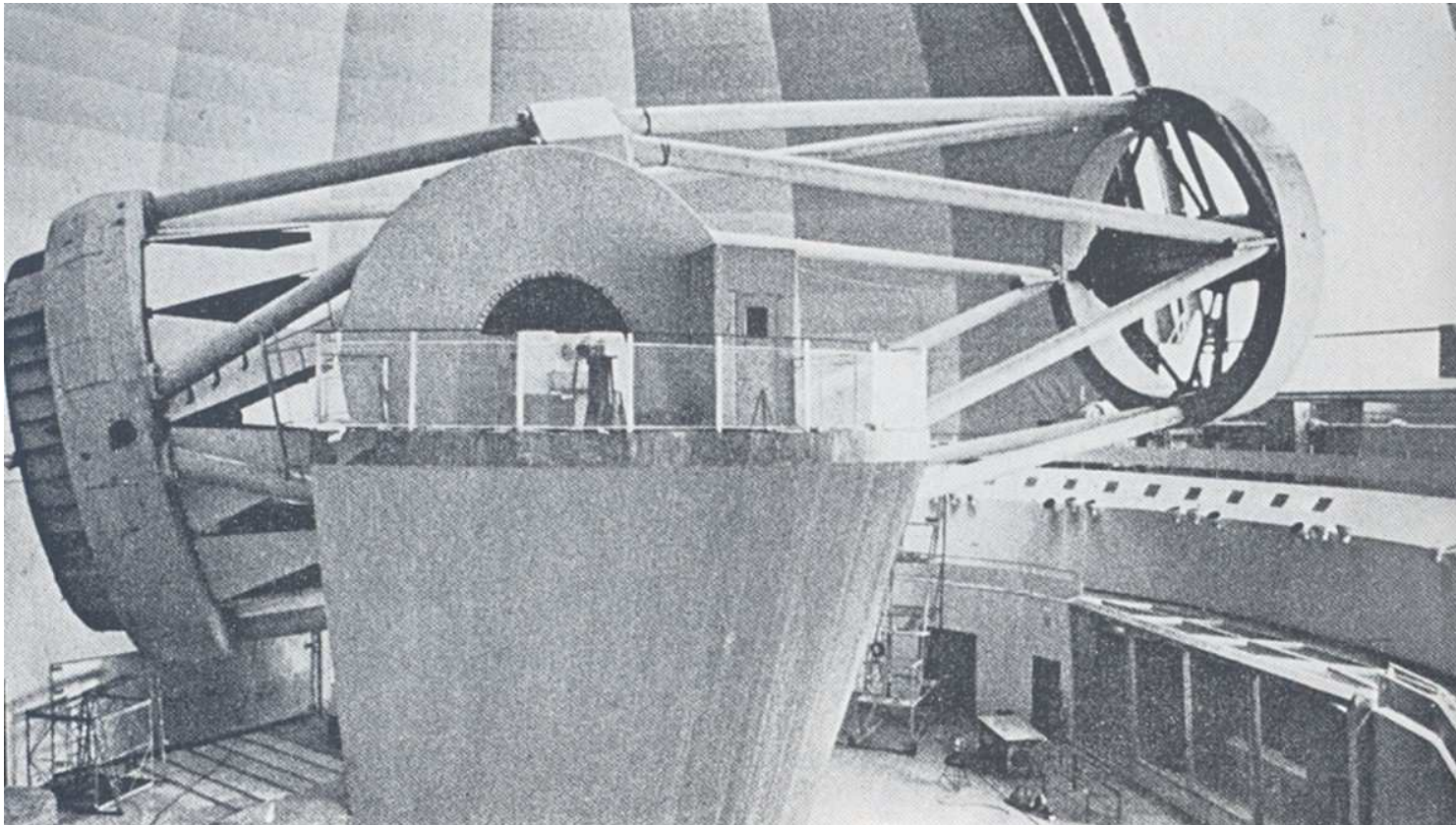
Ancora oggi è utilizzato dagli astronomi per attività scientifiche ed è equipaggiato con sensori nell'ottico e nell'infrarosso.

# Il telescopio BTA-6

Bolshoi Teleskop Azimutalnyi (Grande Telescopio Azimutale)

Nel novembre del 1976 venne inaugurato nella regione del Caucaso, in Unione Sovietica, un telescopio con lo specchio principale da 6 m.

Costruito dalle officine LOMO di Leningrado è alto 27 m e pesa 840 tonnellate.





# Il telescopio BTA-6

Può lavorare al fuoco primario con una focale di 24 m e nei due fuochi laterali con focale di 182 m (f/30).

Un altro elemento che lo contraddistingue è la montatura altazimutale.



# L'MMT

Un altro telescopio innovativo è il Multi Mirror Telescope.

Installato nel MMT Observatory (MMTO), situato negli Stati Uniti, sul Monte Hopkins in Arizona, 55 km a sud di Tucson, è gestito dall'University of Arizona e dallo Smithsonian Institution.

L'MMT operò fra il 1979 e il 1998 con un design allora innovativo: fu il primo telescopio il cui obiettivo era formato da specchi multipli, il primo con edificio co-rotante e il primo con una montatura altazimutale controllata da un computer.

L'obiettivo era formato da 6 specchi di 1,8 metri di diametro ognuno, per un obiettivo equivalente a quello di un telescopio di 4,5 metri di diametro.



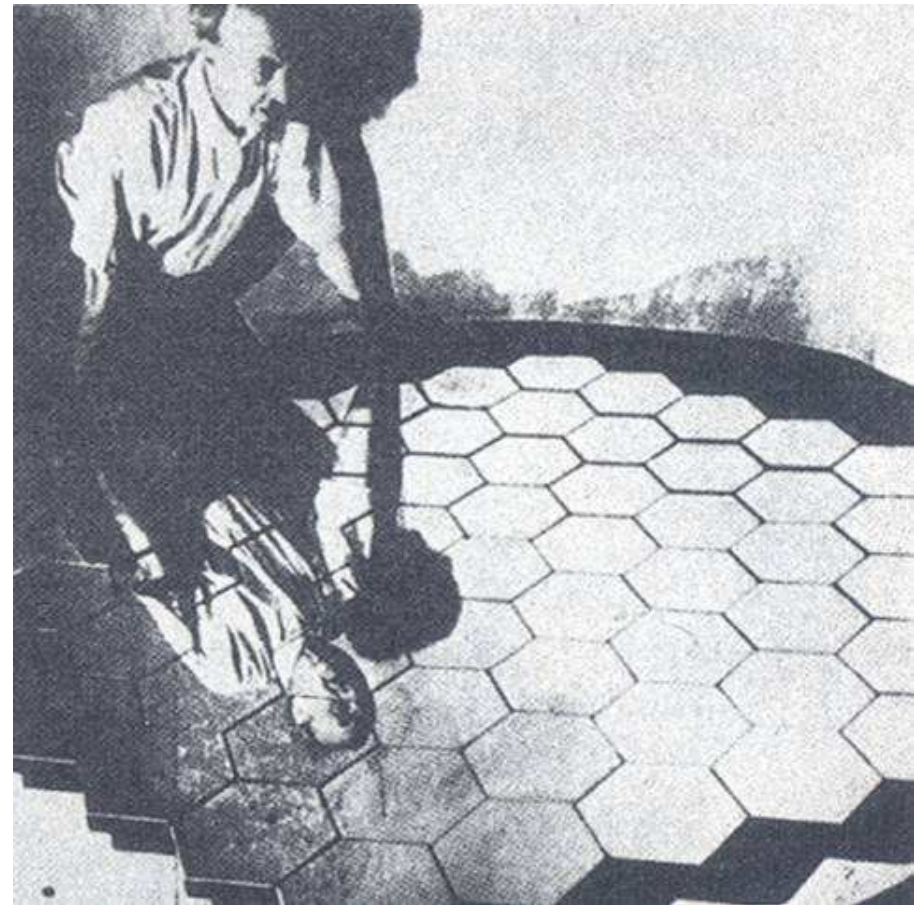
# L'MMT

Nel 2000 venne convertito sostituendo gli specchi con un singolo specchio di 6,5 m.

L'idea di un telescopio a molti specchi risale all'italiano Guido Horn d'Arturo (1879 – 1967), direttore dell'Osservatorio di Bologna che costruì la stazione osservativa di Loiano, oggi dotata, tra l'altro, di un riflettore da 152 cm.

La sua idea era quella di costruire una grande superficie riflettente mediante un mosaico di elementi esagonali.

Dal 1932, per oltre 30 anni, si dedicò a tale progetto e diede vita ad un primo strumento, poi successivamente potenziato e migliorato fino a raggiungere 180 cm di diametro e 10,40 m di lunghezza focale, posizionato nella Torre della Specola di Bologna.





# HUBBLE SPACE TELESCOPE

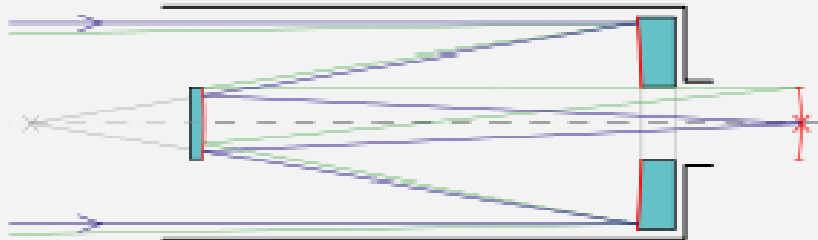
Lancio il 24 aprile 1990 – fine missione prevista per il 2014

Orbita in circa 96 minuti a 600 km di altezza.

È un riflettore Ritchey-Chrétien da 2,4 m di diametro.



Ritchey-Chrétien-Cassegrain-Teleskop



# HUBBLE SPACE TELESCOPE

La missione STS-125 dello Space Shuttle del maggio 2009, ha effettuato importanti riparazioni di HST, migliorandone sensibilmente le prestazioni.



L'importanza di Hubble non è dovuta solo alle spettacolari immagini, ma soprattutto alle ricerche che hanno permesso una media di 14 articoli scientifici alla settimana basati sui dati raccolti.



# HUBBLE SPACE TELESCOPE

## Hubble Ultra Deep Field

Almeno 10 000 galassie distanti fra 12,7 e 13 miliardi di anni luce.  
Il campo inquadrato equivale a quello di 1 eurocent a circa 20 m di distanza nella costellazione della Fornace.





# HUBBLE SPACE TELESCOPE

Ufficialmente gli aggiornamenti estendono la vita del telescopio fino al 2014, tuttavia Hubble potrà facilmente superare questa data.



Non prima del 2014 è previsto il lancio del James Webb Space Telescope (JWST), dotato di specchi di diametro equivalente a 6,5 metri e che opererà nell'infrarosso, con l'obiettivo principale di osservare le galassie dell'Universo primordiale.

Sarà posizionato in L2, a circa 1,5 milioni di chilometri dalla Terra, in direzione opposta al Sole.

# HUBBLE SPACE TELESCOPE

Questa posizione offre il minimo segnale di fondo termico e quindi la massima sensibilità alla radiazione infrarossa.



Tuttavia il telescopio James Webb rileva solo lo spettro infrarosso quindi Hubble, che possiede sensori che operano nelle bande dell'ultravioletto, del visibile e dell'infrarosso-vicino, può continuare ad essere di grande beneficio alla comunità scientifica.

# WEBB SPACE TELESCOPE

Il Telescopio Spaziale Webb è costruito e gestito in cooperazione dalla NASA e dall'ESA.



Il JWST peserà la metà dell'HST e avrà lo specchio principale in berillio. Questo sarà diviso in 18 sezioni che una volta in orbita si dispiegheranno attraverso dei sensibili micromotori che posizioneranno correttamente i segmenti.



# HUBBLE SPACE TELESCOPE

Confronto tra HST e JWST



# LARGE BINOCULAR TELESCOPE

LBT è un telescopio a doppia pupilla in montatura altazimutale in configurazione gregoriana, ottimizzato per interferometria e osservazione a grande campo. È collocato sul monte Graham, nel sud-est dell'Arizona, a più di 3000 metri di altezza.



LBT è costituito da due specchi parabolici primari composti da un unico blocco di vetro ricoperto da un sottile strato di alluminio.

Questi specchi, del diametro di 8,4 metri ciascuno, sono provvisti di un sistema di **ottica attiva** per correggere gli effetti di deformazione dovuti al loro stesso peso.

Il telescopio vede la partecipazione degli Stati Uniti tramite enti governativi e diverse università (50%); della Germania (25%) e dell'Italia (25%).

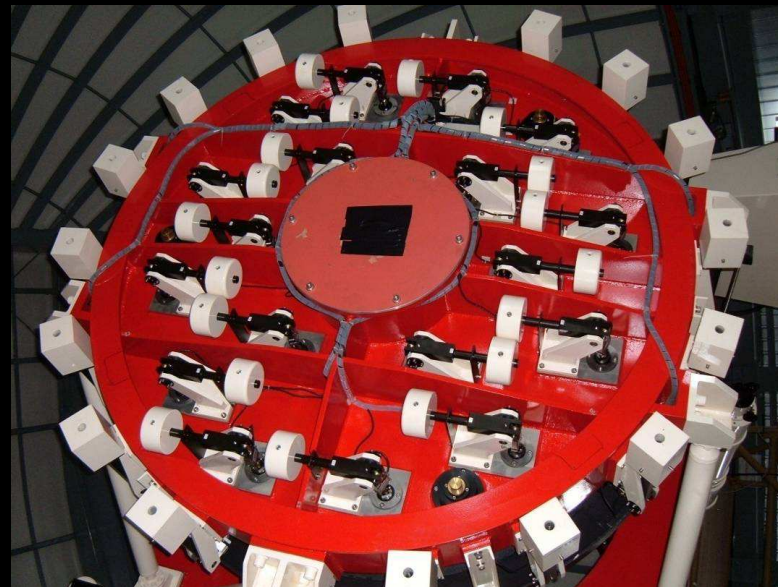
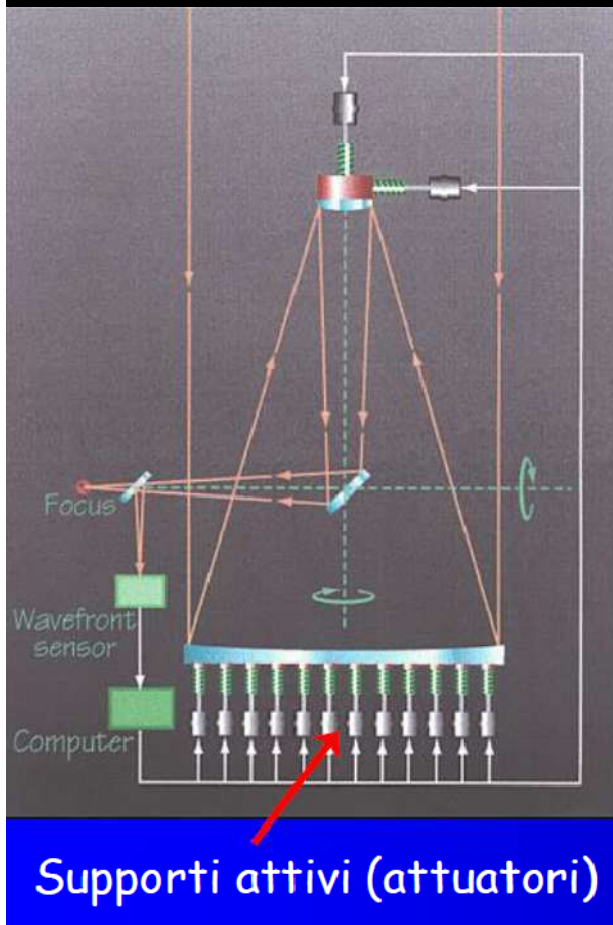
# OTTICA ATTIVA

L'ottica attiva è una tecnologia relativamente recente utilizzata nei moderni telescopi per avere superficie ottiche di grande precisione.

Essa lavora aggiustando "attivamente" la forma degli specchi dei telescopi.

Gli specchi primari dei moderni telescopi riflettori, che hanno diametri dai 3 agli 8 metri o più, non sono in grado di reggere il proprio peso senza deformarsi.

Un sistema di attuatori a controllo computerizzato posti sotto lo specchio può mantenerlo costantemente nella forma ideale, compensando gli effetti della gravità. Ciò assicura sempre una qualità ottimale delle immagini astronomiche.

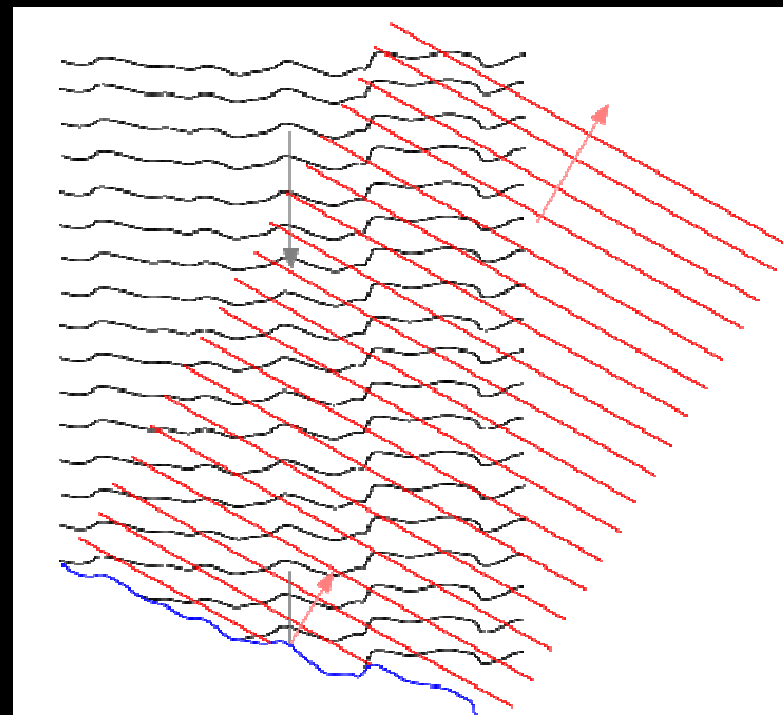




# LARGE BINOCULARE TELESCOPE

I due specchi secondari, sviluppati presso i laboratori dell'Osservatorio di Arcetri, sono specchi concavi di 911 mm adattivi.

Le **ottiche adattive** rappresentano una delle moderne tecniche utilizzate dai telescopi basati a terra per contrastare l'effetto di degradazione delle immagini dovuto alla turbolenza atmosferica, che riduce di fatto il potere risolutivo del telescopio a valori molto inferiori al limite teorico.

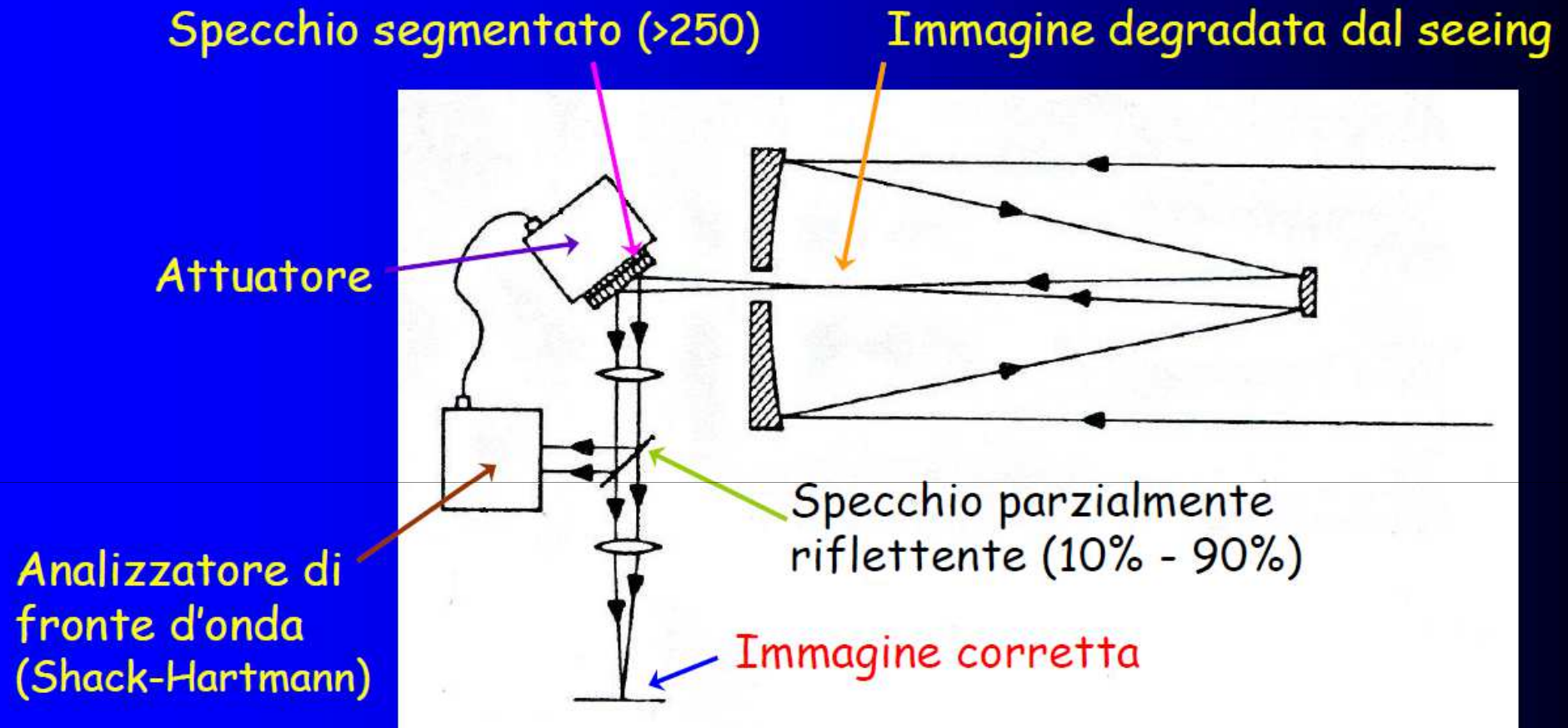


Il fronte d'onda proveniente dalla sorgente viene distorto dalle turbolenze atmosferiche, la conoscenza della forma effettiva del fronte d'onda permetterebbe, tramite un sistema di specchi a deformazione controllabile, di recuperare una forma più simile a quella piana, precedente l'interazione con l'atmosfera, migliorando drasticamente la qualità dell'immagine.

Questa è l'idea che sta alla base del principio di funzionamento delle ottiche adattive, la cui implementazione richiede accorgimenti tecnici complessi e una o più sorgenti guida.

La tecnologia delle ottiche adattive si sta diffondendo e perfezionando sempre più, permettendo di ottenere risultati di notevole qualità.

# OTTICA ADATTIVA



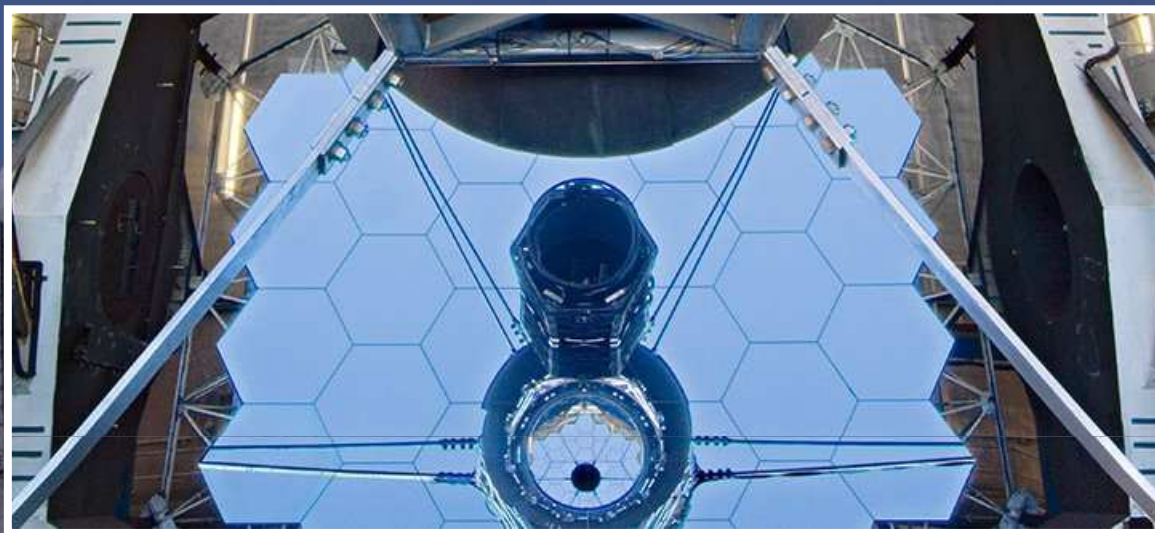
Corregge le distorsioni e consente di utilizzare i telescopi al loro limite di diffrazione.

L'analisi del fronte d'onda e le correzioni dello specchio segmentato devono avvenire entro 1 ms.

Si può creare una stella artificiale focalizzando un raggio laser a circa 90 km di altezza

# W. M. KECK OBSERVATORY

È costituito dai due telescopi riflettori gemelli situati a 4145 metri di altezza sulla sommità del vulcano Mauna Kea, nelle isole Hawaii.



I due telescopi sono di tipo Ritchey-Chrétien, con montatura altazimutale e sistemi di ottica attiva e adattiva. Lo specchio primario di ciascuno dei due telescopi è costituito da un insieme di specchi esagonali assemblati in modo da formare uno specchio equivalente ad uno di 10,2 m di diametro,

Sono i secondi telescopi ottici più grandi al mondo, dopo il Gran Telescopio Canarias.

I due strumenti operano in modalità singola ma anche insieme, formando un interferometro lungo 85 metri.



# GRAN TELESCOPIO CANARIAS

GTC è un telescopio riflettore con uno specchio primario di 10,4 metri posto sull'isola di La Palma, nelle Canarie, alla quota di 2267 metri.

E' stato inaugurato ufficialmente il 16 luglio 2007. Lo specchio primario è composto da 36 segmenti esagonali gestiti interamente da un sistema di ottica attiva.

Il progetto GTC, nato nel 1994, è una cooperazione formata da numerose istituzioni di Spagna (90%), Messico (5%) e l'Università della Florida (5%).



# TELESCOPIO NAZIONALE GALILEO

Il TNG è un telescopio di 3,58 metri di diametro situato sulla sommità dell'isola de La Palma alle Isole Canarie ed è il più importante strumento ottico della comunità astronomica italiana.

Dal 2005 la "Fundación Galileo Galilei, Fundación Canaria" (FGG) gestisce il telescopio per conto dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF).





# VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

È un sistema di quattro telescopi ottici separati, affiancati da vari strumenti minori. Ognuno dei quattro strumenti principali è un telescopio riflettore con uno specchio primario di 8,2 metri.

Il progetto VLT fa parte dell'European Southern Observatory (ESO).

