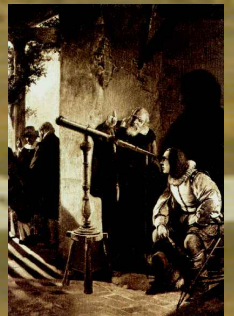




TELESCOPI

- *Ottica di base*
- *Scala dell'immagine*
- *Risoluzione*
- *Configurazioni ottiche*
- *Aberrazioni*
- *Montature*
- *Ottiche speciali*



Le due principali proprietà dei telescopi

$$\textit{Raccolta di luce} \propto (\textit{Apertura})^2$$

Incremento di magnitudine (rispetto all'occhio):

$$\Delta m \approx 5 \log A(\textit{mm}) - 4.22$$

Risoluzione (capacità di separare due oggetti angolarmente vicini)

$$\propto \frac{1}{\textit{Apertura}}$$

Alcune definizioni

APERTURA: Diametro della lente o dello specchio, A,D (in mm, cm, m, inches, es 8")

DISTANZA FOCALE (o **FUOCO**): Distanza dalla lente o dallo specchio in cui convergono i raggi luminosi di una sorgente posta all'infinito, F, f.