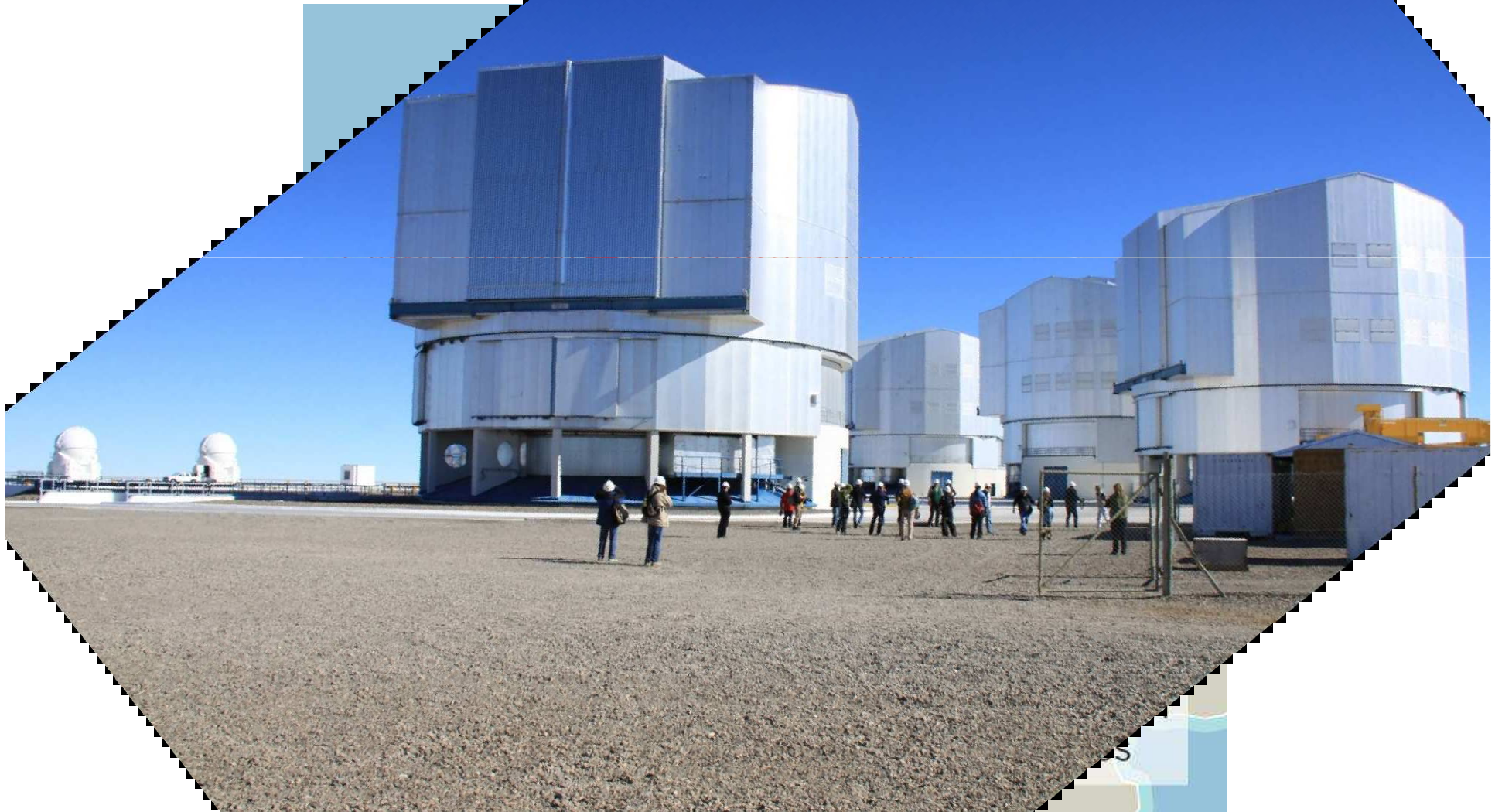




# VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

Si trova sul Cerro Paranal, una montagna di 2690 metri di altezza, nel Cile settentrionale.

Il primo dei quattro telescopi

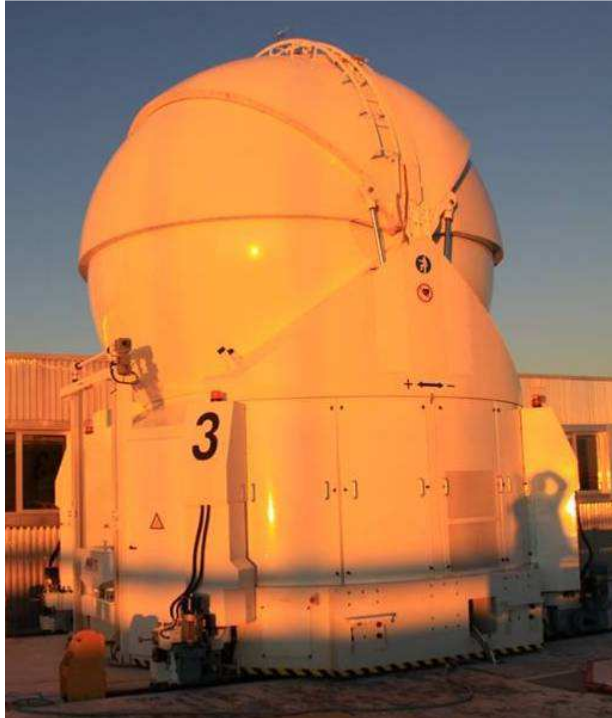


# VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

I telescopi sono stati chiamati con i nomi di alcuni oggetti astronomici nella lingua Mapuche locale: Antu (il Sole), Kueyen (la Luna), Melipal (la Croce del Sud), e Yepun (Venere).

Il VLT può operare in tre modi:

- come quattro telescopi indipendenti
- come un unico strumento non-coerente
- come un unico strumento coerente in modo interferometrico (VLTI).





# VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

Gli specchi principali sono spessi solo 18 cm e la loro forma è controllata da 150 pistoncini che la aggiustano ogni volta che il telescopio viene mosso.





# VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

Per eliminare l'aberrazione introdotta dall'atmosfera sopra il Cerro Paranal, viene utilizzato anche un sistema di ottica adattiva con uno specchio che aggiusta l'immagine 100 volte al secondo.



# VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

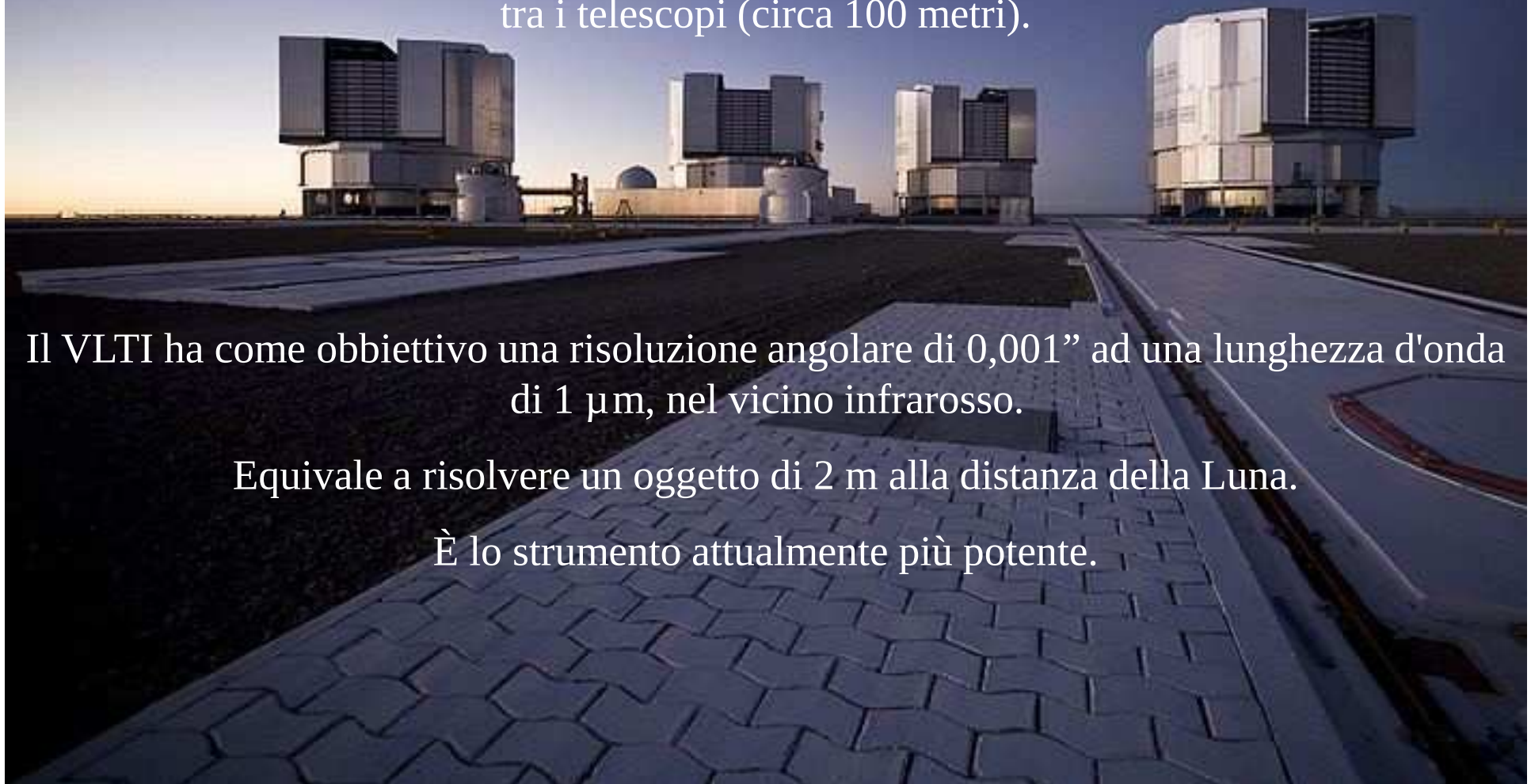
In modalità interferometrica (VLTI), la luce raccolta viene inviata in un laboratorio e fusa insieme. In questo modo i quattro telescopi forniscono la stessa capacità di raccolta di luce di un singolo specchio di 16 metri di diametro.

La risoluzione è equivalente ad uno specchio che abbia un diametro pari alla distanza tra i telescopi (circa 100 metri).

Il VLTI ha come obiettivo una risoluzione angolare di  $0,001''$  ad una lunghezza d'onda di  $1\text{ }\mu\text{m}$ , nel vicino infrarosso.

Equivale a risolvere un oggetto di 2 m alla distanza della Luna.

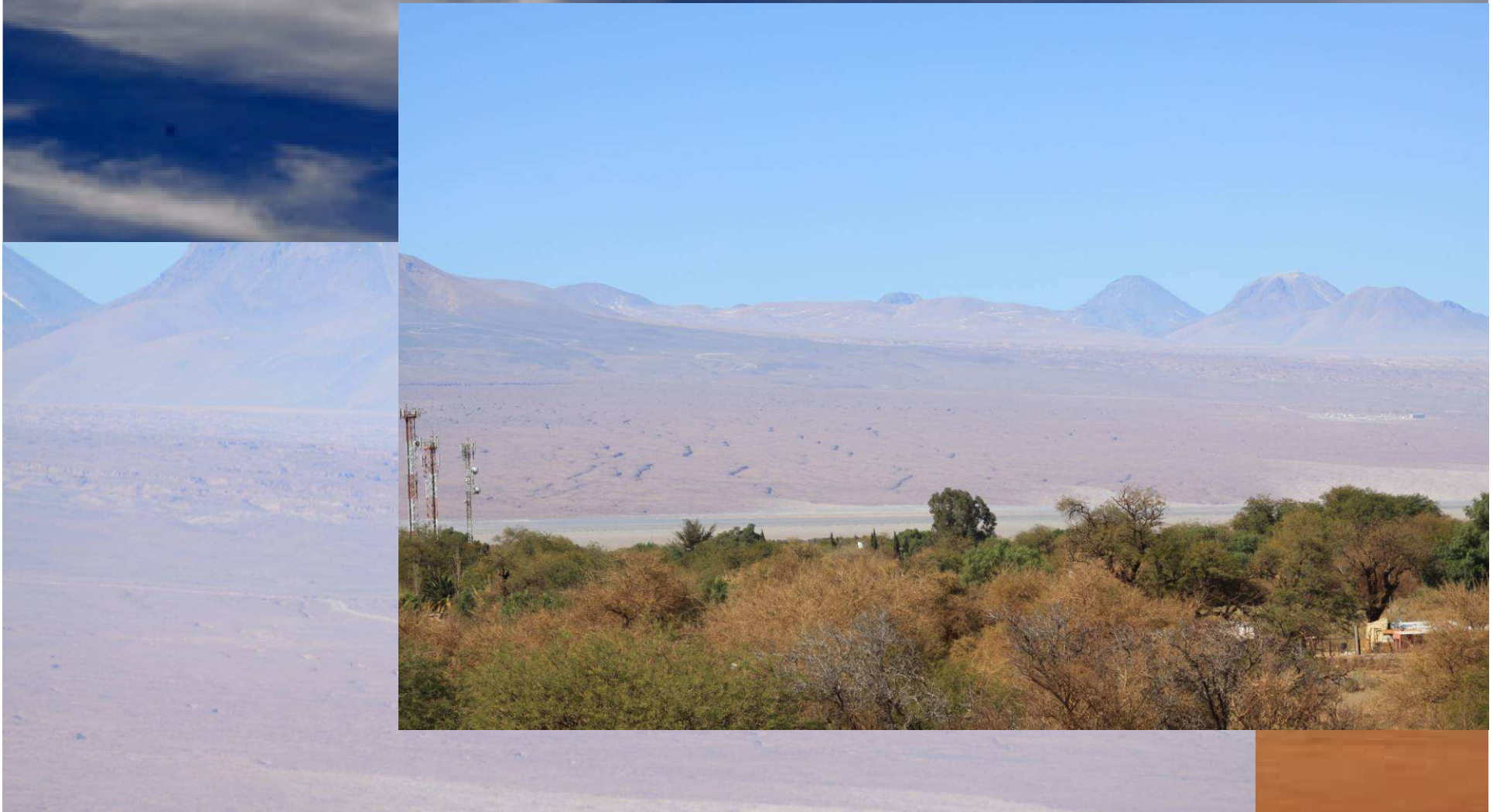
È lo strumento attualmente più potente.





# ATACAMA LARGE MILLIMETER ARREY

ALMA è una rete di antenne di 12m per l'osservazione di onde millimetriche e submillimetriche in costruzione presso San Pietro di Atacama.





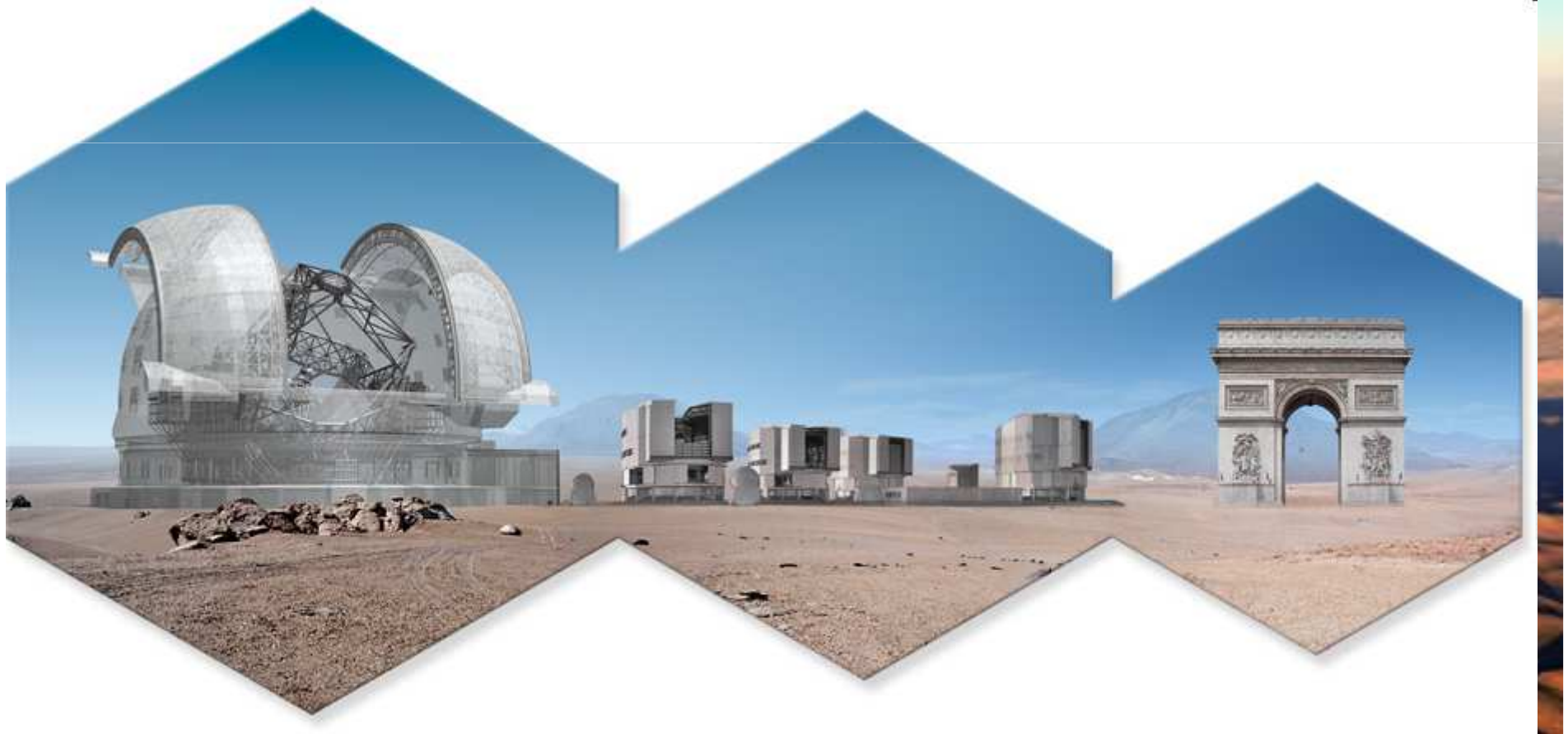
# TELESCOPI > 8 m

| Nome                                    | Diametro       | Tipo di specchio | Nazionalità                                          | Osservatorio                                           | Anno di costruzione |
|-----------------------------------------|----------------|------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|
| Large Binocular Telescope (LBT)         | 2×8,4 = 11,8 m | 2 singoli        | USA, Italia, Germania                                | Osservatorio internazionale del monte Graham, Arizona  | 2007                |
| Gran Telescopio Canarias (GTC)          | 10,4 m         | Mosaico          | Spagna, Messico, USA                                 | Osservatorio del Roque de Los Muchachos, Isole Canarie | 2006                |
| Keck 1                                  | 10 m           | Mosaico          | USA                                                  | Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii                      | 1993                |
| Keck 2                                  | 10 m           | Mosaico          | USA                                                  | Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii                      | 1996                |
| Southern African Large Telescope (SALT) | 9,5 m          | Mosaico          | Sudafrica, USA, UK, Germania, Polonia, Nuova Zelanda | Osservatorio Astronomico del Sudafrica, Sudafrica      | 2005                |
| Hobby-Eberly Telescope (HET)            | 9,2 m          | Mosaico          | USA, Germania                                        | Osservatorio McDonald, Texas                           | 1997                |
| Subaru (NLT)                            | 8,3 m          | Singolo          | Giappone                                             | Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii                      | 1999                |
| VLT 1 (Antu)                            | 8,2 m          | Singolo          | Paesi ESO + Cile                                     | Osservatorio del Paranal, Cile                         | 1998                |
| VLT 2 (Kueyen)                          | 8,2 m          | Singolo          | Paesi ESO + Cile                                     | Osservatorio del Paranal, Cile                         | 1999                |
| VLT 3 (Melipal)                         | 8,2 m          | Singolo          | Paesi ESO + Cile                                     | Osservatorio del Paranal, Cile                         | 2000                |
| VLT 4 (Yepun)                           | 8,2 m          | Singolo          | Paesi ESO + Cile                                     | Osservatorio del Paranal, Cile                         | 2001                |
| Gemini North                            | 8,1 m          | Singolo          | USA, UK, Canada, Cile, Australia, Argentina, Brasile | Osservatorio di Mauna Kea, Hawaii                      | 1999                |
| Gemini South                            | 8,1 m          | Singolo          | USA, UK, Canada, Cile, Australia, Argentina, Brasile | Cerro Pachón, Cile                                     | 2001                |

# EUROPEAN – EXTREMELY LARGE TELESCOPE

Il 26 aprile 2010 l'ESO ha annunciato che verrà costruito in Cile, sul Cerro Armazones, nella Regione di Antofagasta, un telescopio da 39 m (798 specchi esagonali da 1.4 m)

Si stima in circa 800 M€ il costo di realizzazione; il completamento è previsto per il 2017 (???)

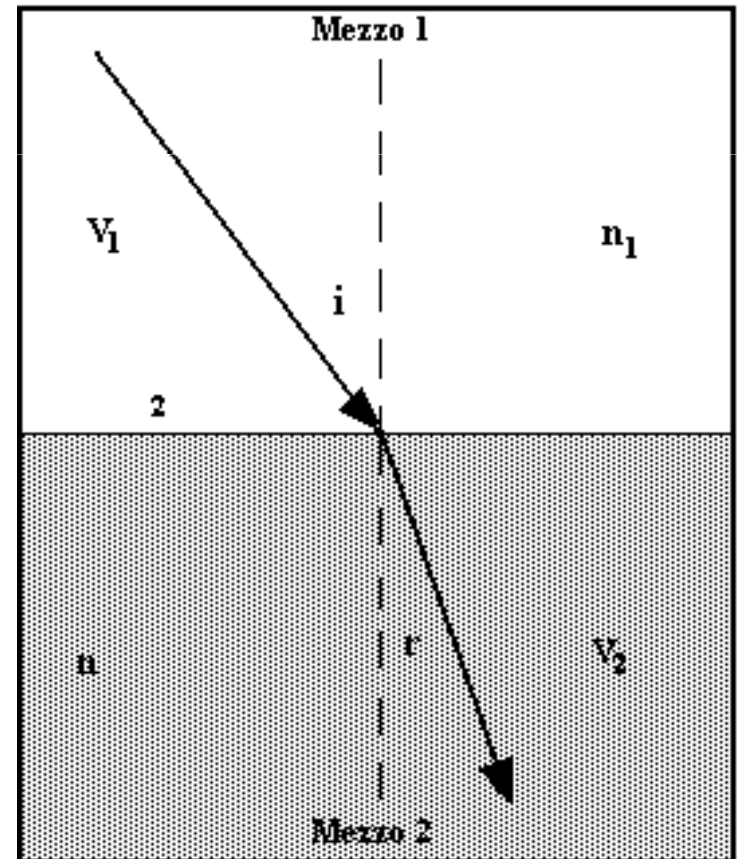


# Rifrazione atmosferica

Il fenomeno della rifrazione ha influenza sull'osservazione da terra degli oggetti celesti a causa della presenza dell'atmosfera terrestre che, oltre ad assorbire la radiazione, ne devia la traiettoria.

Le leggi della rifrazione impongono che i raggi incidente e rifratto giacciono nello stesso piano e che tra gli angoli di incidenza e di rifrazione sussista la relazione

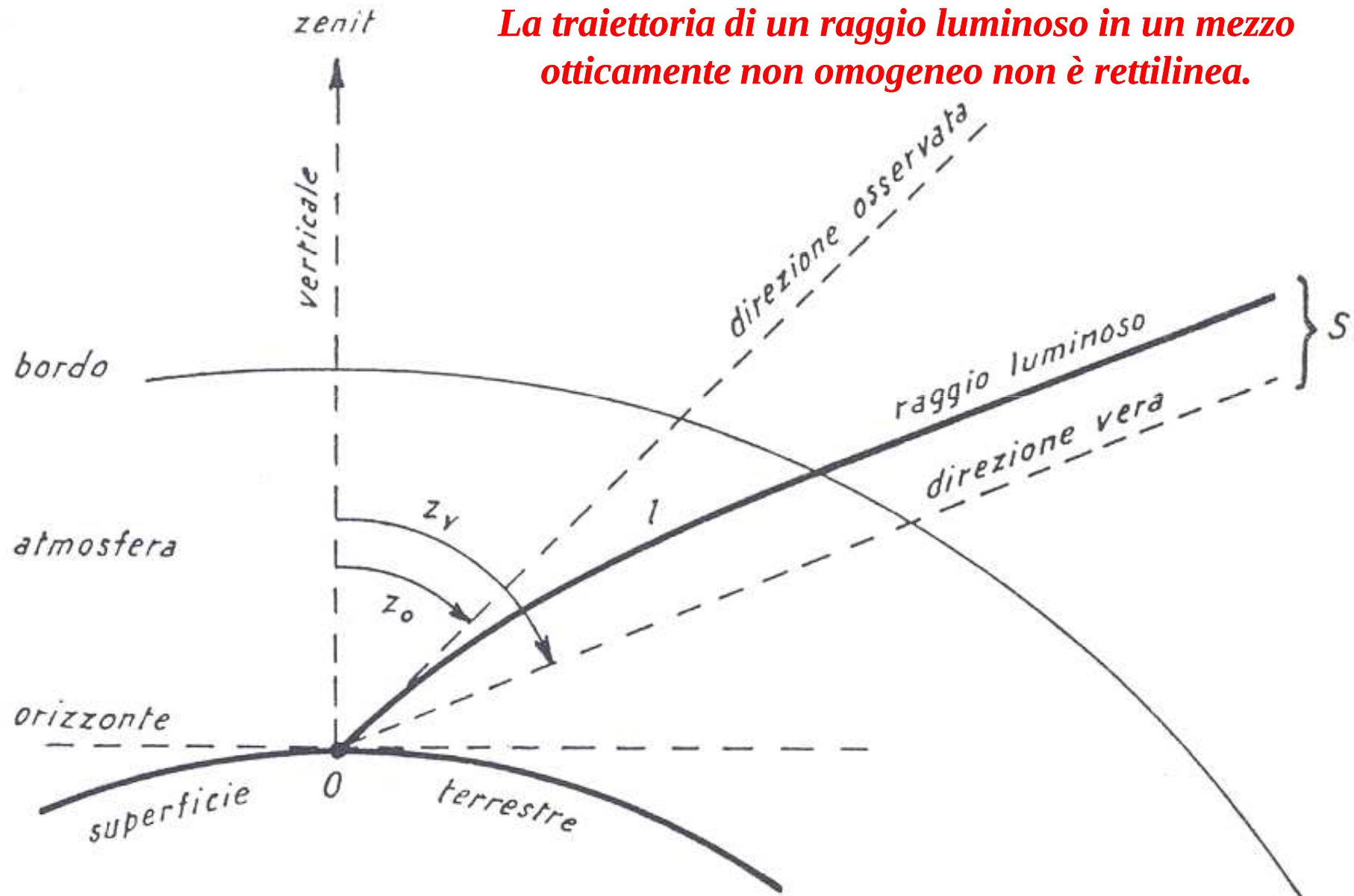
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{1,2}$$



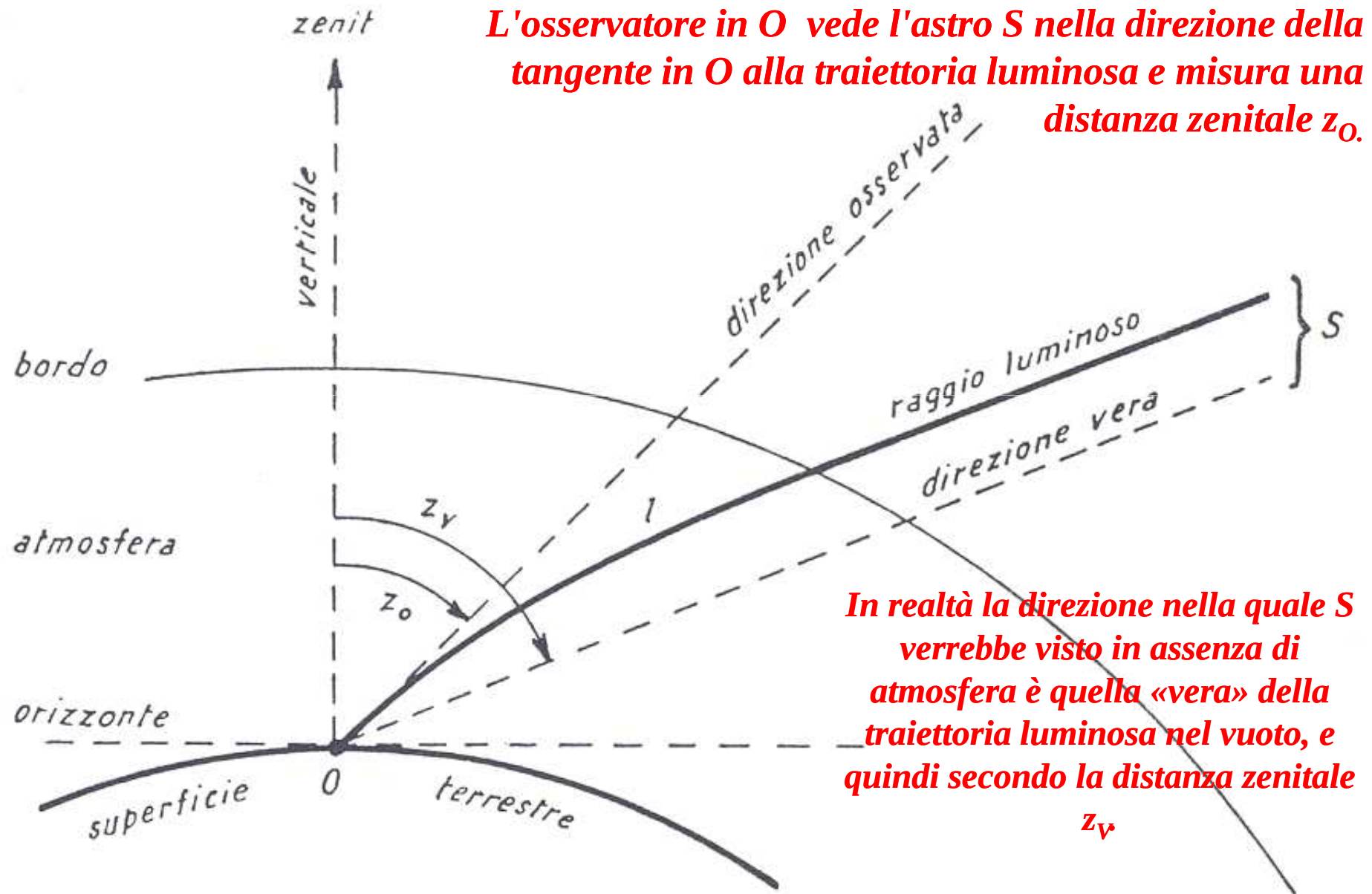


# Rifrazione atmosferica

*La traiettoria di un raggio luminoso in un mezzo otticamente non omogeneo non è rettilinea.*



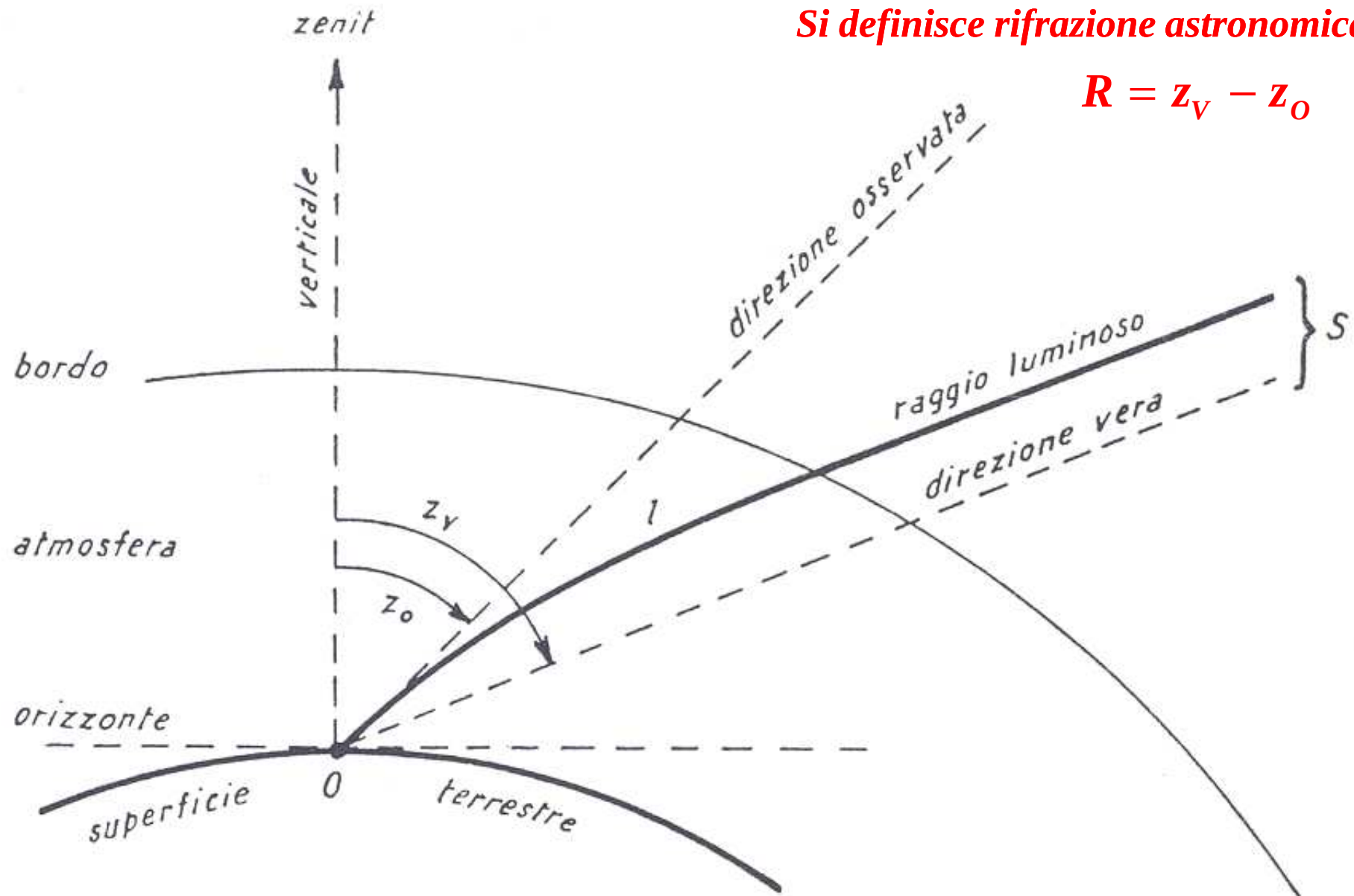
# Rifrazione atmosferica



# Rifrazione atmosferica

*Si definisce rifrazione astronomica*

$$R = z_v - z_o$$





# Rifrazione atmosferica

$R$  dipende dalle condizioni dell'atmosfera terrestre (estensione, costituzione, ecc.) e dall'inclinazione dei raggi luminosi.

$R = 0$  per gli astri allo zenit, poiché i raggi luminosi attraversano perpendicolarmente gli strati atmosferici.

Non tratteremo la teoria generale, valida per qualunque distanza zenitale, perchè alquanto complicata e poco utile perché di norma le osservazioni vengono fatte per distanze zenitali piccole.

# Rifrazione atmosferica

Data la forma quasi sferica della Terra e la limitata estensione dell'atmosfera terrestre possono essere introdotte le seguenti ipotesi semplificatrici:

**la costituzione dell'atmosfera ha una simmetria sferica,**

**la densità è una funzione continua del raggio.**

Ciò comporta che per la rifrazione un astro risulta spostato solo in altezza e non in azimut.

Poiché l'indice di rifrazione è una funzione decrescente della distanza degli strati atmosferici dal suolo, la traiettoria luminosa è una curva con la concavità rivolta verso il basso.

# Traiettoria di un raggio di luminoso

La rifrazione:

*alza apparentemente gli astri sull'orizzonte (tanto più quanto maggiore è la loro distanza zenitale)  
deforma i dischi apparenti del Sole e della Luna.*

La rifrazione è massima sull'orizzonte e raggiunge 35' circa.

Il Sole e la Luna appaiono sorgere prima e tramontare dopo rispetto al verificarsi degli stessi due eventi in ideali condizioni di assenza di atmosfera.





# Rifrazione atmosferica

Poiché la rifrazione altera l'altezza degli oggetti celesti sull'orizzonte, le coordinate celesti dedotte dalle osservazioni devono essere corrette e, viceversa, la posizione osservata di un astro sulla sfera celeste non può coincidere con quella corrispondente alle coordinate celesti «vere» dell'astro.

Nelle eclissi totali di Luna la luce solare radente la superficie terrestre viene deviata per effetto della rifrazione atmosferica cosicché il cono di oscuramento completo prodotto dalla presenza della Terra viene accorciato e si estende fino a circa  $40 R_T$  ( $R_T = 6371 \text{ km}$ ) soltanto.

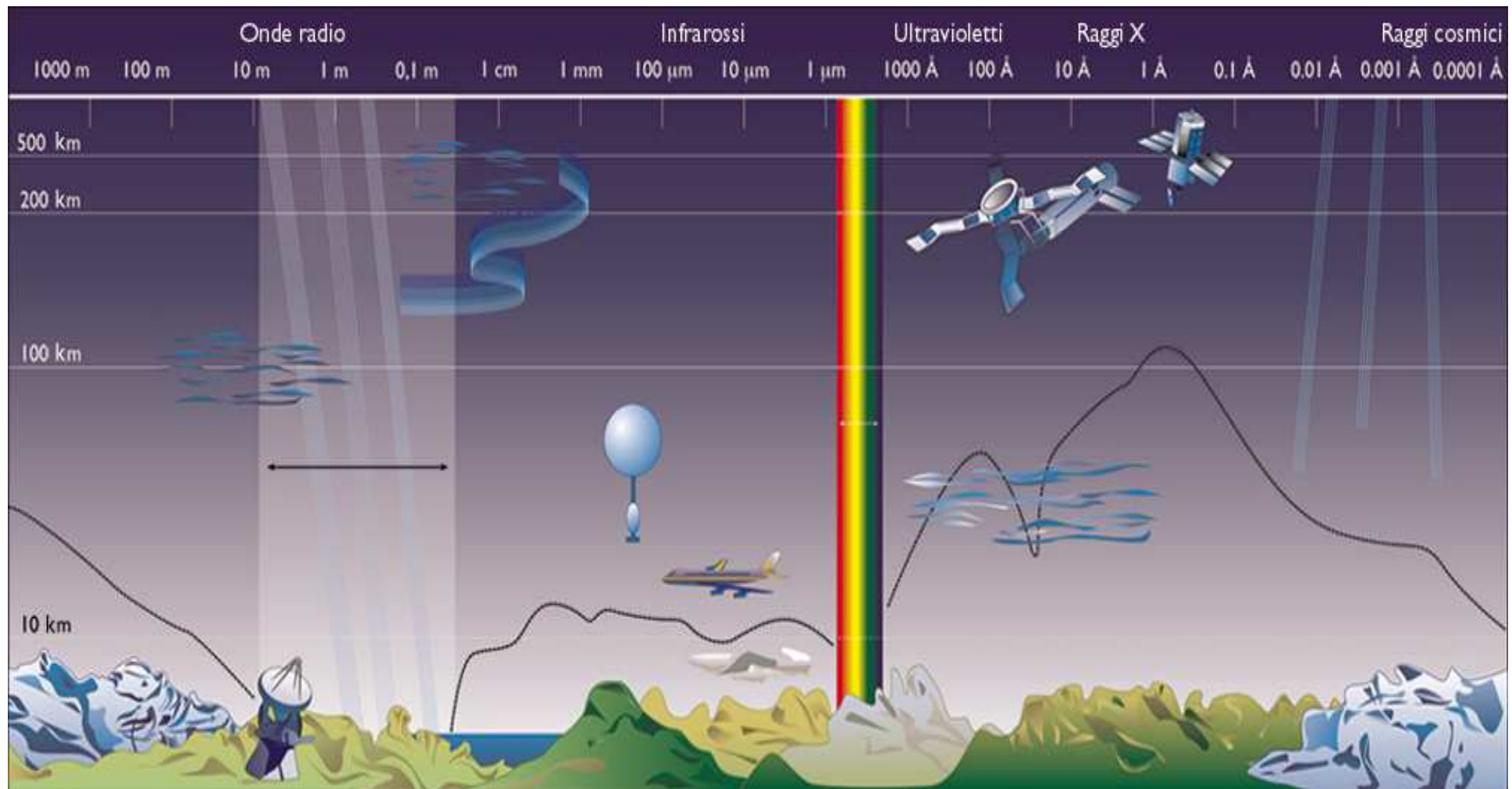
La Luna, che dista dalla Terra in media circa  $60 R_T$  risulta quindi debolmente illuminata dalla luce solare di maggiori lunghezze d'onda, che sono quelle meno deviate e meno assorbite dall'atmosfera terrestre.



# Estinzione, scintillazione, seeing

L'atmosfera terrestre diffonde e assorbe le radiazioni elettromagnetiche in modo più o meno completo a seconda della lunghezza d'onda della radiazione incidente.

L'atmosfera è trasparente tra 300 nm e 1000 nm circa e nelle onde radio da 5 mm a 50 m circa.



# Estinzione, scintillazione, seeing

Per correggere le osservazioni si deve tener conto della diffusione e dell'assorbimento atmosferico .

Ciò viene conseguito valutando, alle varie distanze zenitali osservate, l'estinzione media in funzione della corrispondente massa di aria attraversata dalla luce ed espressa in unità della massa di aria attraversata allo zenit (**riduzione allo zenit**).

Per effetto di fluttuazioni spaziali e temporali nelle proprietà strutturali dell'atmosfera terrestre, in genere causate da moti turbolenti e di insieme dell'aria, l'indice di rifrazione risulta variabile ed i raggi luminosi provenienti da una stella vengono assorbiti e deviati in diversa misura in istanti diversi.

Ciò determina il fenomeno della **scintillazione** nel quale possono distinguersi tre aspetti:

**scintillazione dinamica;**  
**scintillazione cromatica;**  
**scintillazione parallattica.**



# Estinzione, scintillazione, seeing

La **scintillazione dinamica** provoca variazioni dell'intensità luminosa; la **scintillazione cromatica** dà luogo ad un cambiamento di colore della sorgente luminosa; la **scintillazione parallattica** causa una variazione (dell'ordine di 1") della posizione apparente dell'oggetto osservato.

In conseguenza dei tre effetti l'oggetto osservato appare tremolare e mutare di splendore e di colore.

Oggi la qualità delle immagini viene indicata con il nome di **seeing** (dall'inglese «vedere») convenendo di designare così tutto quell'insieme di fenomeni che hanno rilevanza nell'osservazione degli oggetti celesti.

Il seeing è determinato dagli strati più bassi (e più densi) dell'atmosfera.

# Estinzione, scintillazione, seeing

Per comprendere l'effetto del seeing è utile prendere in considerazione, come esempio, un caso ideale.

Assumiamo che la sorgente osservata sia puntiforme e che le ottiche del rivelatore non incidano sulla qualità dell'immagine.

In assenza di atmosfera il rivelatore osserverebbe la sorgente puntiforme; mentre in presenza di una massa d'aria, l'immagine della sorgente risulterebbe avere un'estensione superficiale con una densità di fotoni che decrescerebbe dal centro dell'immagine della sorgente verso l'esterno.

# Estinzione, scintillazione, seeing

Per comprendere questo effetto di sparpagliamento dei fotoni dobbiamo pensare che un rivelatore, come un telescopio, ottiene l'immagine di un oggetto attraverso esposizioni più o meno lunghe, che gli permettono di accumulare la luce proveniente dalla sorgente.

Durante la posa le condizioni degli strati del cono di atmosfera che si trova tra la sorgente puntiforme e la superficie del rivelatore cambiano di frequente. Tali variazioni corrispondono ad un cambiamento dell'indice di rifrazione, che influisce sulla traiettoria dei raggi di luce e quindi sui punti della superficie del rivelatore dove i raggi incideranno.

Ai fini pratici, la turbolenza atmosferica ha l'effetto di spostare rapidamente (dell'ordine dei millisecondi) l'immagine della sorgente sul rivelatore. Quanto l'immagine venga spostata dipende dalla turbolenza: più gli strati di atmosfera saranno turbolenti maggiore sarà lo spostamento.



# Estinzione, scintillazione, seeing



L'immagine mostra cosa si vede con un telescopio quando si osserva una stella a grandi ingrandimenti (immagine in negativo).

Il telescopio impiegato ha un diametro di  $7r_0$ .

Da notare come la stella paia frantumarsi in molti punti (noti come speckle [macchioline]), è un effetto della nostra atmosfera.

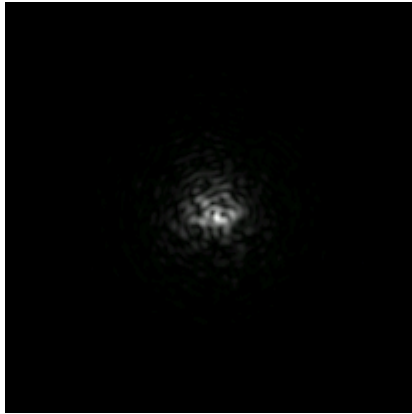
Le varie tecniche appartenenti allo speckle imaging cercano di ricreare l'immagine dell'oggetto così come era prima di essere disturbata dall'atmosfera.

# Estinzione, scintillazione, seeing

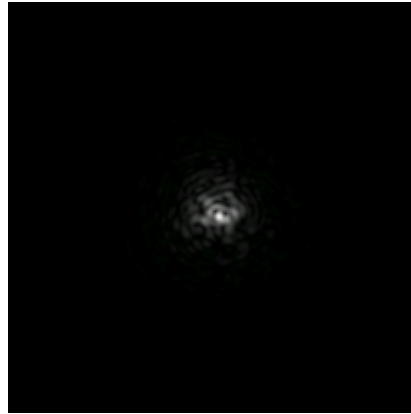
Scala di Antoniadi:

|                   |                                                                  |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>SEEING I</b>   | La visibilità è perfetta, l'immagine è stabile e non trema.      |
| <b>SEEING II</b>  | Buona visibilità, i tremolii si alternano con momenti di calma.  |
| <b>SEEING III</b> | Visione mediocre, si percepiscono lunghi tremolii dell'immagine. |
| <b>SEEING IV</b>  | Visibilità scarsa, l'immagine trema a lungo.                     |
| <b>SEEING V</b>   | Visibilità pessima, le vibrazioni sono continue e non cessano.   |

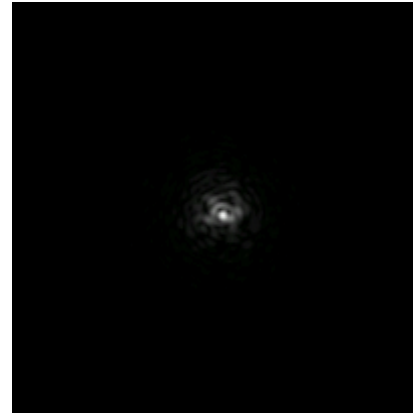
# ScalaPickering



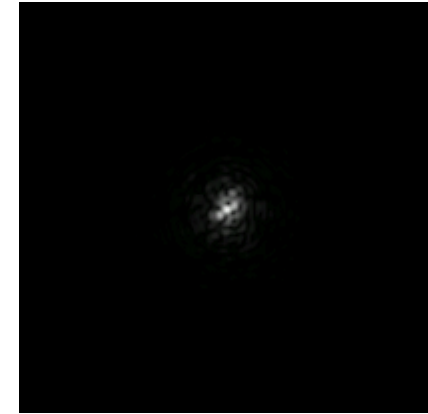
1



2

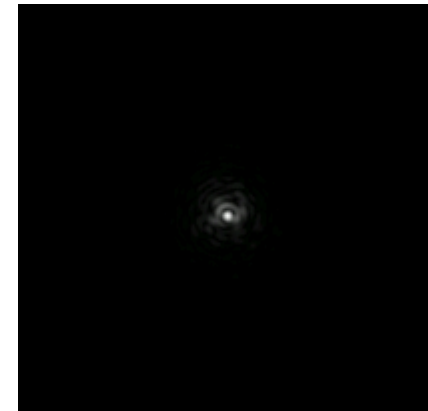


3



4

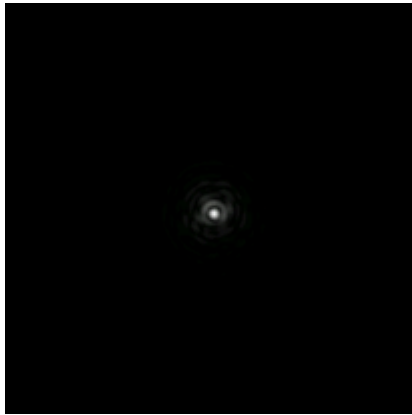
|   |                                                                                                                                 |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Immagine pessima: l'immagine della stella è 2 volte il diametro del 3° anello di diffrazione.                                   |
| 2 | Immagine molto cattiva: L'immagine della stella occasionalmente è 2 volte il diametro del terzo anello.                         |
| 3 | Immagine cattiva: l'immagine della stella ha circa lo stesso diametro del terzo anello di diffrazione; è più luminosa al centro |
| 4 | Immagine appena sufficiente: disco di Airy spesso visibile archi degli anelli di diffrazione qualche volta visibili             |
| 5 | Immagine discreta: visibile il disco di Airy e gli archi degli anelli con una certa continuità.                                 |



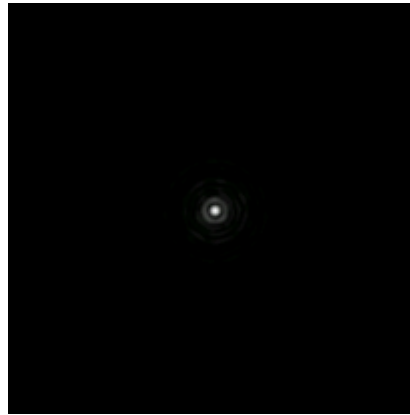
5



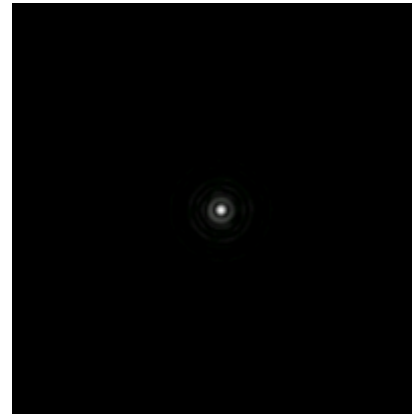
# ScalaPickering



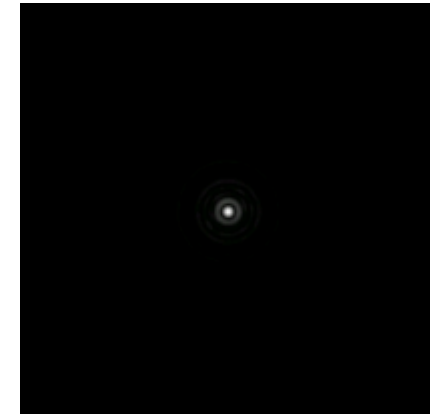
6



7

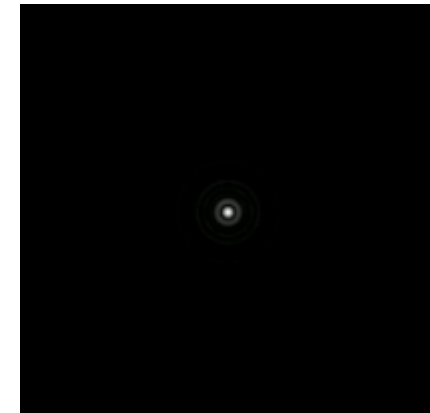


8



9

|    |                                                                                                                         |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6  | Immagine buona: il disco di Airy è sempre visibile e sono visibili costantemente piccoli archi                          |
| 7  | Immagine molto buona: disco qualche volta nettamente definito, si vedono gli anelli come lunghi archi o cerchi completi |
| 8  | Immagine ottima: disco sempre nettamente definito, anelli visibili come lunghi archi o cerchi completi, sempre in moto  |
| 9  | Immagine quasi perfetta: la parte interna della figura di diffrazione è stazionaria, la parte esterna occasionalmente   |
| 10 | Immagine perfetta: tutta la figura di diffrazione è ferma                                                               |



10

# CARATTERISTICHE DI UN TELESCOPIO

# Elementi principali di un telescopio

Gli elementi che caratterizzano un telescopio sono:

***OBIETTIVO***: lente o specchio che raccoglie la luce.

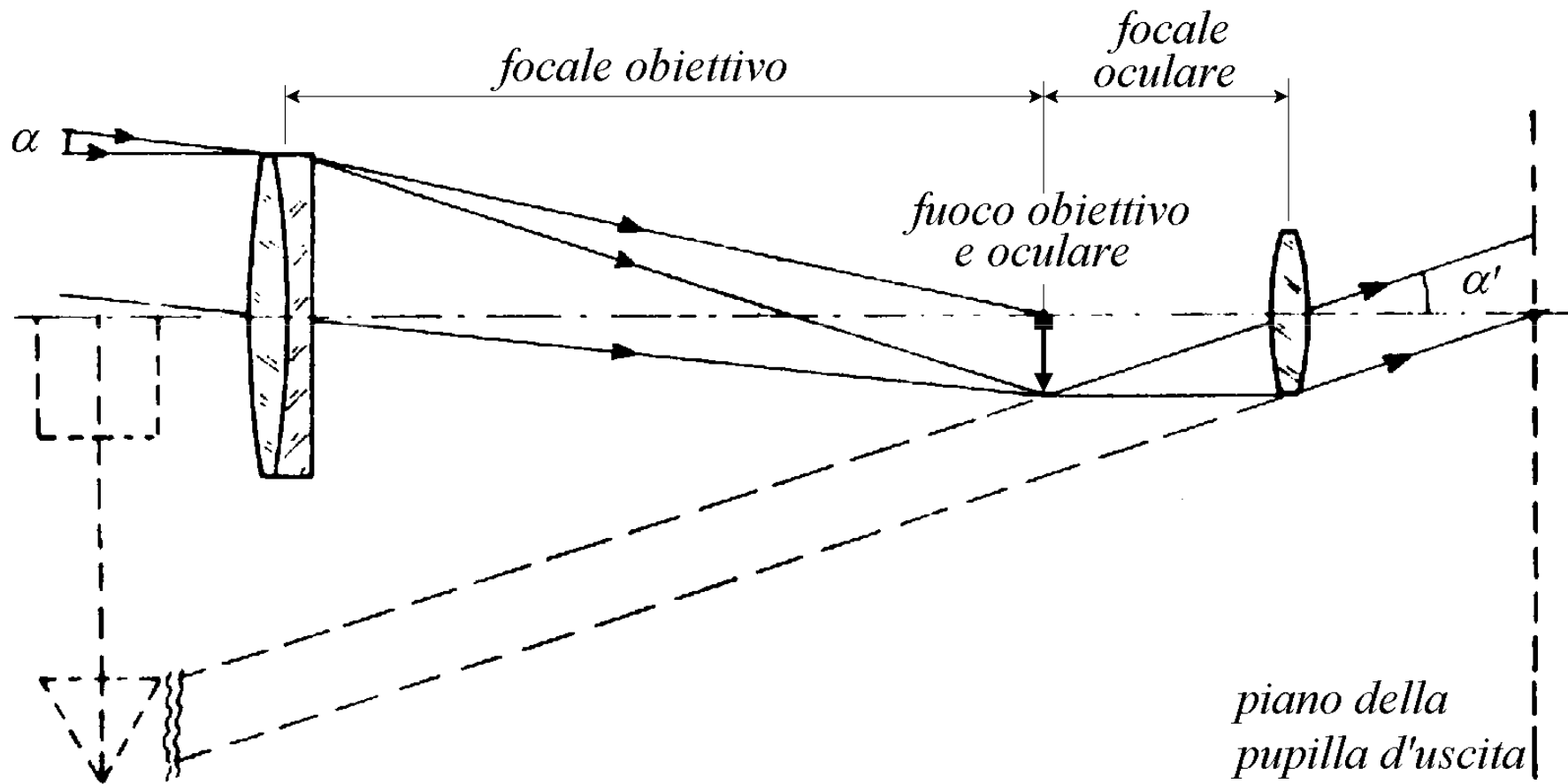
***RIVELATORE***: dispositivo permette l'acquisizione dell'immagine prodotta dall'obiettivo. Ci limiteremo a descrivere i ccd.

***MONTATURA***: apparato che sostiene la struttura che regge l'obiettivo e il/i rivelatore/i.

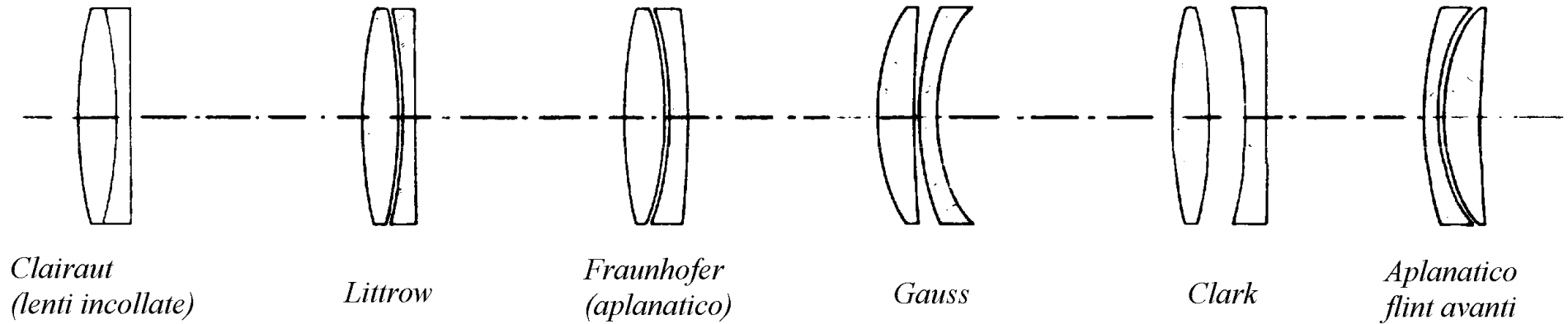


# OBIETTIVI E TIPI DI TELESCOPI

# Rifrattore



# Alcuni tipi di doppietti acromatici

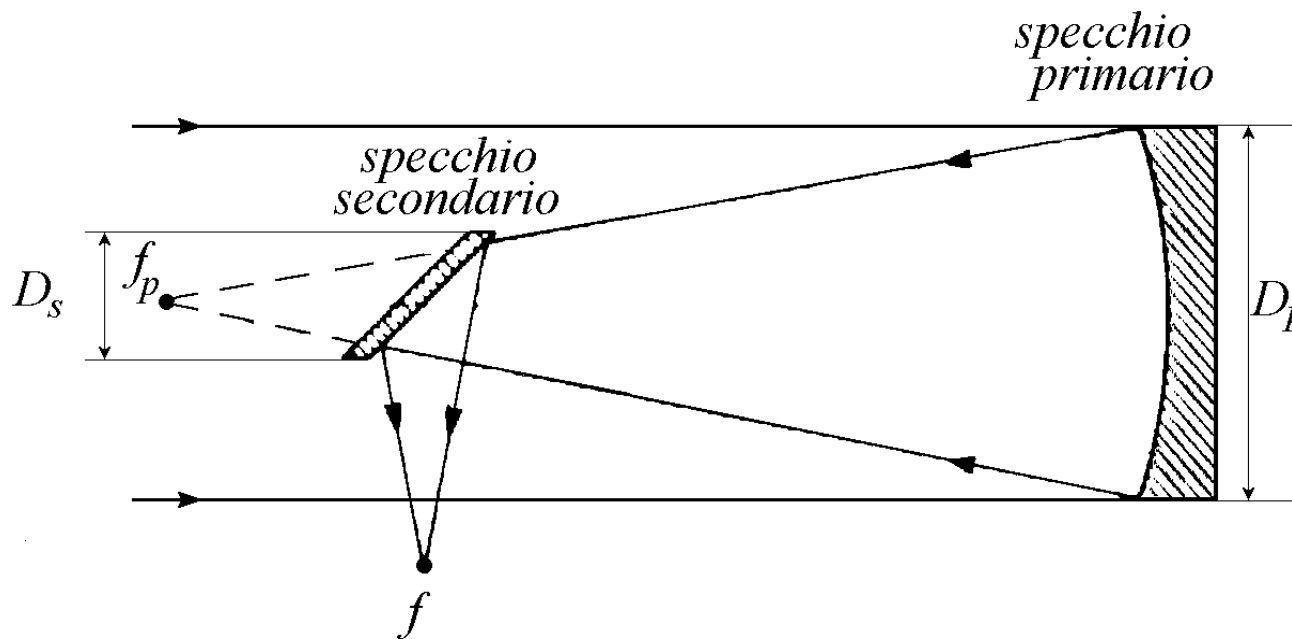




# Riflettori

I telescopi riflettori sono quei telescopi che hanno come obiettivo uno specchio.

Schema di telescopio Newton



$f$  = fuoco

$f_p$  = fuoco originale o  
primario

$D_s$  = Diametro  
secondario

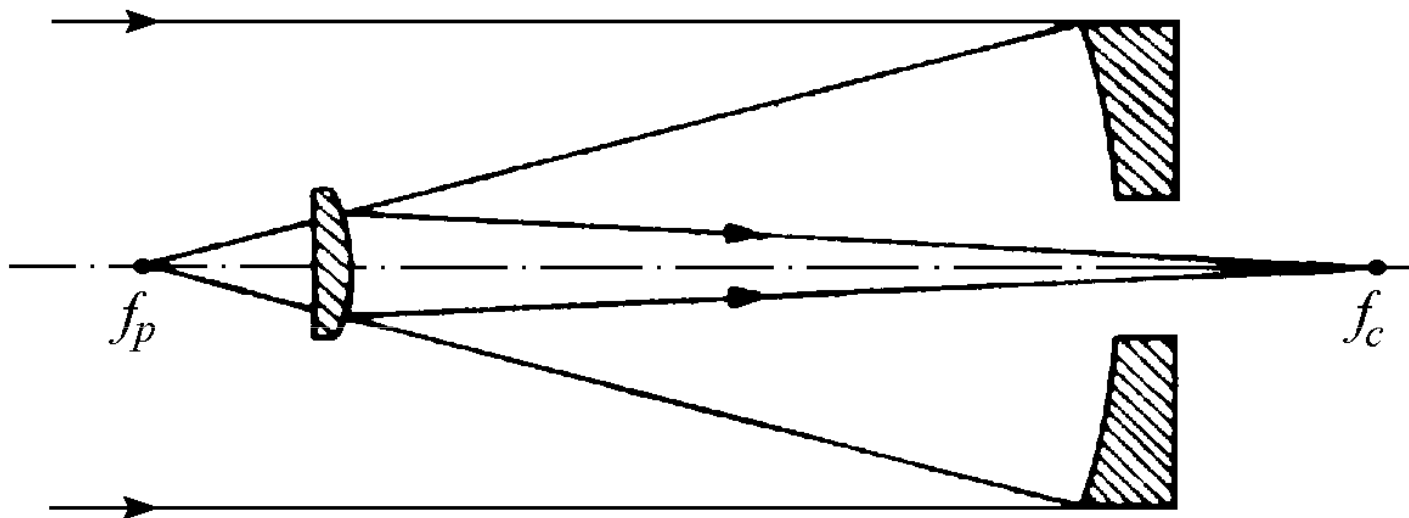
$D_p$  = Diametro primario

Lo specchio primario è  
parabolico, il secondario  
piano disposto a 45°.

$$0,20 \leq \frac{D_s}{D_p} \leq 0,35$$

# Riflettori

## Schema di configurazione Cassegrain



$f_p$  = fuoco primario

$f_c$  = fuoco Cassegrain

Lo specchio primario è parabolico, il secondario iperbolico.

Lunga focale.

Primario molto aperto ( $f/3$  -  $f/5$ ).

# Riflettori

La configurazione Ritchey-Chrétien è un'evoluzione dello schema Cassegrain capace di diminuire notevolmente gli effetti dell'aberrazione per gli oggetti fuori asse.

Fu inventata all'inizio del XX secolo dall'astronomo statunitense George Willis Ritchey e dall'astronomo francese Henri Chrétien.

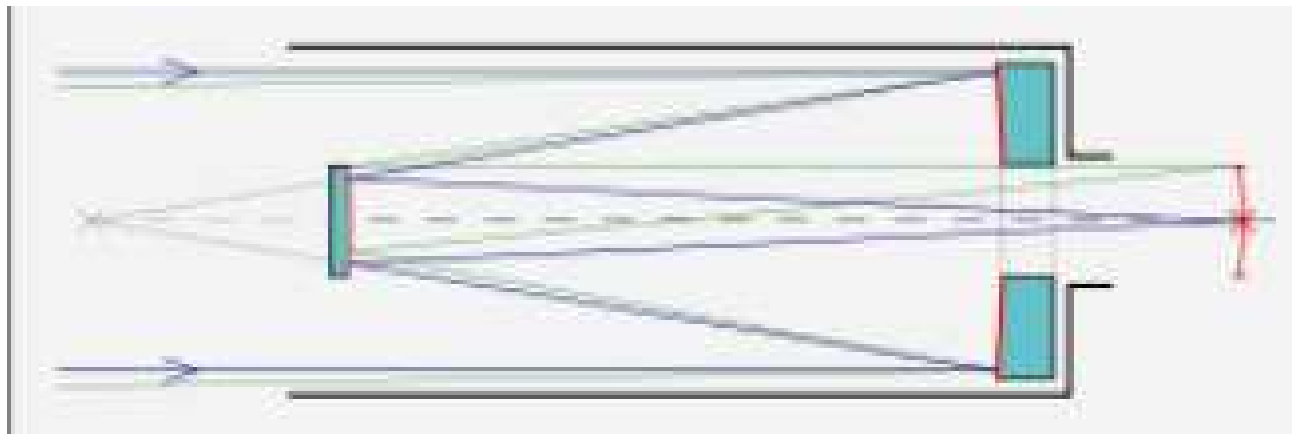
Il Ritchey-Chrétien è un telescopio di tipo aplanatico, esente cioè da aberrazioni sferiche e di coma.

È composto da due specchi con superfici particolari e otticamente non usuali.

Richiede una lente spianatrice di campo.

Con questa combinazione ottica sono stati costruiti grandi telescopi come il 150 cm di Loiano (Italia), il 4 metri di Siding Spring (Australia), il Kitt Peak Cerro Tololo (Cile), i due telescopi gemelli Keck da 10 metri (Hawaii).

Il vantaggio di questa architettura ottica è la grande compattezza, il tubo può infatti essere lungo fino alla metà della lunghezza focale.



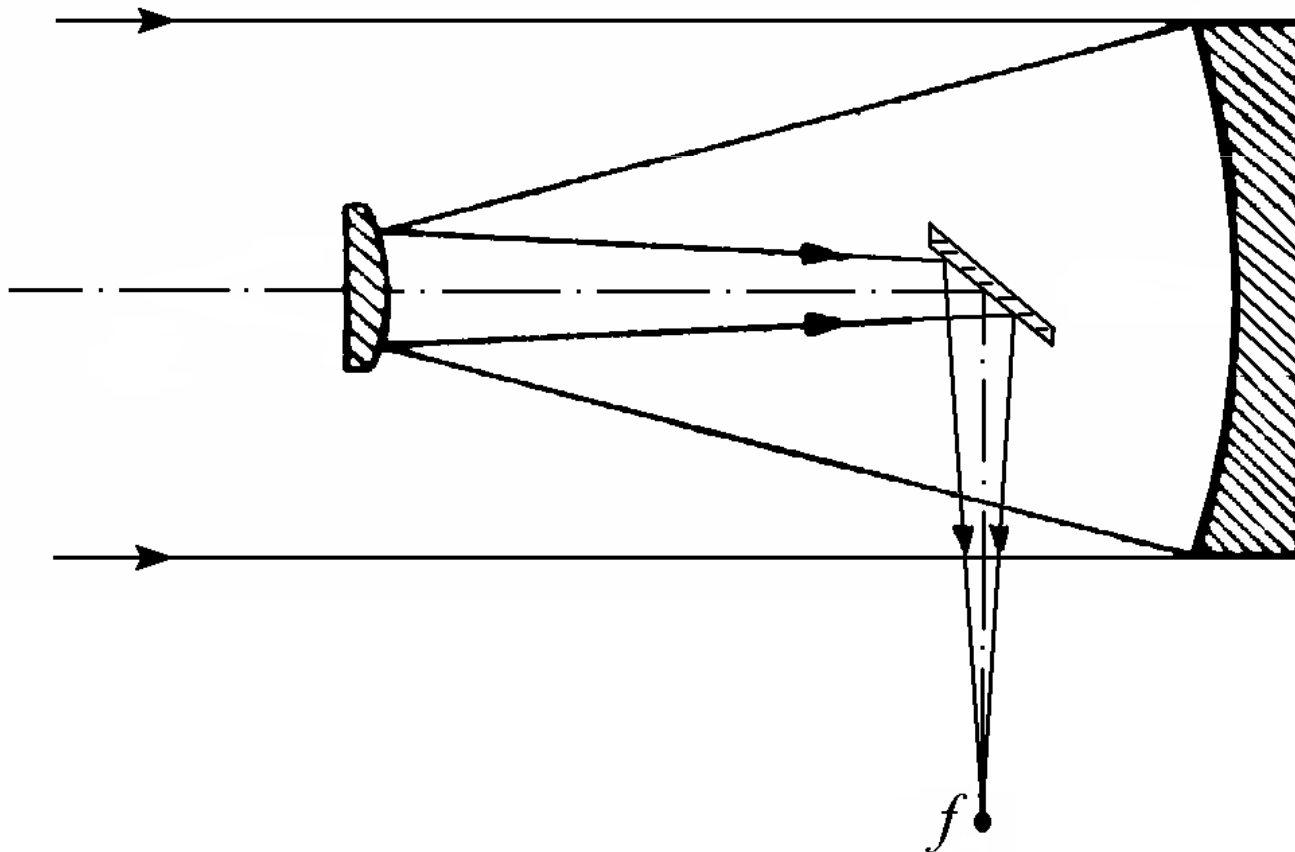


# Riflettori

Una variante del Cassegrain è la configurazione Nasmyth.

In questo caso alla classica configurazione Cassegrain si aggiunge un terzo specchio (piano), situato lungo l'asse di declinazione strumentale che estrae il fuoco all'interno dell'asse.

L'osservazione della sorgente avviene così all'estremità dell'asse di declinazione ove sono collocati gli strumenti di osservazione.

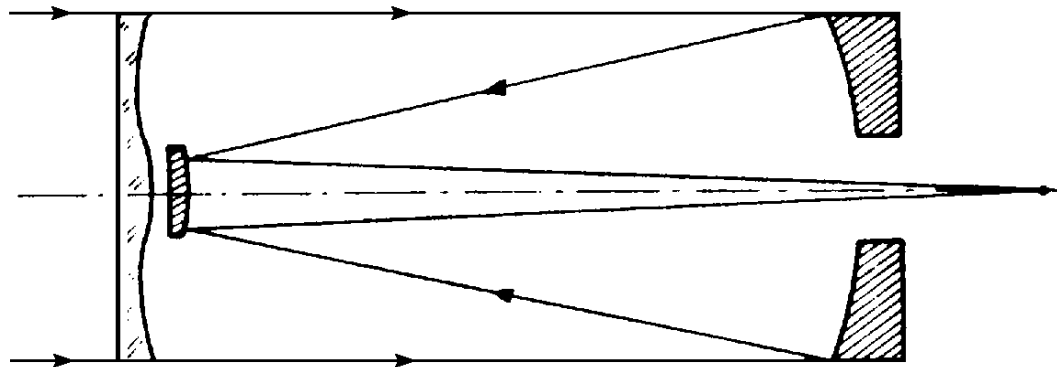


# Catadiottrici

I telescopi catadiottrici sono di tipo misto.

Sono presenti uno specchio primario e uno secondario (tipici della configurazione newtoniana, ma la luce prima di arrivare al primario passa attraverso una lastra correttiva).

Schema Schmidt-Cassegrain

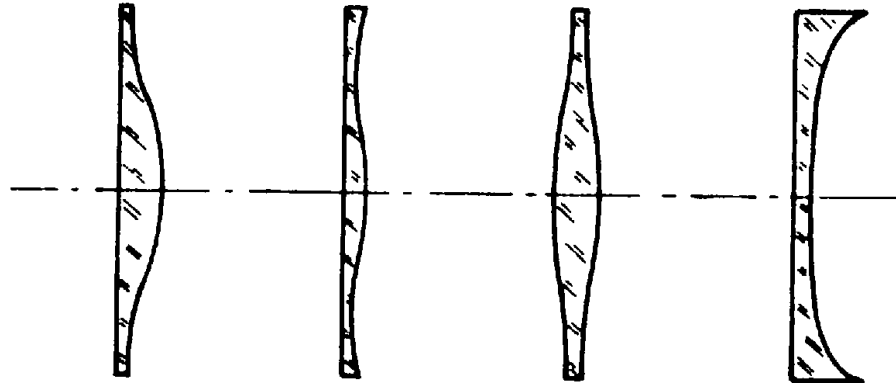


# Catadiottrici

Lo specchio primario è sferico e molto aperto ( $\sim f/2,5$ ), la lastra correttiva asferica è posta nel fuoco e il secondario è convesso.

Sono molto compatti.

Forme tipiche di lastre correttive per telescopi Schmidt



(le curvature sono esagerate)



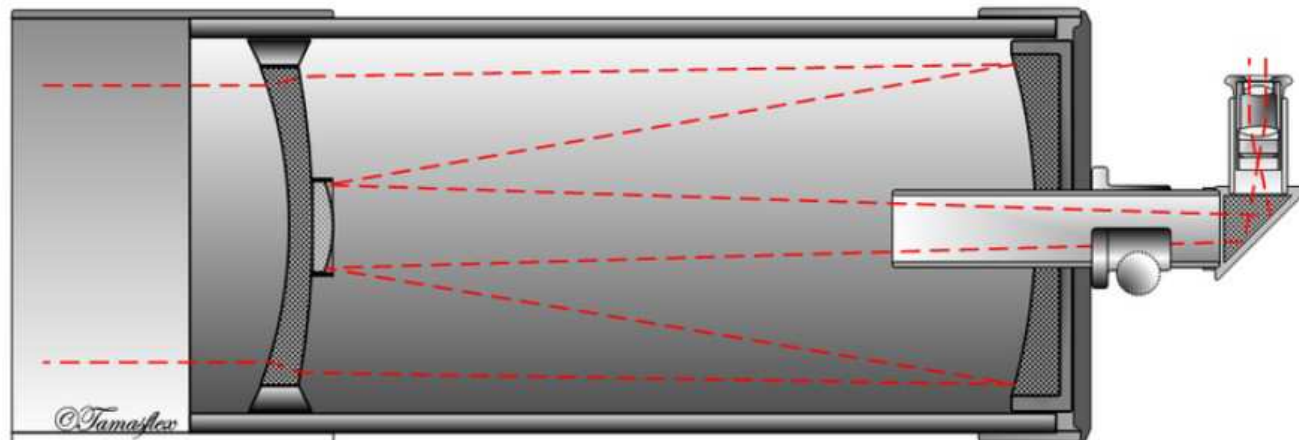
# Catadiottrici

Il Telescopio Maksutov-Cassegrain è un telescopio riflettore in cui tutte le superfici ottiche sono sferiche.

È necessaria la lastra correttrice che è costituita da un menisco con la concavità rivolta verso l'esterno.

Il russo Maksutov è stato il primo, anche se non il solo, a stabilirne la fattibilità nel 1941 mentre il primo esemplare realizzato con successo si deve all'americano John Gregory negli anni cinquanta.

La soluzione ideata da Gregory è quella che viene maggiormente utilizzata e consiste nel ricavare lo specchio secondario rendendo riflettente la parte centrale del menisco; per questo motivo tale telescopio è definito anche come Gregory-Maksutov.



# Caratteristiche di un obiettivo

Le caratteristiche principali di un telescopio sono:

**INGRANDIMENTO**: ha significato solo in casi particolari e non è una proprietà intrinseca dell'obiettivo; si caratterizza con altri parametri, primo di tutti la distanza focale.

**LUMINOSITA'** : è una caratteristica molto importante, esprime la capacità dello strumento di raccogliere la luce emessa dalla sorgente. Alla luminosità è connessa la possibilità di rivelare sorgenti più o meno deboli o lontane.

**RISOLUZIONE**: indica quanto lo strumento sia in grado di distinguere sorgenti molto vicine tra loro o piccoli particolari di una sorgente estesa. Essa dipende da numerosi fattori, non tutti legati al progetto del telescopio in senso stretto. Per fare buon uso dello strumento è indispensabile la conoscenza dei fattori che influenzano la risoluzione.

# Parametri geometrici di un obiettivo

Possiamo considerare tutti gli oggetti che si osservano a distanza infinita

ovvero

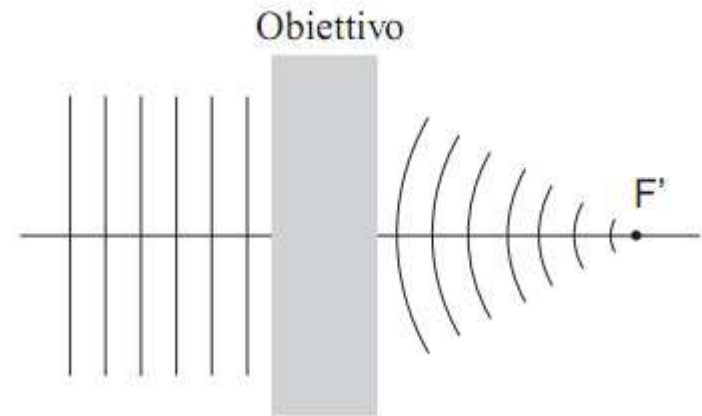
la radiazione che ci arriva ha perso la caratteristica di onda sferica centrata sulla sorgente e si presenta come un'onda piana.

ovvero

i raggi emessi dalla sorgente che arrivano al telescopio sono paralleli.

# Parametri geometrici di un obiettivo

L'**obiettivo** è un dispositivo che trasforma le onde piane in onde convergenti **il meglio possibile** (nessun obiettivo realizza completamente ciò) in un punto  $F'$  detto **fuoco** (più esattamente: **secondo fuoco**).



Il fuoco va pensato come il punto in cui si realizza la massima concentrazione di luce.

Questo fatto si esprime dicendo che l'obiettivo forma in  $F'$  un'**immagine reale** dell'oggetto (stella) considerato.

Un obiettivo può essere uno specchio (riflettore), oppure un sistema di una più lenti (rifrattore).

Nel seguito ci riferiremo quasi sempre a questo secondo caso, che permette figure più semplici; ma tutto quanto diremo vale anche per gli specchi.



# Parametri geometrici di un obiettivo

**Definizione:** un **sistema ottico centrato** è un mezzo (o una successione di mezzi) in cui l'indice di rifrazione presenta una simmetria cilindrica intorno a un asse, che si dice **asse ottico** del sistema.

Salvo rare eccezioni, un obiettivo è un sistema ottico centrato e avrà un asse ottico.

**Definizione:** il **diametro dell'obiettivo** è il diametro della sezione (circolare) del fascio di luce che da una sorgente posta sull'asse ottico (all'infinito) può entrare nell'obiettivo.

Il diametro dell'obiettivo è il diametro della **pupilla di entrata** del sistema.

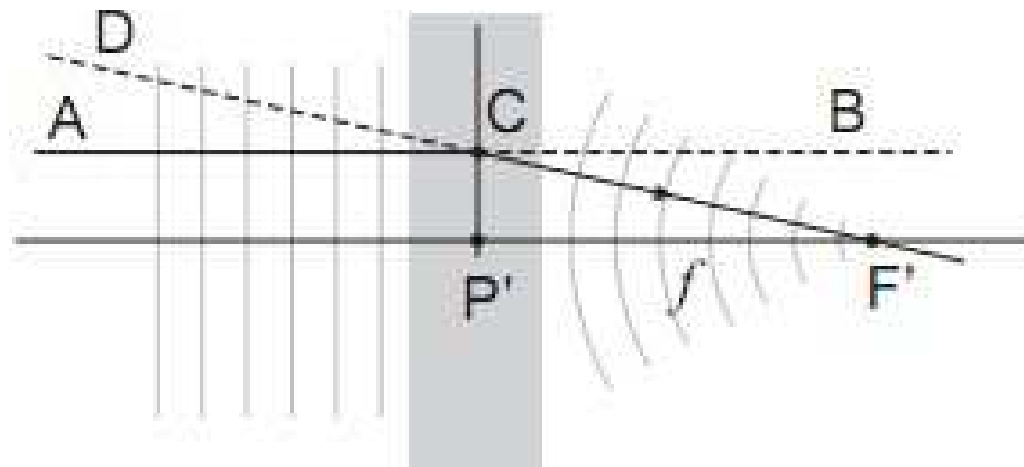
# Parametri geometrici di un obiettivo

**Definizione 1** di **distanza focale**: consideriamo un raggio incidente AB parallelo all'asse ottico e il raggio uscente oltre l'obiettivo, DF'. Sia C l'intersezione delle due rette AB e DF'.

Abbassata la perpendicolare da C all'asse ottico in P' si dirà distanza focale la lunghezza del segmento P'F'.

$$f = P'F'$$

P' si dice **secondo punto principale**

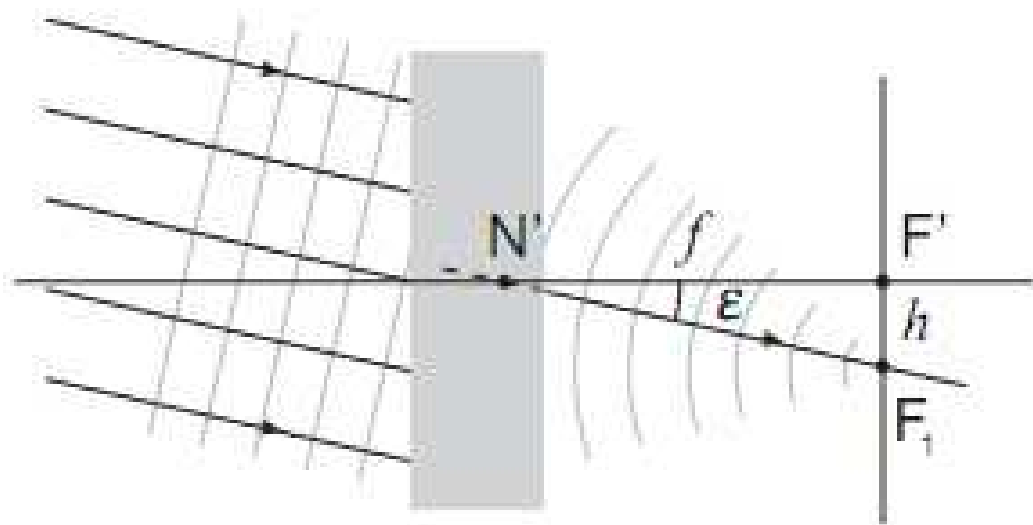


# Parametri geometrici di un obiettivo

**Definizione 2** di **distanza focale**: Si consideri una radiazione incidente con un (piccolo) angolo  $\varepsilon$  sull'asse ottico. L'obiettivo concentra la radiazione nel punto  $F_1$ . Si può dimostrare che  $F_1$  è sulla perpendicolare di  $F'$  e che la distanza  $F_1 F' = h$  è proporzionale in prima approssimazione all'angolo  $\varepsilon$ .

Si dirà distanza focale  $\overline{f}$  il valore della costante di proporzionalità:

$$h = \overline{f} \cdot \varepsilon$$



La retta del raggio per  $F_1$  parallelo ai raggi incidenti incontra l'asse ottico (eventualmente dentro l'obiettivo) in un punto  $N'$ , che si dice **secondo punto nodale**: ne segue

$$\overline{f} = N' F'$$

# Parametri geometrici di un obiettivo

Quando il mezzo prima dell'obiettivo è uguale a quello dopo,

$$f = \overline{f} \quad \text{e} \quad P' \equiv N'$$

Le due definizioni sono equivalenti, ma la seconda è più espressiva.

Se infatti poniamo in  $F'$  una lastra fotografica e consideriamo due stelle che hanno distanza angolare  $\varepsilon$ , sulla lastra le loro immagini distano:

$$h = f \varepsilon$$

La distanza focale fornisce la **scala** di una fotografia fatta con il nostro obiettivo.

E' chiaro che una  $f$  più grande darà una fotografia più grande della stessa regione di cielo; ma non si può parlare di ingrandimento perché è un **angolo**  $\varepsilon$  che viene tradotto in una **distanza**  $h$ .



# Limiti di risoluzione

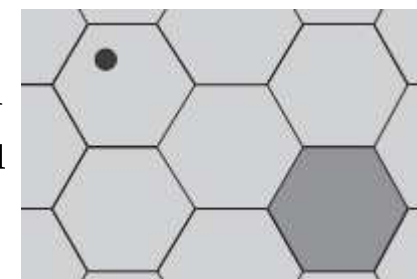
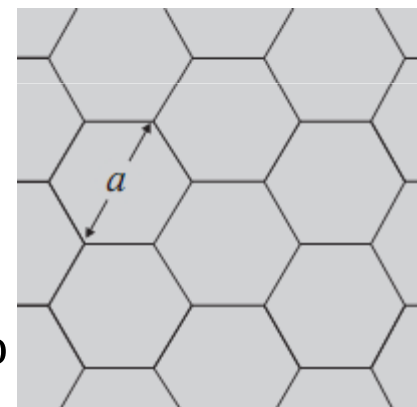
Non ha senso parlare di luminosità e di risoluzione senza introdurre un altro elemento essenziale di qualsiasi strumento astronomico: il rivelatore.

La luce raccolta dall'obiettivo (l'immagine formata da questo) deve essere **vista** da qualcosa, che potrà essere l'occhio umano (raramente nelle applicazioni scientifiche), una lastra fotografica (ormai quasi più utilizzata), un fotomoltiplicatore, una telecamera, un dispositivo a CCD (charge coupled device), ecc.

Tutti questi oggetti hanno una struttura discreta: sono costituiti di rivelatori elementari, più o meno grandi e numerosi, ma sempre in numero finito.

Riducendo all'essenziale la schematizzazione supporremo che un elemento del rivelatore sia una piccola superficie avente un diametro  $a$  caratteristico del rivelatore.

Supporremo inoltre che la luce che cade su un elemento agisca su quello e solo su quello, e che conti solo l'energia totale ricevuta, non il modo come è distribuita: non fa differenza se la luce arriva solo su un'area di diametro molto minore di  $a$ , o se invece è dispersa uniformemente su tutto l'elemento.



# Limiti di risoluzione

**Definizione:** si chiama **sorgente otticamente puntiforme** una sorgente luminosa per la quale la luce che arriva da essa illumina **un solo** elemento del rivelatore.

Una sorgente può essere o meno puntiforme a seconda:

- a) delle sue dimensioni e della sua distanza (cioè del suo diametro angolare);
- b) delle caratteristiche dell'obiettivo, cioè della sua capacità di concentrare luce;
- c) del rivelatore (del diametro  $a$  dei suoi elementi).

Una sorgente sarà detta **estesa** se illumina molti elementi del rivelatore.

# Limiti di risoluzione

La risoluzione di uno strumento è limitata perché esso non è in grado di distinguere due sorgenti, anche praticamente puntiformi, la cui distanza angolare sia troppo piccola.

La risoluzione può perciò essere misurata dalla ***minima distanza angolare  $\epsilon$  risolvibile***.

I limiti della risoluzione provengono da tre cause ben distinte:

- a) l'obiettivo
- b) l'atmosfera
- c) il rivelatore

## a) – Effetto dell'obiettivo

I limiti intrinseci all'obiettivo si possono ancora classificare secondo tre cause:

a1) diffrazione

a2) difetti di progetto

a3) difetti di costruzione.



## a1) – Diffrazione

La diffrazione ha la sua origine nelle proprietà ondulatorie della luce, le quali fanno sì che nessun obiettivo, per quanto ben concepito e costruito, possa concentrare completamente in un punto la luce di una sorgente geometricamente puntiforme. Intorno al fuoco si forma una macchiolina luminosa, il cui raggio è all'incirca

$$\rho = \frac{f}{d} \lambda$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della luce.

Il termine  $f/d$  viene detto anche ***rapporto focale***.

## a1) – Diffrazione

Una definizione più precisa porta alla formula

$$\rho = 1,22 \frac{f}{d} \lambda$$

Per la luce visibile è:  $0,4\mu\text{m} < \lambda < 0,7\mu\text{m}$

da cui il valor medio di  $0,55\mu\text{m}$ ; si ha quindi

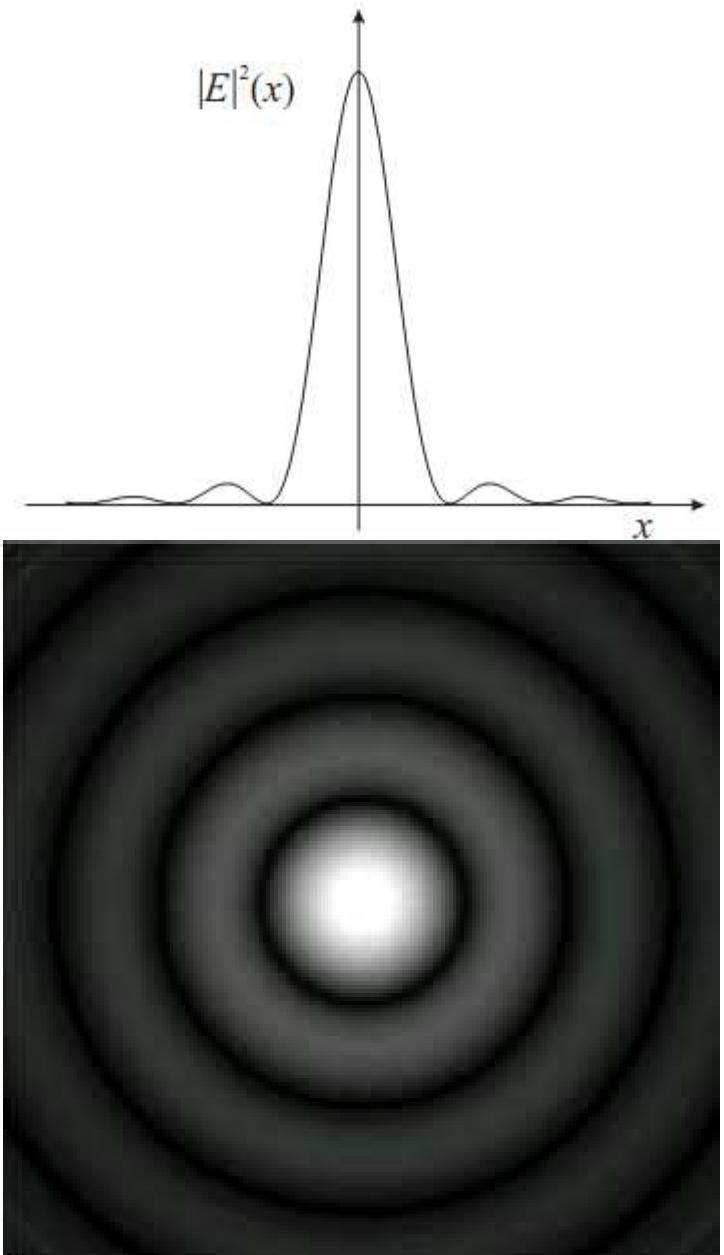
$$\rho = 0,67 \frac{f}{d} \mu\text{m}$$

Questa espressione è più utile in termini angolari.

Alla separazione  $\rho$  corrisponde un angolo  $\varepsilon$  dato da

$$\varepsilon = \frac{\rho}{f} = \frac{0,67}{d}$$

NB – Se  $d$  è in  $\mu\text{m}$  allora  $\varepsilon$  è in radianti.



## a1) – Diffrazione

E' più comoda la formula

$$\varepsilon'' \simeq \frac{140\text{mm}}{d}$$

Questo è chiamato limite di Rayleigh e definisce il diametro del primo anello scuro.

Poiché nella figura di diffrazione l'85% della luce si concentra in una zona centrale e che il rimanente va a cadere sugli anelli brillanti è possibile nella pratica guadagnare un 15% sul valore minimo di separazione; in tal caso l'espressione precedente diviene (limite di Dawes):

$$\varepsilon'' \simeq \frac{120\text{mm}}{d}$$

## a1) – Diffrazione

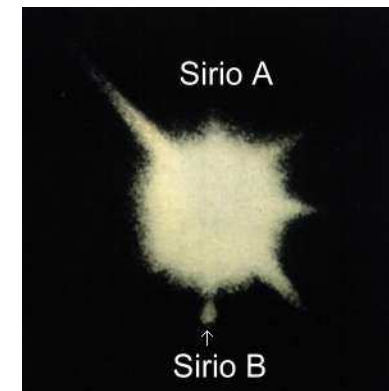
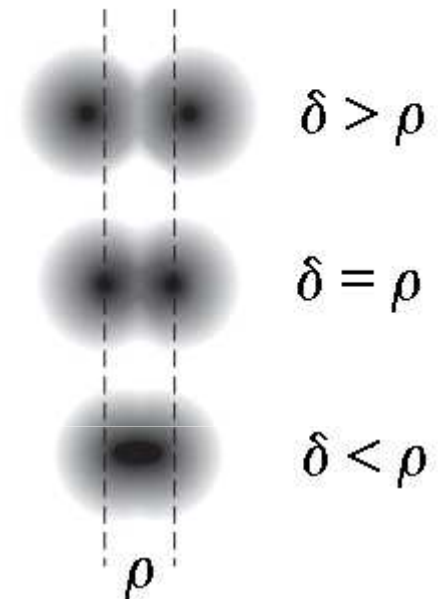
Il limite di risoluzione significa che due stelle saranno risolte se le macchie (figure di diffrazione) da esse prodotte hanno i centri a distanza

$$\delta > \rho$$

cioè se il centro dell'una è fuori dall'altra; non saranno risolte in caso contrario.

Si tratta di un criterio arbitrario, che può funzionare più o meno bene in pratica a seconda di altre condizioni di cui non si è detto.

Per esempio: con  $d = 60\text{mm}$  si avrebbe  $\varepsilon'' = 2,3''$ .  
Se puntiamo il telescopio su Sirio, che è una doppia le cui componenti sono separate di  $9''$ , dovremmo vederle benissimo, mentre di fatto la scoperta visuale del compagno di Sirio è stata molto difficile. La ragione è che Sirio B è 500 volte più debole di Sirio A.





## a2) – Difetti di progetto: aberrazioni

In questo gruppo si sono riassunti i limiti di risoluzione che per un dato obiettivo sussistono anche trascurando la diffrazione.

Anche nell'ottica geometrica, che appunto ignora la natura ondulatoria della luce, solo in approssimazione di Gauss è vero che una lente concentra tutta la luce in un'immagine puntiforme: dunque in generale un obiettivo, anche a parte la diffrazione, formerà una macchia di raggio non nullo, che potrà essere reso più o meno piccolo a seconda della costituzione (progetto) dell'obiettivo.

A questo scostamento delle immagini ottiche dall'ideale si dà genericamente il nome di **aberrazioni**.

Le aberrazioni sono un limite importante alla risoluzione di un obiettivo fotografico, dove sono necessari molti compromessi tra diversi fattori (non ultimo il costo); nel campo astronomico generalmente le aberrazioni possono essere quasi trascurabili, almeno per strumenti professionali.

## a2) – Difetti di progetto: aberrazioni

Le aberrazioni sono insite nella natura delle lenti e degli specchi.

A seconda che si presentano sull'asse ottico o al di fuori di esso si dividono in *assiali* ed *extra-assiali*.

Aberrazioni assiali:

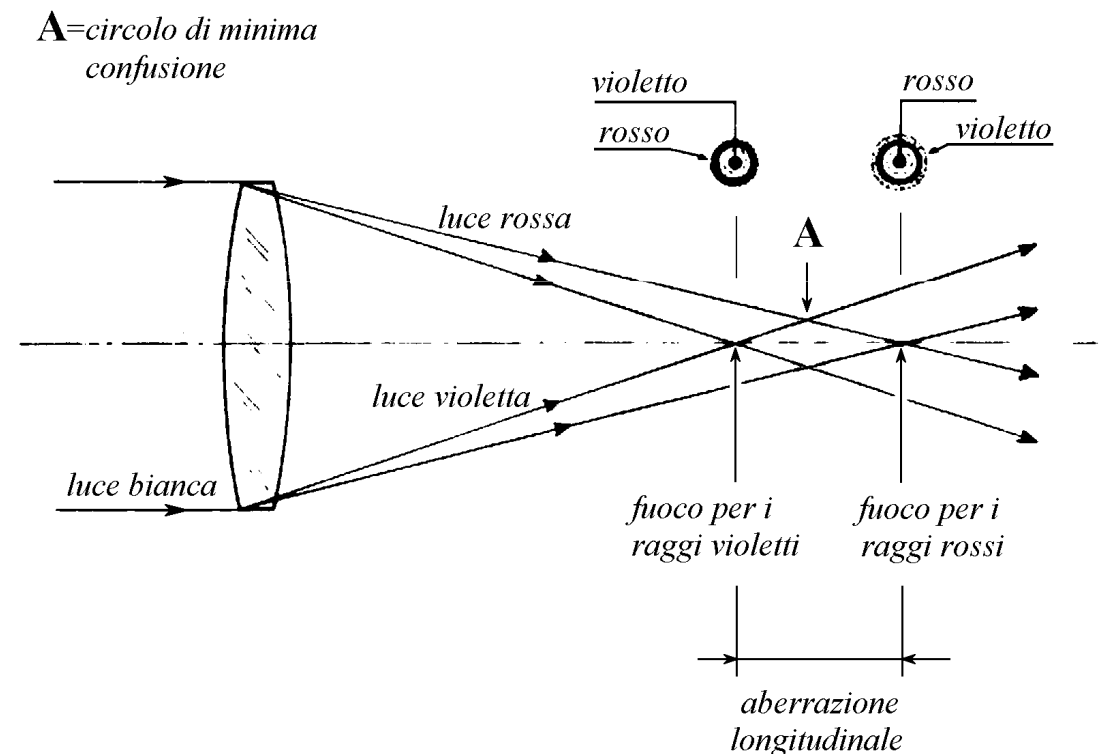
- *cromatiche*
- *di sfericità*

## a2) – Difetti di progetto: aberrazioni cromatiche

La distanza focale di una lente è legata all'indice di rifrazione, questo varia al variare della lunghezza d'onda quindi la distanza focale dipende dalla lunghezza d'onda.

La radiazione violetta, più deviata, si focalizza più vicino alla lente, quella rossa, meno deviata, converge più lontano dalla lente.

Se la sorgente luminosa non è monocromatica lungo l'asse ottico si hanno fuochi diversi per i diversi colori.



## a2) – Difetti di progetto: aberrazioni cromatiche

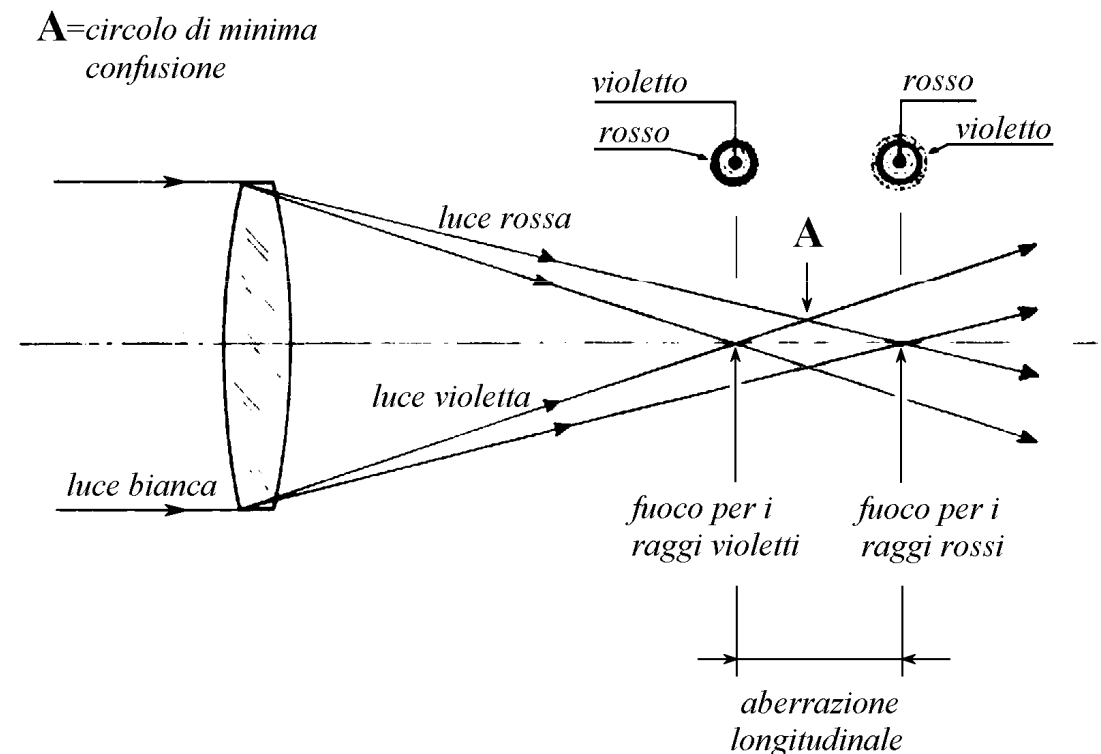
L'aberrazione cromatica non è nociva se la lunghezza focale della lente è almeno uguale a:

$$f = 18,6d^2$$

dove  $d$  è il diametro dell'obiettivo.

Con questa formula anche diametri modesti impongono lunghezza enormi (per un 60 mm necessiterebbero 6,7 m).

Il modo più semplice per ridurre notevolmente l'aberrazione cromatica è di usare due lenti (una convergente di vetro crown, l'altra divergente di vetro flint).



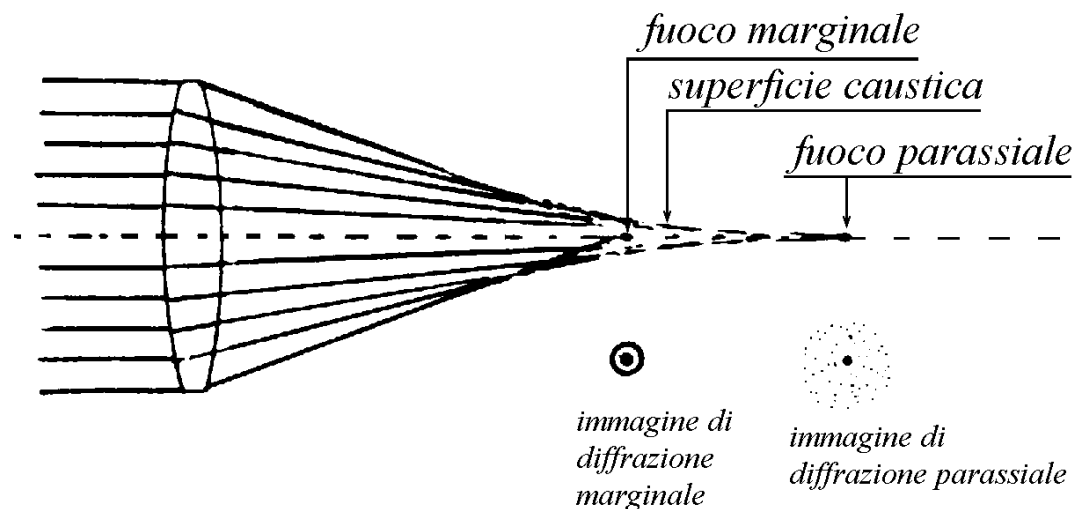
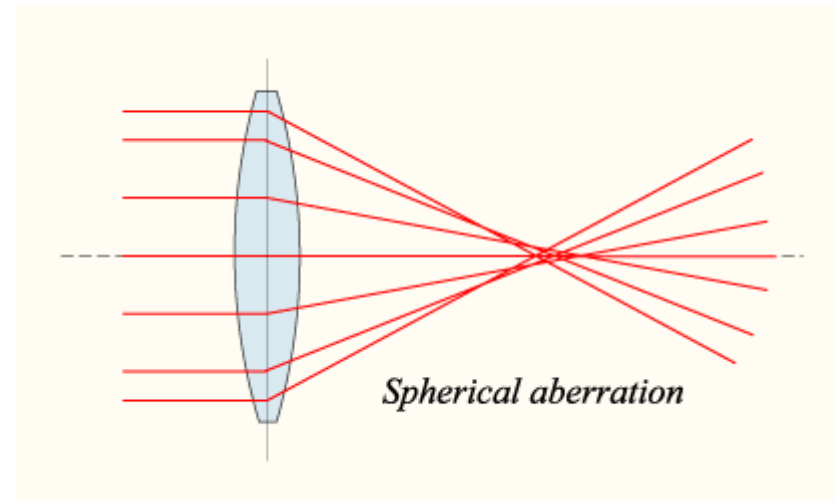


## a2) – Difetti di progetto: aberrazioni sferiche

I raggi paralleli che incidono su una lente o su uno specchio sferico vicino all'asse ottico vengono focalizzati più lontano di quelli che incontrano la lente o lo specchio presso il bordo.

Questo fa sì che si vengano a formare più piani focali in ognuno dei quali si sovrappongono, più o meno sfocate, le immagini degli altri.

L'immagine globale che ne deriva, compresa tra il **fuoco marginale** e il **fuoco parassiale**, prende il nome di **caustica**.



## a2) – Difetti di progetto: aberrazioni sferiche

C'è una regola (di Rayleigh) che asserisce che l'aberrazione sferica comincia a compromettere seriamente la figura di diffrazione quando la superficie d'onda devia dal percorso ideale di circa  $1/4$  di  $\lambda$  (per  $\lambda$  si può prendere 560 nm; luce giallo-verde).

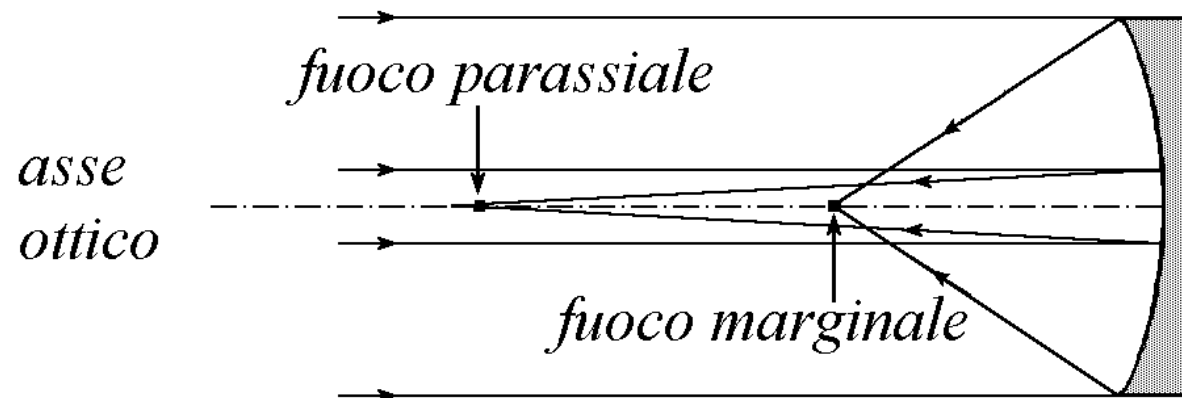
Aumentando la lunghezza focale della lente o dello specchio l'aberrazione diminuisce.  
Per le lenti non è la soluzione in quanto è sempre presente l'aberrazione cromatica.

Per gli specchi sferici vale:

$$f = \sqrt[3]{35d^4}$$

dove  $f$  è la focale e  $d$  è il diametro.

La soluzione migliore è uno specchio parabolico.



## a2) – Difetti di progetto: aberrazioni

Aberrazioni extrassiali:

- *coma*
- *astigmatismo*
- *curvatura di campo*
- *distorsione*

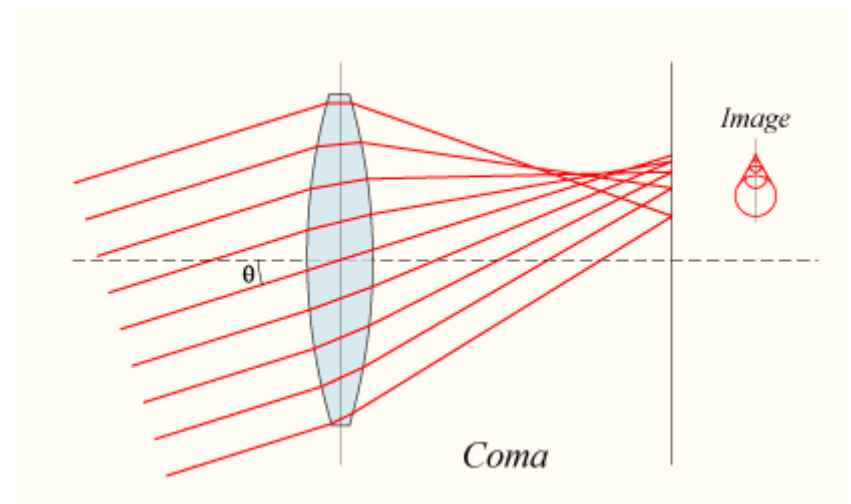
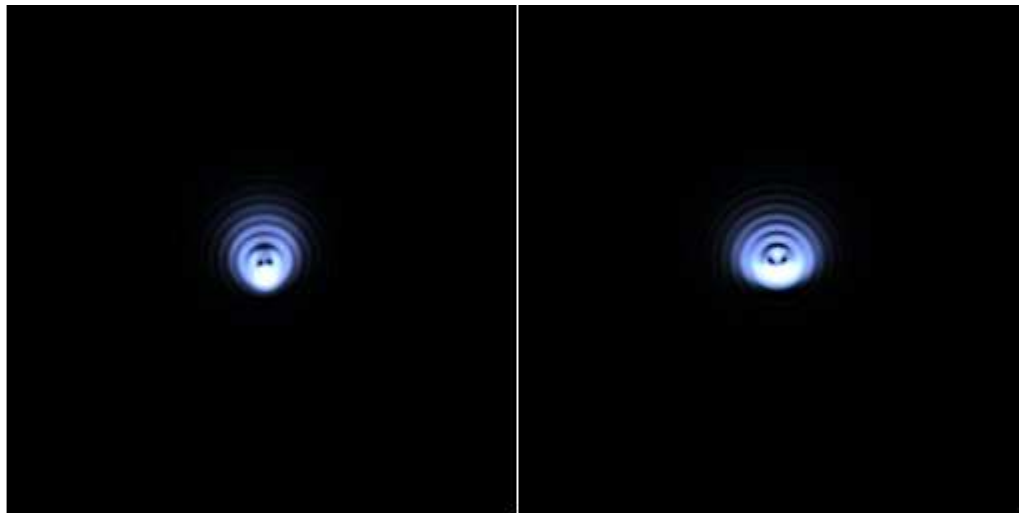
## a2) – Difetti di progetto: coma

E' una aberrazione data dal fatto che i raggi provenienti dalle zone extra-assiali si focalizzano su piani diversi.

I raggi passanti per le zone distanti dal centro vengono focalizzati dando origine ad anelli luminosi provenienti dalle diverse zone di apertura del sistema ottico. La sovrapposizione di questi anelli luminosi crea un'immagine stellare a forma di cometa, una *v* con la punta rivolta verso l'interno o l'esterno a seconda che la coma sia positiva o negativa.

È una caratteristica di alcuni sistemi ottici molto aperti come i Newton, per ovviarne si può diaframmare l'obiettivo o utilizzare un **correttore di coma**.

Se tale difetto è presente però nelle zone centrali di qualunque strumento indica una scollimazione.





## a2) – Difetti di progetto: astigmatismo

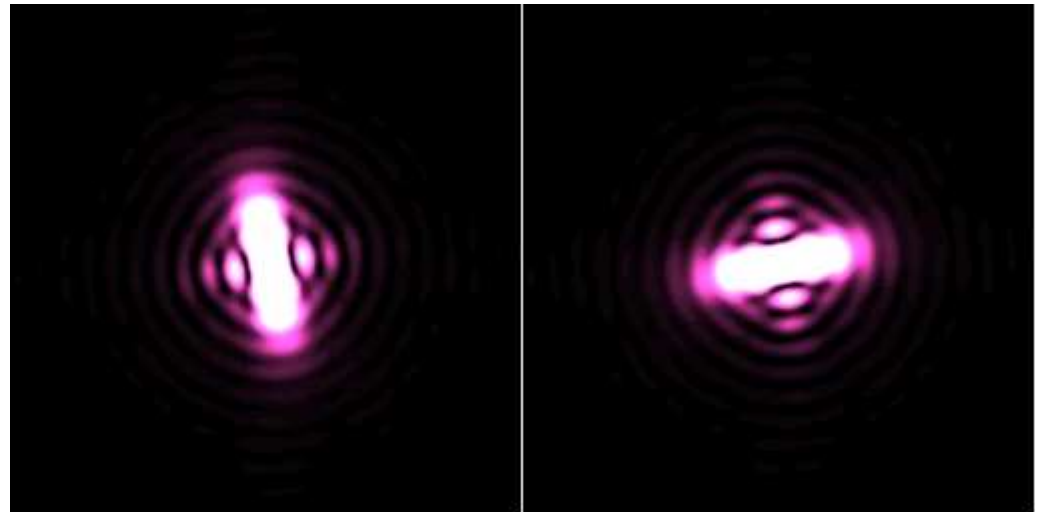
Questa aberrazione extra-assiale può verificarsi anche in asse quando siamo di fronte ad un obiettivo lavorato male.

Trasforma una sorgente puntiforme in due lineette sghembe giacenti su piani a  $90^\circ$ ; l'immagine che ne trae l'occhio è di una crocetta. È dovuto alla diversa distanza a cui focalizzano diametri perpendicolari dell'obiettivo.

Per la causa sopra descritta attraversando la posizione di fuoco dall'intra all'extra focale avremo un cambio di asse.

Può esservi astigmatismo anche quando le ottiche risultano tensionate o pesantemente scollimate.

E' tollerato nell'osservazione visuale, meno in quella fotografica.



## a2) – Difetti di progetto: curvatura di campo

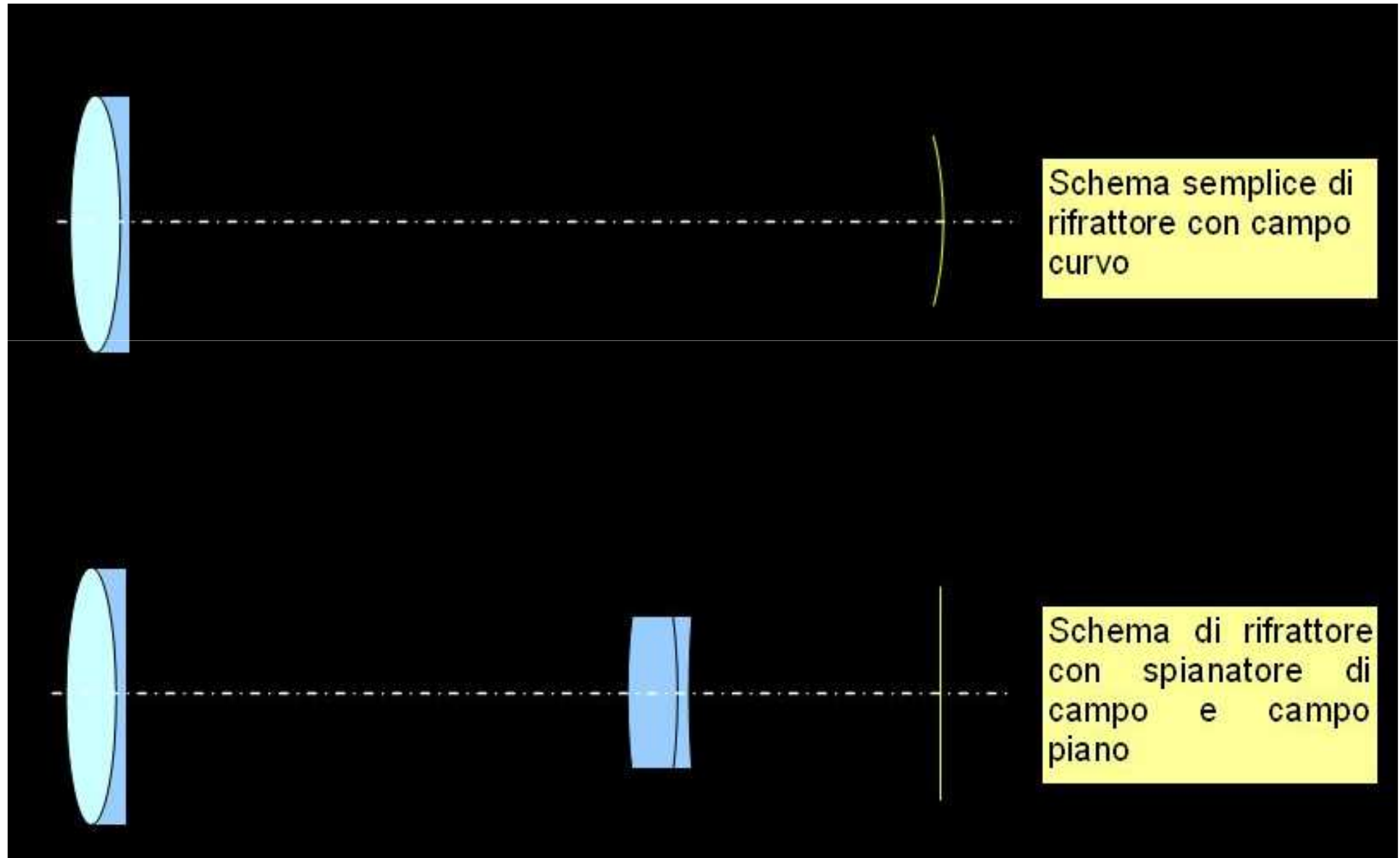
Uno strumento ottico è affetto da curvatura di campo quando la sua superficie focale non è prettamente piana ma leggermente emisferica.

Questo fenomeno è intrinseco con la maggioranza degli schemi ottici dei telescopi e obiettivi in genere; per ovviare a questo inconveniente il progettista dell'ottica deve provvedere – come avviene nei comuni obiettivi fotografici – all'inserimento di un gruppo *spianatore di campo* lungo il cammino ottico.

La curvatura di campo è avvertibile solo in fotografia e si presenta mostrando le immagini stellari sfuocate in prossimità del bordo nonostante che le stelle al centro del campo siano perfettamente a fuoco.

Foccheggiando a loro volta le immagini al bordo, andranno sfuocandosi le immagini al centro del campo.

## a2) – Difetti di progetto: curvatura di campo



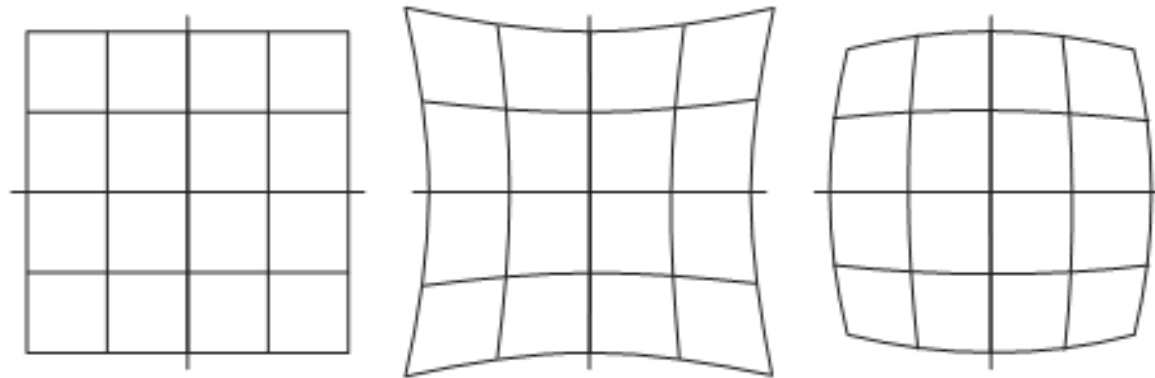
## a2) – Difetti di progetto: distorsione

Fa assumere a linee diritte non passanti per l'asse ottico l'aspetto di curve.

È imputabile al fatto che l'ingrandimento non è esattamente lo stesso per i raggi che passano a diverse distanze dall'asse ottico.

Si può evitare facendo uso di due doppietti simmetrici, un sistema cioè di 4 lenti.

Un sistema esente da tale aberrazione si dice **ortoscopico**.





## a3) – Difetti di costruzione

Un obiettivo anche perfetto sulla carta è soggetto a difetti in sede di realizzazione:

- inesatta lavorazione delle superfici,
- imprecisione di montaggio,
- deformazioni delle strutture portanti,
- ecc.

Questo fattore può essere decisivo per obiettivi di basso costo costruiti in serie; ma può essere reso trascurabile per strumenti di uso scientifico.

Non bisogna però dimenticare che la costruzione di un grande telescopio, per la precisione richiesta in parti che pesano diverse tonnellate, è un'opera che non solo sul piano ottico, ma anche di ingegneria, richiede competenze di altissimo livello e una grande quantità di lavoro assai qualificato.

## b) – L'atmosfera

L'atmosfera è un mezzo ottico con indice di rifrazione poco diverso da 1, ma la differenza non è trascurabile; quello che più conta è che l'indice di rifrazione dell'aria sopra e dentro il telescopio è soggetto a variazioni anche rapide, per effetto di variazioni di pressione e temperatura.

L'atmosfera è in continuo movimento, anche su piccola scala (turbolenza): ne consegue una perturbazione irregolare nel percorso dei raggi di luce, che si manifesta in più modi.

Se si guarda una stella quando l'atmosfera è turbolenta essa “brilla”, cioè cambia luminosità e anche posizione in modo casuale; a volte l'immagine appare sfocata, per tornare a fuoco poco dopo, ecc.

Questo se si usa un piccolo strumento ( $d \lesssim 20$  cm); con strumenti più grandi ciascuna parte dell'obiettivo presenta lo stesso effetto in modo indipendente dalle altre, e il risultato è un'immagine stabile, ma confusa. Anche con uno strumento di piccolo diametro si ha una perdita di nitidezza se si fa una fotografia con posa anche di qualche secondo. Complessivamente il risultato è una minore risoluzione, che dipende dalle condizioni dell'atmosfera.

## b) – L'atmosfera

Al fenomeno si dà il nome di **seeing** (che si potrebbe tradurre all'incirca con “condizioni di visibilità”) e si chiama seeing anche la misura del limite di risoluzione conseguente.

Il seeing può essere molto diverso a seconda del luogo e delle condizioni meteorologiche: a titolo di orientamento, può andare da 0,2” (eccezionale) a 3” (cattivo).

I valori migliori si ottengono in località elevate (ma l'altitudine non basta!).

Per quello che diremo in seguito, assumeremo un seeing di 1”, solo per indicare l'ordine di grandezza.

Se lo strumento è piccolo ( $\lesssim 30$  cm) si possono prendere molte pose brevi, che non risentono in modo sensibile della perdita di risoluzione, e poi comporle con adeguato software.

Per strumenti grandi si possono usare invece le ottiche attive.

## c) – Il rivelatore

La struttura discreta del rivelatore limita in modo ovvio la risoluzione.

Grosso modo, se  $a$  è il diametro di un elemento del rivelatore, due sorgenti puntiformi saranno distinte se la distanza fra le loro immagini è maggiore di  $a$ :  
ciò implica

$$\varepsilon = a / f \quad (\text{in radianti})$$

Il limite di risoluzione dipende dunque da  $a$ , che è una caratteristica del rivelatore, e da  $f$  che è una caratteristica dell'obiettivo.

Quanto ai valori, vanno discussi caso per caso.



# Limiti per la risoluzione

Riepilogando: si hanno tre limiti distinti (tralasciando le possibili aberrazioni e i difetti di lavorazione che dovrebbero non esistere in telescopi professionali)

- a) diffrazione  $\epsilon_d'' = \frac{140\text{mm}}{d}$
- b) seeing  $\epsilon_s'' \approx 1$
- c) rivelatore  $\epsilon_r = a/f$  (radianti)

A seconda che l'uno o l'altro dei limiti sia dominante potremo avere tre casi diversi e il limite effettivo sarà:

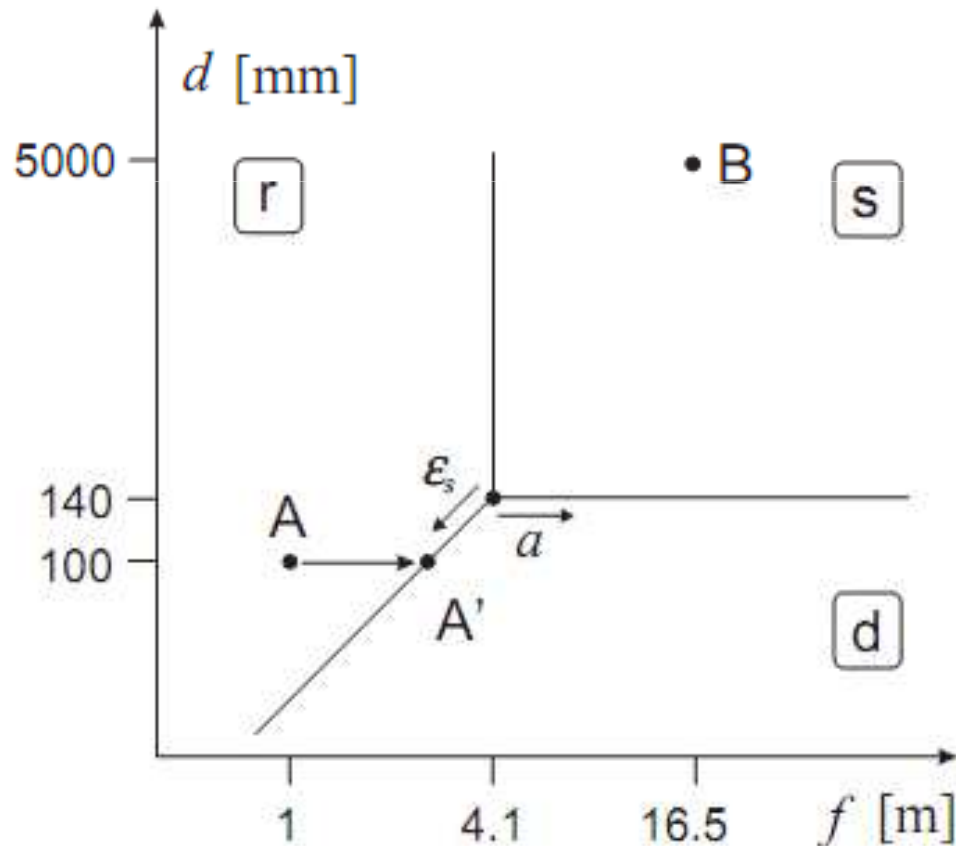
$$\max(\epsilon_d, \epsilon_s, \epsilon_r)$$

# Limiti per la risoluzione

I parametri indipendenti sono in realtà 4:  $f$ ,  $d$ ,  $a$ ,  $\epsilon_s$ .

Per discutere la situazione conviene tracciare un grafico in cui due di questi sono tenuti costanti: ad esempio  $a$  ed  $\epsilon_s$ .

Vedi: [www.df.unipi.it/~penco/Astronomia/index\\_astr.html](http://www.df.unipi.it/~penco/Astronomia/index_astr.html)



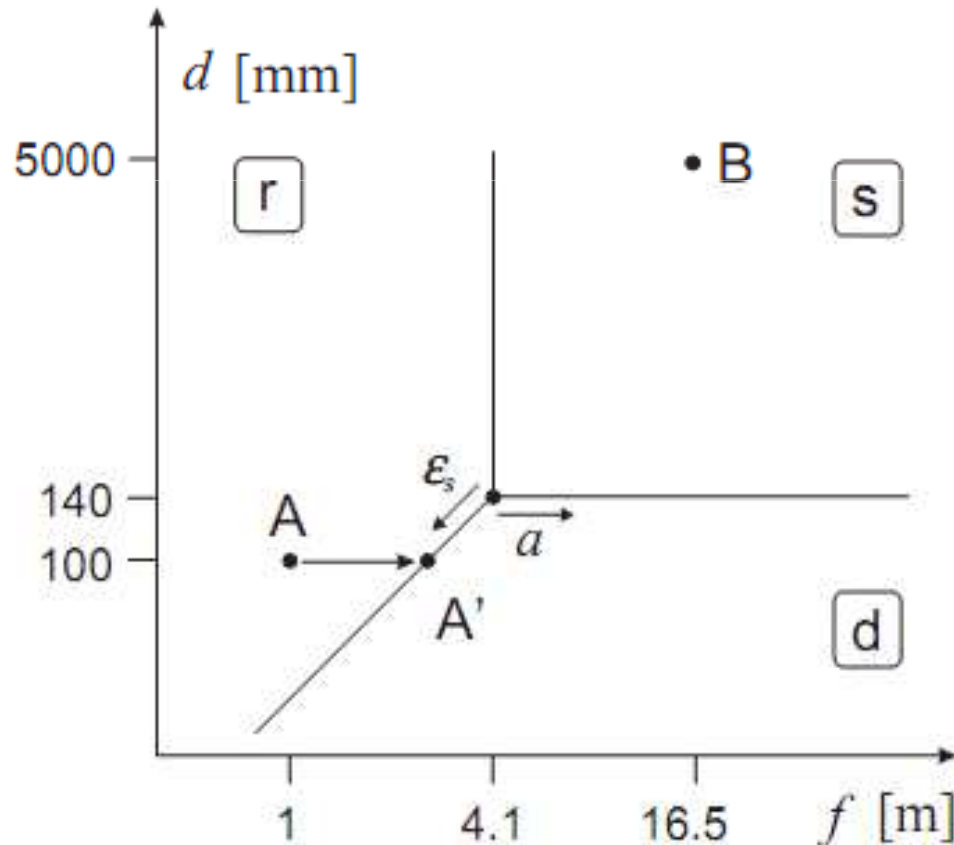
La figura si riferisce ad  $a = 20 \mu\text{m}$ , e mostra tre regioni, in cui dominano rispettivamente la diffrazione, il seeing e il rivelatore.

Le frecce indicano come si sposta il “punto triplo” al crescere di  $a$  e di  $\epsilon_s$ .

# Limiti per la risoluzione

Sia  $f = 1\text{m}$ ,  $d = 100\text{mm}$  (punto A).

Domina il rivelatore: volendo aumentare la risoluzione, se non si può disporre di un rivelatore ad altissima risoluzione si deve aumentare  $f$  (con una **lente di Barlow**). Ci si sposterà a destra lungo un'orizzontale, fino al punto A', che non converrà oltrepassare, perché a quel punto diventa dominante la diffrazione e la risoluzione non aumenta più.



Sia ora  $f = 16,5\text{ m}$ ,  $d = 5\text{m}$   
(Telescopio Hale, punto B).  
Domina il seeing e non c'è niente  
da fare: si vede però che si può  
usare senza danno un rivelatore con  
 $a$  più grande che renderebbe più  
breve la posa richiesta.

# Luminosità dell'obiettivo

La quantità di luce che viene concentrata su un elemento del rivelatore è chiaramente proporzionale all'area dell'obiettivo (**pupilla d'entrata**): quindi è proporzionale a  $d^2$ .

Nell'osservazione di oggetti puntiformi la luminosità del telescopio varia con  $d^2$ .

Se si osserva una sorgente estesa (ad esempio una nebulosa), la quantità di luce è ancora proporzionale a  $d^2$ , ma l'immagine varia di dimensioni proporzionalmente a  $f$ , e perciò il numero di elementi illuminati è proporzionale a  $f^2$ .

L'effetto prodotto su ciascun elemento da una sorgente estesa è ancora proporzionale a  $d^2$ , ma anche a  $1/f^2$ , cioè a  $d^2/f^2$ .

$$d / f = \text{rapporto di apertura}$$

# Luminosità dell'obiettivo

Uno strumento può essere più luminoso di un altro per le stelle, e meno luminoso per le nebulose.

Esempio:  $d_1 = 1\text{m}$ ,  $f_1 = 10\text{m}$ ;  $d_2 = 0,5\text{m}$ ,  $f_2 = 2,5\text{m}$ .

Il primo strumento è 4 volte più luminoso del secondo per sorgenti puntiformi ( $d_1^2/d_2^2 = 1/0,25 = 4$ ), ma 4 volte meno luminoso per sorgenti estese ( $d_1^2/f_1^2 = 0,01$ ;  $d_2^2/f_2^2 = 0,04$ ).

Questo spiega anche perché con un telescopio si possono vedere le stelle di giorno.

L'occhio adattato alla luce diurna ha  $d \simeq 2\text{mm}$ ,  $f \simeq 20\text{mm}$  (apertura relativa  $1/10$ ).

In queste condizioni la luminosità del cielo è grande rispetto a quella delle singole stelle, anche brillanti.

Se  $d = 50\text{mm}$ ,  $f = 1\text{m}$  (apertura relativa  $1/20$ ) aumentiamo di un fattore  $(50/2)^2 = 625$  la luminosità di una stella, mentre riduciamo di un fattore  $[(1/10)/(1/20)]^2 = 4$  quella del cielo.



# Guadagno

La pupilla umana quando è al massimo della dilatazione è di 7-8 mm.

Il guadagno  $G$  rispetto all'occhio è dato dal rapporto tra l'area dell'obiettivo e l'area della pupilla; se  $d$  è il diametro dell'obiettivo (in cm) e 0,7 il diametro della pupilla (in cm) si ha:

$$G = \left( \frac{d}{0,7} \right)^2$$

# Luminosità dell'obiettivo

Dal diametro dell'obiettivo dipendono anche le magnitudini limite teorica delle stelle visibili. La formula classica è ( $d$  in cm):

$$m_{\text{limite}} = 6,8 + 5 \cdot \log d$$

Tenendo conto anche della qualità del cielo, si arriva ad una formula più precisa (vedi [www.lezionidiastronomia.it/astronomia\\_amatoriale/pdf/magnitudine\\_limite\\_gasparri.pdf](http://www.lezionidiastronomia.it/astronomia_amatoriale/pdf/magnitudine_limite_gasparri.pdf)):

$$m_{\text{limite}} = m_{\text{occhio}} - 2 + 4,4 \cdot \log d$$

| Magn.<br>occhio | Diametro obiettivo (mm) |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | 100                     | 150  | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  |
| 6,5             | 13,3                    | 14,1 | 14,6 | 15,1 | 15,4 | 15,7 | 15,9 |
| 6,0             | 12,8                    | 13,6 | 14,1 | 14,6 | 14,9 | 15,2 | 15,4 |
| 5,5             | 12,3                    | 13,1 | 13,6 | 14,1 | 14,4 | 14,7 | 14,9 |
| 5,0             | 11,8                    | 12,6 | 13,1 | 13,6 | 13,9 | 14,2 | 14,4 |
| 4,5             | 11,3                    | 12,1 | 12,6 | 13,1 | 13,4 | 13,7 | 13,9 |
| 4,0             | 10,8                    | 11,6 | 12,1 | 12,6 | 12,9 | 13,2 | 13,4 |
| 3,5             | 10,3                    | 11,1 | 11,6 | 12,1 | 12,4 | 12,7 | 12,9 |

# Luminosità dell'obiettivo

La luce che colpisce la superficie di una lente non entra tutta nel vetro, una parte viene riflessa.

E' possibile ridurre tale quantità trattando le superfici con strati antiriflessi.

Si stima che un obiettivo a due lenti non trattato trasmette all'oculare circa il 92% della luce.

Per gli specchi c'è una perdita dovuta al fatto che l'alluminatura riflette solo una parte della luce che riceve.

Ovviamente ogni superficie e ogni lente riducono la luce utilizzabile.

In un telescopio newtoniano classico, con due specchi, all'oculare arriva il 72% della luce.

| Diametro obiettivo (cm) | Guadagno rispetto all'occhio | Magnitudine limite |
|-------------------------|------------------------------|--------------------|
| 6                       | 73                           | 10,7               |
| 8                       | 131                          | 11,3               |
| 11,4                    | 265                          | 12,1               |
| 15                      | 459                          | 12,7               |
| 20                      | 816                          | 13,3               |
| 25                      | 1.276                        | 13,8               |
| 40                      | 3.265                        | 14,8               |
| 100                     | 20.408                       | 16,8               |
| 500                     | 510.204                      | 20,3               |
| 600                     | 734.694                      | 20,7               |

# Ingrandimento

Un altro elemento fondamentale è l'oculare.

È la lente di ingrandimento che.

Il parametro principale di un oculare è la sua lunghezza focale che insieme alla lunghezza focale del telescopio determina l'ingrandimento.

$$\text{Ingrandimento} = \frac{\text{Lunghezza focale obiettivo}}{\text{Lunghezza focale oculare}}$$

All'aumentare dell'ingrandimento la luminosità dell'immagine diminuisce.

Una regola empirica generale dice che l'ingrandimento massimo è 20 volte il diametro dell'obiettivo espresso in cm.

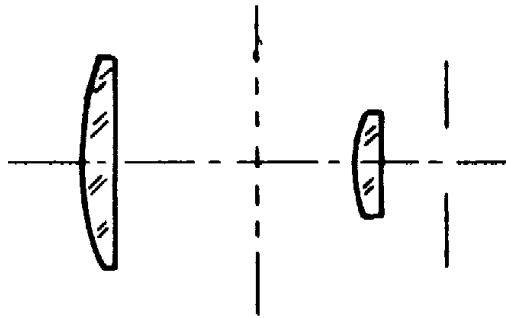
In maniera più precisa si ha:

per i rifrattori:  $70 \cdot \sqrt{d-1}$

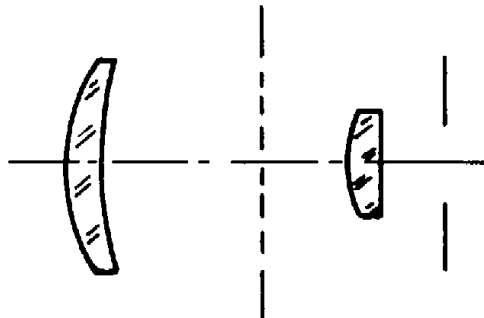
per i riflettori:  $100 \cdot \sqrt{d-3}$

$d$  espresso in cm.

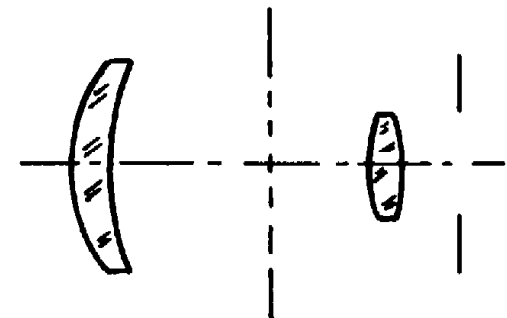
# Oculari



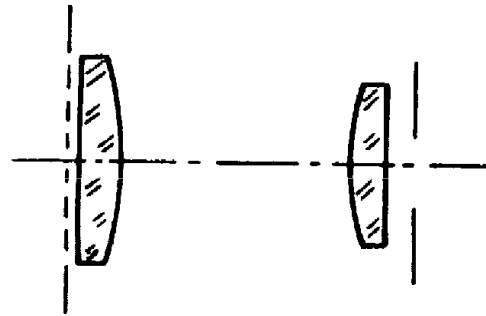
*Huygens (H) ~35°*



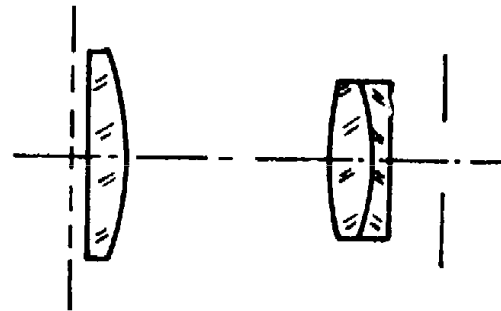
*Huygens Mittenzwey (HM) ~45°*



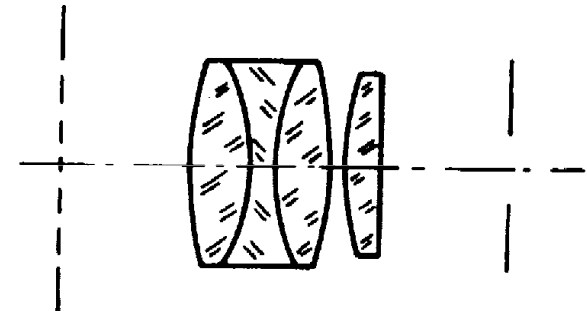
*Huygens-Airy ~45°*



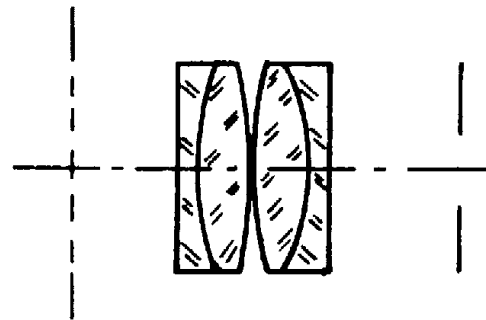
*Ramsden (R) ~35°*



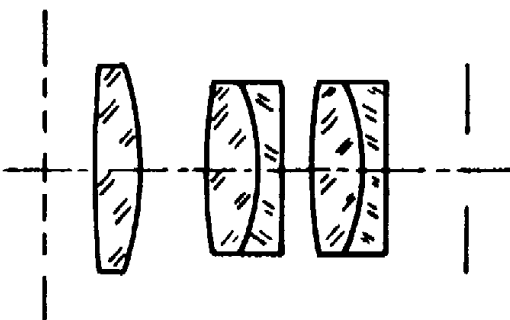
*Kellner (K) ~40°/45°*



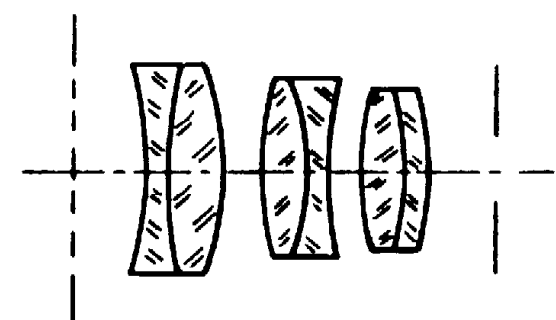
*Ortoscopico di Abbe (Or) ~40°*



*Ortoscopico di Plössl (Or) ~50°*



*Erfle a 5 lenti (Er) ~65°*



*Erfle a 6 lenti (Er) ~70°*



# spettroscopia

# La spettroscopia astronomica

Lo sviluppo della spettroscopia, cioè dello studio dello spettro delle sorgenti luminose, è cominciato nel XIX secolo, con la messa a punto del primo spettroscopio. Lo spettroscopio è uno strumento che permette di separare le varie componenti di un fascio di luce, cioè le diverse lunghezze d'onda. Se ad esso è abbinato un dispositivo di misura dell'intensità della luce alle varie lunghezze d'onda, si dice spettrometro.

Ogni elemento chimico emette ed assorbe particolari frequenze, cioè particolari righe. Il suo spettro può essere studiato in laboratorio in diverse condizioni di temperatura, densità e pressione. Studiando la luce emessa da varie sostanze chimiche e analizzando la luce proveniente dal Sole e da alcune stelle, gli astronomi del secolo scorso furono in grado di scoprire la loro composizione chimica.

# La spettroscopia astronomica

Una scoperta fondamentale fu che gli spettri stellari possono essere suddivisi in gruppi, detti tipi spettrali, in base a delle affinità, come il colore o la presenza di certe righe spettrali. In particolare, ci si accorse che il tipo e l'aspetto delle righe spettrali variava al variare del colore della stella.

Lo spettro di una stella è a righe di assorbimento. Sotto certe ipotesi, la parte continua di questo spettro può essere approssimata con quello di un corpo nero di temperatura pari a quella della superficie della stella.

# La spettroscopia astronomica

In astrofisica una stella viene caratterizzata da un "colore" e da una "temperatura superficiale" a seconda della forma del suo spettro: questo viene confrontato con uno spettro di corpo nero, e una volta trovato quello che più si avvicina a quello della stella, si attribuisce a questa la stessa temperatura del corpo nero. Il colore è determinato dalla regione dello spettro nella quale l'intensità della luce è massima; le stelle hanno temperature superficiali di qualche migliaio o poche decine di migliaia di gradi, ed emettono la massima potenza nella regione ottica dello spettro. Il Sole emette al massimo di intensità nella regione gialla della banda ottica, perciò la sua temperatura superficiale è stata stabilita in 5780 gradi Kelvin.

# La spettroscopia astronomica

Se un elemento chimico è presente negli strati esterni di una stella, produce una riga in assorbimento, lasciando una riga oscura nel suo spettro.

Solo le stelle giovani e massicce hanno una temperatura superficiale abbastanza alta (qualche decina di migliaia di gradi) da poter ionizzare il gas che le circonda. Questo gas, caldo e rarefatto, assorbe l'energia proveniente dalla stella e la riemette sotto forma di righe spettrali; per questo motivo, sovrapposto allo spettro stellare con le sue righe di assorbimento, queste stelle hanno anche uno spettro a righe di emissione, quello del gas.

Alcune righe spettrali sono molto importanti in astrofisica. Tra queste, le righe dell'idrogeno, in particolare la riga detta H alpha, con lunghezza d'onda di 6563 Angstrom. Altre righe importanti sono quelle del sodio, del calcio ionizzato, ecc...



# Tecniche per la rilevazione

## Metodi

**DIRETTI** (48)

**OSSERVAZIONE DIRETTA** (48)

**INDIRETTI** (1738)

**METODI DINAMICI:** – Metodo astrometrico (2)  
– Metodo della velocità radiale (558)  
– Metodo del Pulsar Timing (14)

**METODI FOTOMETRICI:** – Metodo di microlensing (29)  
– Metodo del transito (1133)  
– Metodo TTV (2)

**METODI ALTERNATIVI:** – Tracce di dischi di polveri  
– Emissione radio  
– Emissione di onde gravitazionali

# Tecniche per la rilevazione

## Metodi diretti

Un pianeta, che orbita intorno ad una stella di luminosità  $L_*$ , avrà una luminosità  $L_p$  che dipende dalla lunghezza d'onda  $\lambda$ , dal raggio planetario  $R_p$  e dal semiasse maggiore dell'orbita:

$$\frac{L_p}{L_*} = p(\lambda, \alpha) \left( \frac{R_p}{a} \right)^2$$

dove  $p(\lambda, \alpha)$  è una funzione che tiene conto dell'inclinazione dell'orbita e delle proprietà dell'atmosfera del pianeta.

$\alpha$  è la distanza angolare del pianeta dalla stella.

**Da circa 16 anni luce di distanza il Sole è  $10^9$  volte più luminoso di Giove.**

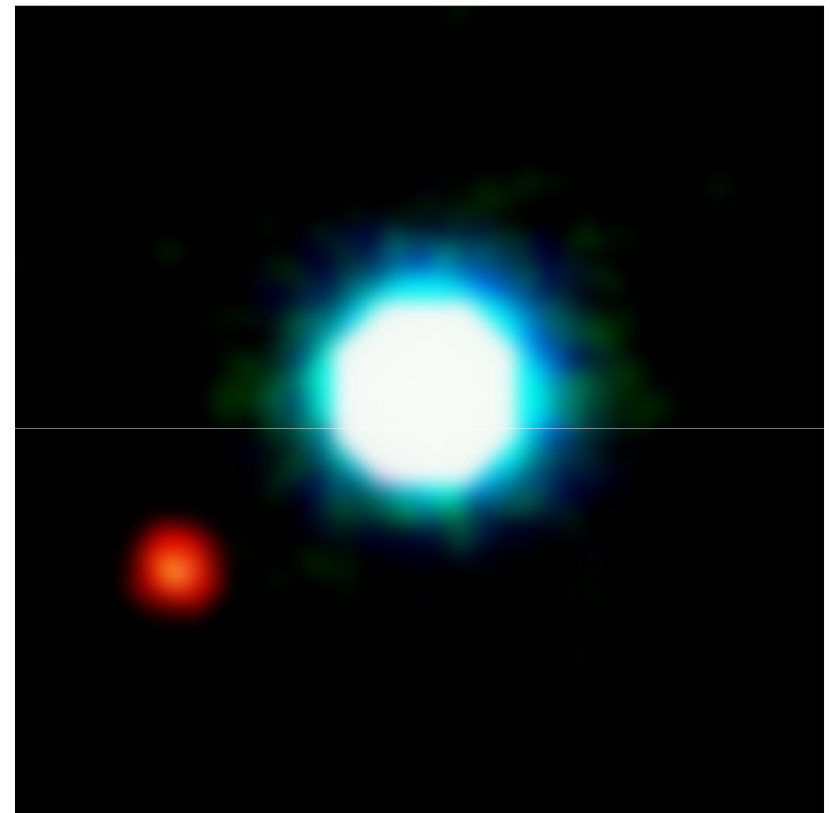
# Tecniche per la rilevazione

## Metodi diretti

A causa delle diverse temperature della stella e del pianeta, nell'infrarosso, il rapporto migliora di un fattore  $10^5$ .

*Per il sistema Sole-Giove ciò accade per  $\lambda = 20 \mu m$ .*

Problemi come la diffrazione dello strumento e il seeing atmosferico, nei moderni telescopi, vengono superati con tecniche molto sofisticate.



*2M1207 b, uno dei 24 pianeti extrasolari scoperti per osservazione diretta*

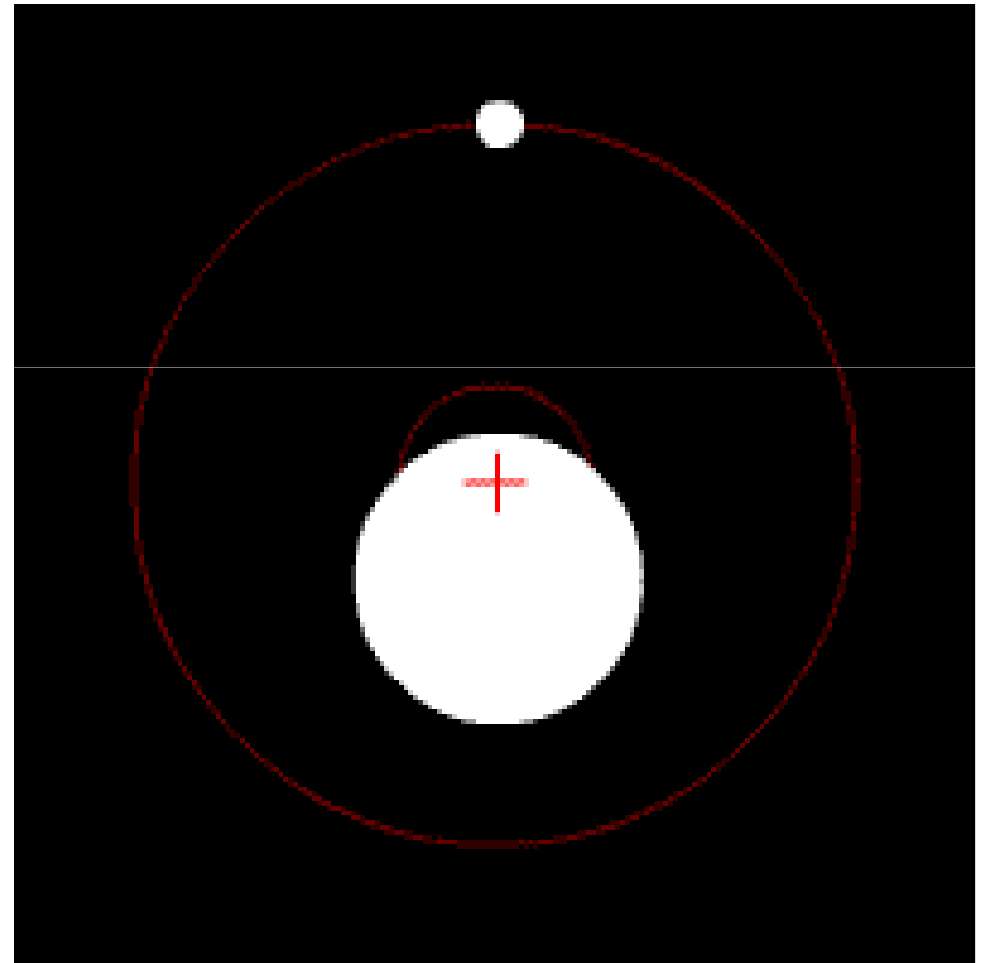
*La stragrande maggioranza dei pianeti extrasolari viene scoperta con metodi indiretti*

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

Consiste nella misurazione dello spostamento di una stella sulla sfera celeste dovuto alla presenza di un pianeta.

La proiezione del moto della stella, intorno al baricentro del sistema, su un piano perpendicolare alla linea di vista, è un'ellisse.



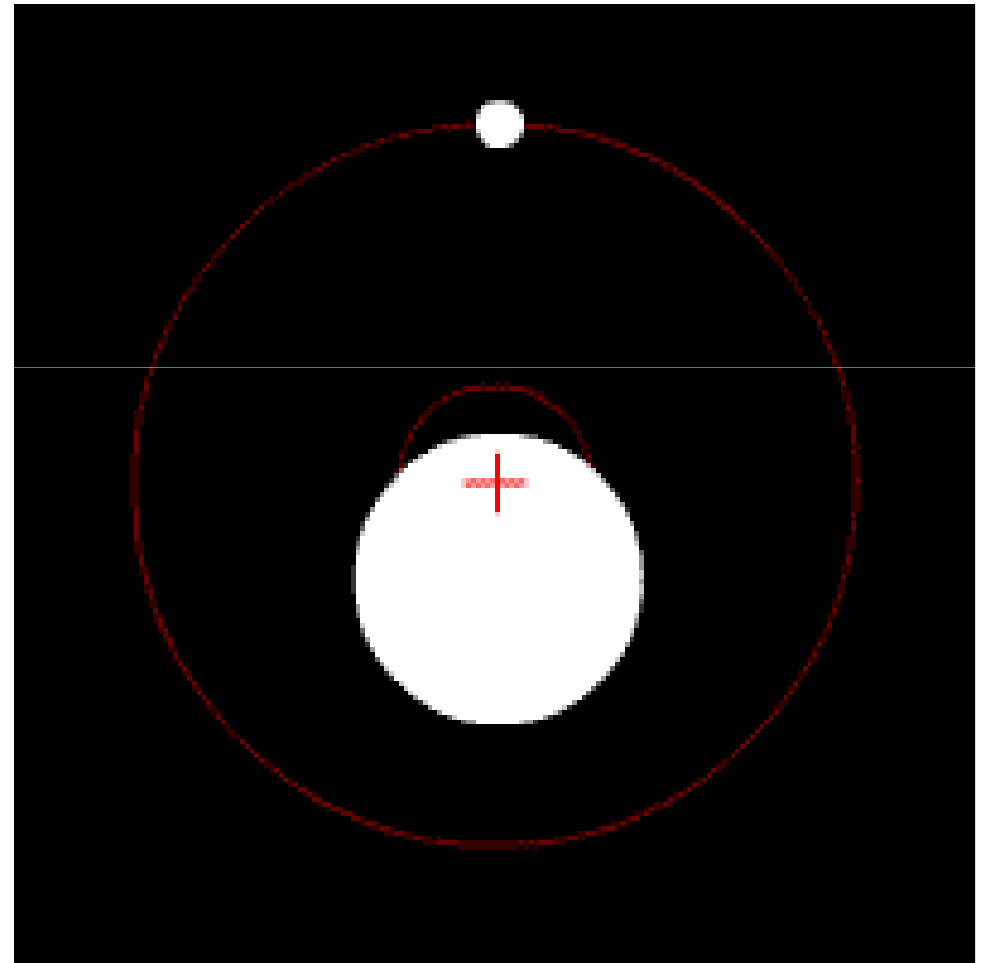
# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

*Giove, a 10 anni luce, provoca al Sole un'oscillazione di circa 3,2 millesimi di secondo d'arco in circa 12 anni.*

*La Terra, alla stessa distanza, solo 2 milionesimi di secondo d'arco.*

*Con questo metodo, al momento si potrebbero rilevare solo pianeti tipo Giove*





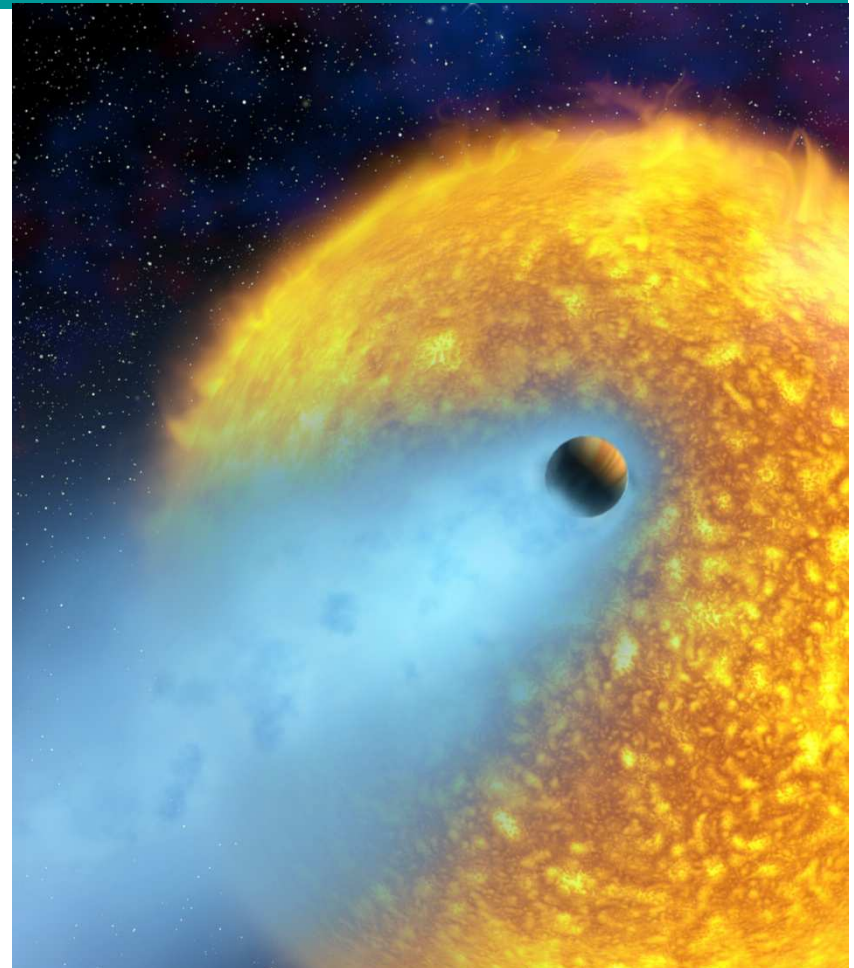
# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

Con questa tecnica si possono rilevare solo pianeti molto massicci e molto vicini alla propria stella: i cosiddetti **pianeti gioviani caldi** (**hot Jupiter**).

Un pianeta gioviano caldo ha una massa confrontabile con quella di Giove, ma orbita a meno di 0,05 UA (7,5 milioni di chilometri) dalla propria stella, ovvero è otto volte più vicino ad essa rispetto a quanto Mercurio disti dal Sole.

La temperatura tipica di questi oggetti, nella parte rivolta verso il loro sole, raggiunge facilmente migliaia di gradi.



*Rappresentazione artistica di HD 209458b.  
La coda blu è l'atmosfera del pianeta che  
evapora a causa della vicinanza eccessiva  
alla sua stella.*

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

Il Satellite **GAIA** (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), una missione spaziale astrometrica dell'ESA, compilerà un catalogo di circa un miliardo di stelle con l'obiettivo principale di effettuare misure astrometriche di altissima precisione.

Il satellite determinerà la posizione esatta di ogni stella in tempi diversi, ciò permetterà di effettuare senza dubbio scoperte di pianeti extrasolari con il metodo astrometrico.

La sonda è stata lanciata il 19 dicembre 2013.

Il satellite occuperà un'orbita attorno a L2.



*Rappresentazione artistica della missione dell'ESA GAIA*

# Tecniche per la rilevazione

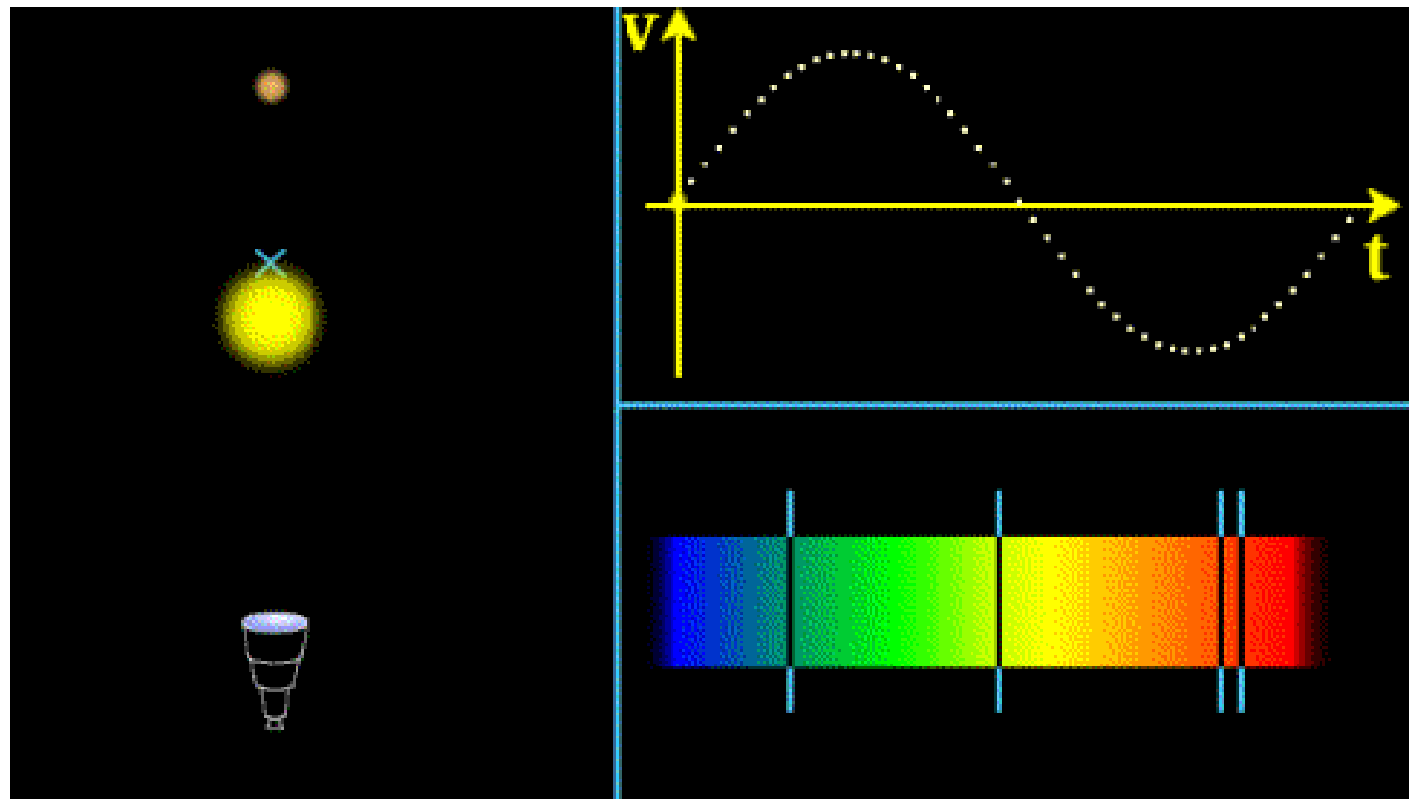
## Metodo della velocità radiale

La presenza di un pianeta intorno ad una stella produce in essa una variazione della componente radiale della velocità.

Analizzando gli spostamenti delle sue righe spettrali, dovuti all'effetto Doppler, si possono dedurre alcune caratteristiche fisiche del pianeta.

*Gli spostamenti dello spettro sono molto piccoli!*

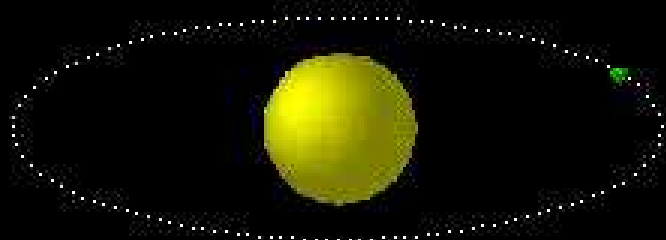
*Giove produce sul Sole uno spostamento delle righe di  $\sim 10^{-5}$  nm.*



# Tecniche per la rilevazione

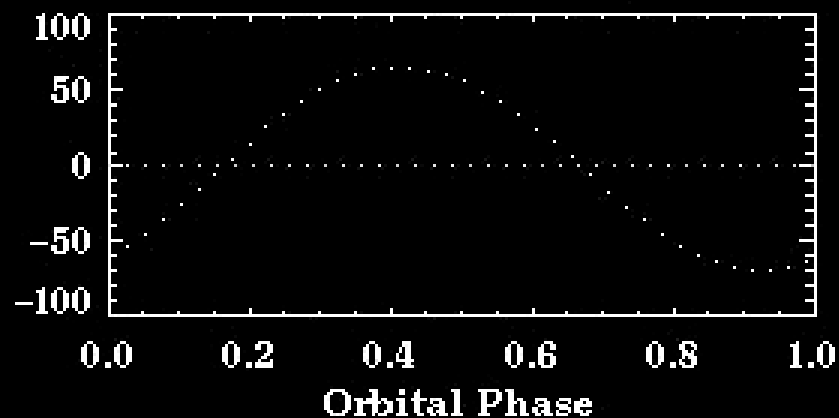
## Metodo della velocità radiale

Circular Orbit: rho CrB



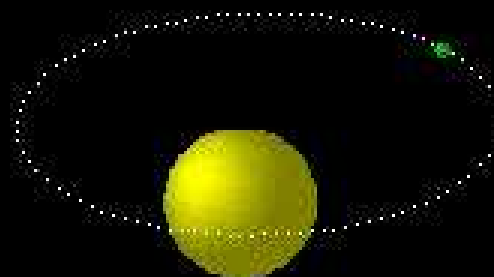
$K = 67.4 \text{ m/s}$        $e = 0.03$   
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$        $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve  
of the Star [m/s]



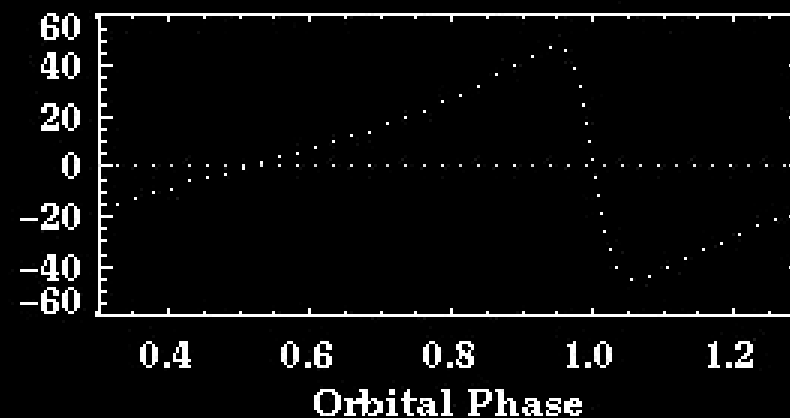
S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

Highly Eccentric Orbit: 16 Cyg B



$K = 46.6 \text{ m/s}$        $e = 0.67$   
 $\omega = 86.8 \text{ deg.}$        $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve  
of the Star [m/s]

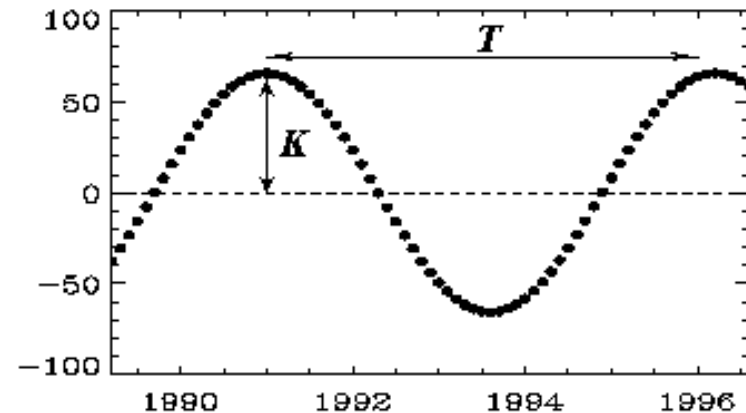


S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo della velocità radiale

Il modulo  $K$  dell'ampiezza dell'oscillazione della velocità radiale di una stella avente massa  $M_*$ , dovuta all'interazione con un oggetto di massa  $M_p$ , è dato da



$$K = \left( \frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_*)^{2/3}} (1 - e^2)^{-1/2}$$

Dove  $T$  ed  $e$  sono il periodo e l'eccentricità dell'orbita e  $i$  è l'angolo che il piano orbitale forma con il piano perpendicolare alla linea di vista (osservatore - stella).



# Tecniche per la rilevazione

## Metodo della velocità radiale

Dalla misurazione della variazione della velocità radiale si deduce il periodo  $T$  e l'eccentricità; essendo  $M_p \ll M_*$ , dalla terza legge di Keplero si ricava il semiasse maggiore dell'orbita. Si ottiene quindi una stima dalla massa del pianeta:

$$M_p \sin i \cong \left( \frac{T}{2\pi G} \right)^{1/3} \cdot K \cdot M_*^{2/3} \sqrt{1-e^2}$$

Nella maggior parte dei casi non si conosce l'angolo di inclinazione dell'orbita  $i$  e quindi si può determinare solo un limite inferiore per la massa.

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo della velocità radiale

Oltre alla stima della massa del pianeta, la conoscenza dell'intera curva della velocità radiale porta alla determinazione dei parametri di un'orbita kepleriana:

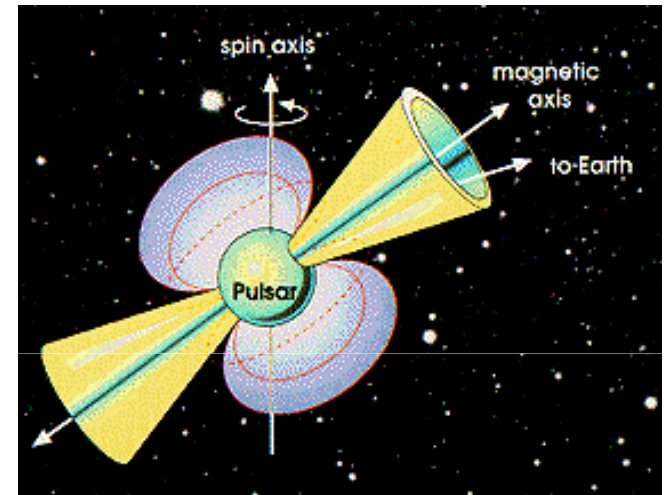
- la velocità del centro di massa del sistema (detta **velocità sistemica**)
- la semiampiezza della velocità
- il periodo orbitale (e quindi il semiasse maggiore)
- l'epoca del passaggio al periastro
- l'eccentricità
- l'argomento del periastro.

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo del Pulsar Timing

Il metodo consiste nella misurazione delle variazioni degli intervalli di emissioni di una pulsar.

Una pulsar (il residuo piccolo e ultradenso di una stella che è esplosa in una supernova) ruotando emette onde radio a intervalli estremamente regolari.



Essenzialmente esistono due tipi di pulsar:

- **Normal Pulsar**, con periodi di rotazione dell'ordine del secondo
- **Millisecond Pulsar**, con periodi dell'ordine del millisecondo

# La luminosità dei corpi celesti

# La magnitudine assoluta e relativa

L'illuminamento di uno schermo diminuisce in modo proporzionale al quadrato della distanza tra lo schermo e la sorgente luminosa.

Se prendiamo una lampada da 100 W e la spostiamo dalla distanza di 1 m da noi a 2 m, l'illuminamento che ne riceviamo diventa un quarto.

Definiremo *luminosità intrinseca*  $L$ , di una sorgente la potenza totale della sorgente, ossia l'energia radiante totale emessa in un secondo e chiameremo *flusso*  $F$  attraverso una superficie  $S$  l'energia che attraversa  $S$  in un secondo in direzione normale. Si definisce invece *intensità luminosa* il flusso per unità di area attraversata.

Si chiama *magnitudine* (o anche *grandezza*) una quantità legata alla luminosità delle stelle.

La *magnitudine relativa*  $m$  è la magnitudine di un oggetto celeste misurata da Terra.



# La magnitudine assoluta e relativa

Ipparco aveva suddiviso le stelle visibili ad occhio nudo in 6 classi di magnitudini: le stelle più brillanti erano dette di prima grandezza, quelle appena visibili ad occhio nudo erano di 6<sup>a</sup> grandezza e le altre venivano classificate entro questi due estremi.

Oggi possiamo dire che le stelle di prima grandezza sono circa 100 volte più luminose di quelle appena visibili ad occhio nudo.

La relazione tra la magnitudine delle stelle e la loro luminosità, che conserva la classificazione di Ipparco, è nota come *legge di Pogson* :

$$m = m_0 - 2.5 \log \frac{F}{F_0}$$

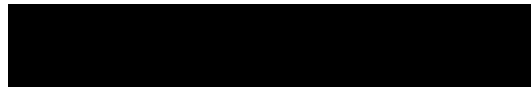
Se  $S$  è una stella di prima grandezza (ossia di magnitudine 1) ed  $S_0$  è una stella appena visibile a occhio nudo (ossia di magnitudine 6), utilizzando la classificazione di Ipparco deve essere  $m - m_0 = -5$ .

Inoltre risulta  $F/F_0 = 100$ . Da ciò si comprende perché viene scelto il coefficiente -2,5.

# La magnitudine assoluta e relativa

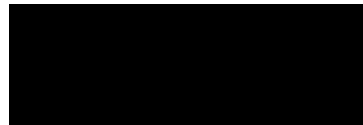
Si chiama *magnitudine assoluta*  $M$  la magnitudine che avrebbe un oggetto celeste se fosse posto alla distanza convenzionale di 10 pc.

Tra la magnitudine relativa, la magnitudine assoluta e la distanza dell'oggetto esiste la relazione:

A solid black rectangular box used to redact the equation relating absolute magnitude, relative magnitude, and distance.

Per le stelle vicine conosciamo la magnitudine relativa e la distanza  $d$  (da misure di parallasse) è quindi possibile determinare  $M$ .

Se una stella è così lontana che la misura di parallasse è impossibile, ma se esiste un metodo per misurare la magnitudine assoluta  $M$ , allora si può determinare la distanza  $d$  (in pc):

A solid black rectangular box used to redact the equation for determining distance from absolute magnitude.

$\mu = m - M$  è detto *modulo di distanza*.

L'applicazione della relazione ora data non è così semplice. E' difficile ricavare  $M$ ; inoltre lungo la linea di vista si possono interporre gas o polveri, che assorbono o diffondono parte della radiazione inviata dall'oggetto verso la Terra. In questo modo il valore di  $m$  viene falsato.

# Effetto Doppler

Se una locomotiva ci passa accanto fischiando, mentre si avvicina udiamo un sibilo più acuto che diventa improvvisamente più grave quando la sorgente sonora comincia ad allontanarsi.

Un effetto analogo vale anche per le onde luminose che provengono da una sorgente in moto. Esse sono spostate verso il violetto (piccole lunghezze d'onda) se la sorgente si avvicina, verso il rosso (grandi lunghezze d'onda) se la sorgente si allontana.

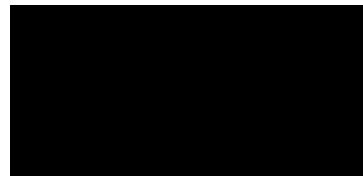


# Redshift e bluishift

Le righe spettrali degli oggetti celesti presentano generalmente uno spostamento verso la parte rossa (**redshift**) o verso la parte violetta dello spettro (**bluishift**).

Interpretando questo fenomeno come effetto Doppler, nel primo caso l'oggetto si allontana, nel secondo si avvicina; conoscendo lo spostamento delle righe spettrali è possibile misurarne la velocità radiale (cioè lungo la congiungente osservatore-oggetto).

La teoria della relatività fornisce le formule pertinenti; se la luce di lunghezza d'onda  $\lambda$  viene inviata da una sorgente che si muove alla velocità  $v$  verso un osservatore fermo, questi misura una lunghezza d'onda:

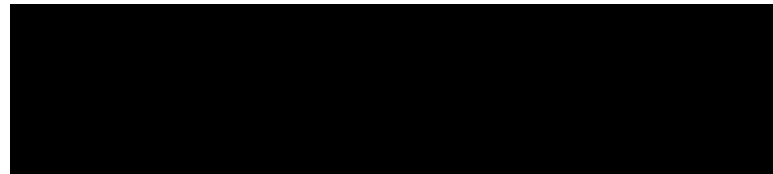


# Il redshift

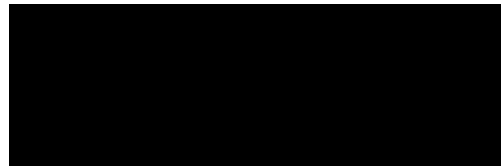
Definiamo **redshift** la quantità:


$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

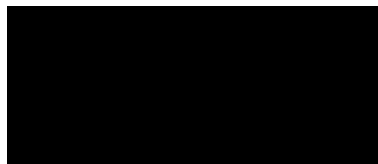
Si ha:


$$v = c \cdot z$$

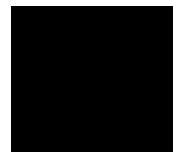
Quindi la velocità della sorgente è data da:


$$z = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1$$

Se  $v \ll c$  allora le relazioni possono essere semplificate:


$$z \approx \frac{v}{c}$$

da cui


$$v \approx c \cdot z$$

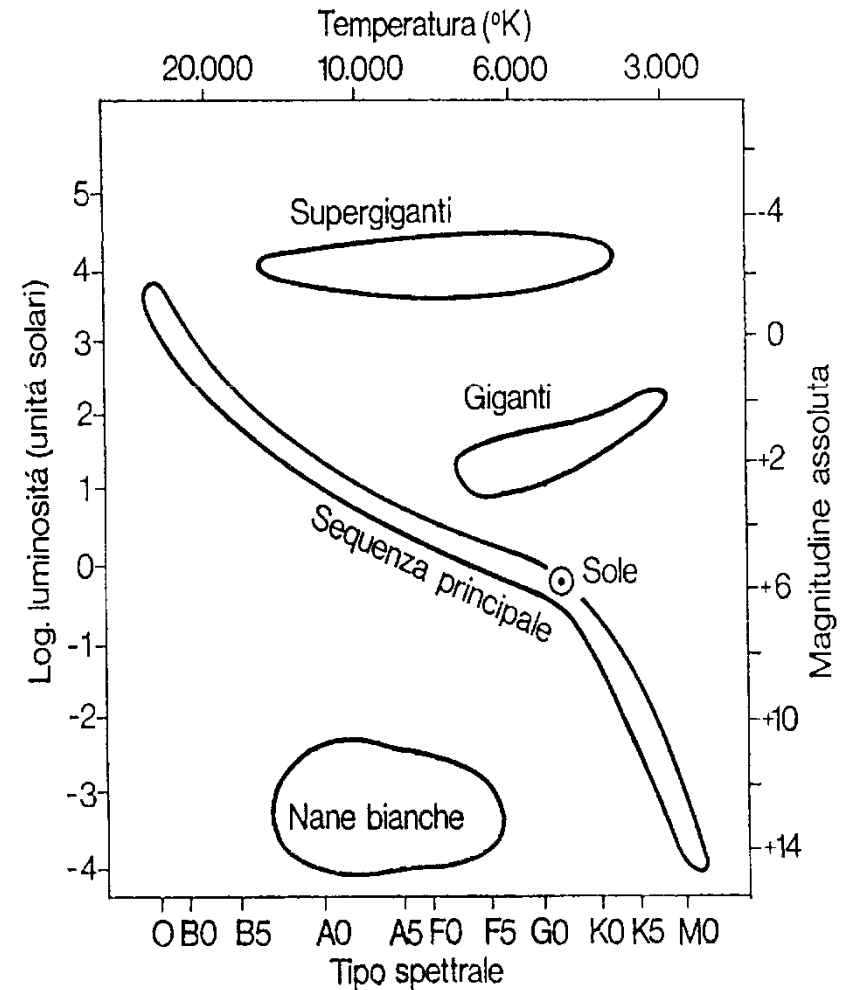
quindi


$$\lambda \approx \lambda_0 (1+z)$$



# Diagramma di Hertzsprung-Russell

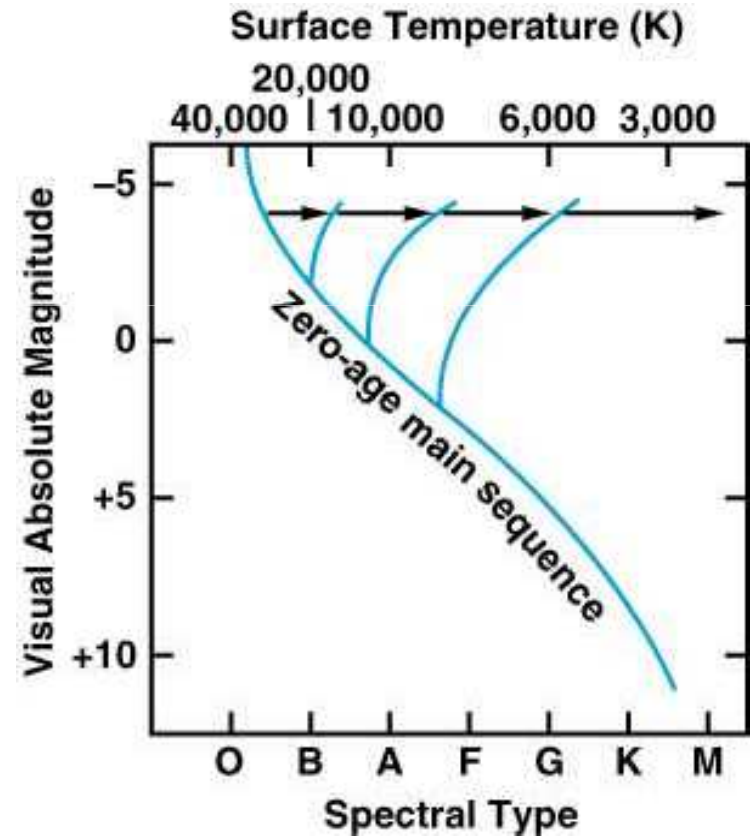
- Nel 1913 il danese Hertzsprung e l'americano Russel costruirono un grafico dove in ascissa riportarono l'indice di colore (una grandezza legata alla temperatura superficiale della stella) e in ordinata la magnitudine assoluta di stelle di distanza nota.
- Le stelle non si raggruppano a caso ma si concentrano in due regioni ristrette (la sequenza principale e il ramo delle giganti)
- La separazione CORRISPONDE a DIVERSI STADI EVOLUTIVI



# Diagramma di Hertzsprung-Russell

## Principali ambiti di applicazione

- Studio di: composizione chimica, tipo di combustione e fasi evolutive per le stelle
- "Istantanee" evolutive di un ammasso stellare (isòcrone) e determinazione della sua età



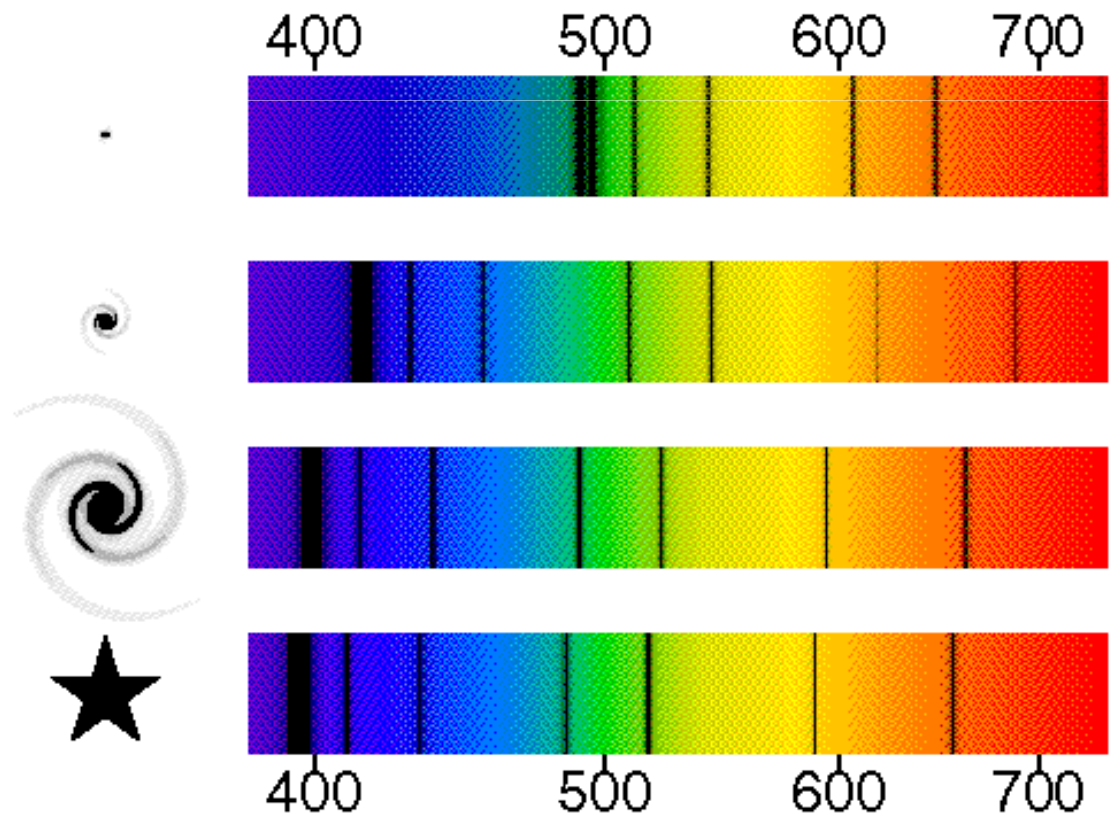
# SPETTROSCOPIA E COSMOLOGIA

Verso la fine del 1800 primi del 1900 vennero fatte alcune importanti scoperte.

Alcune stelle variabili (le cefeidi) hanno il periodo di variazione legato alla magnitudine assoluta.

Negli oggetti celesti sono osservabili delle righe spettrali caratteristiche degli elementi chimici noti sulla Terra

Nel 1912 si scoprì che le galassie presentano uno spostamento verso il rosso (red shift) delle righe spettrali.



# La legge di Hubble

Intorno al 1920 Hubble riuscì a distinguere stelle Cefeidi di alcune galassie e ne determinò la distanza scoprendo che erano extragalattiche.

Nel 1929 propose di interpretare lo spostamento verso il rosso come effetto Doppler; mettendo in relazione la distanza  $d$  (determinata col metodo delle Cefeidi) e la velocità radiale  $v$  (determinata con lo spostamento verso il rosso).

Trovò la seguente legge (*Legge di Hubble*):

$$v = H_0 \cdot d,$$

dove  $H_0$  è una costante detta *costante di H*

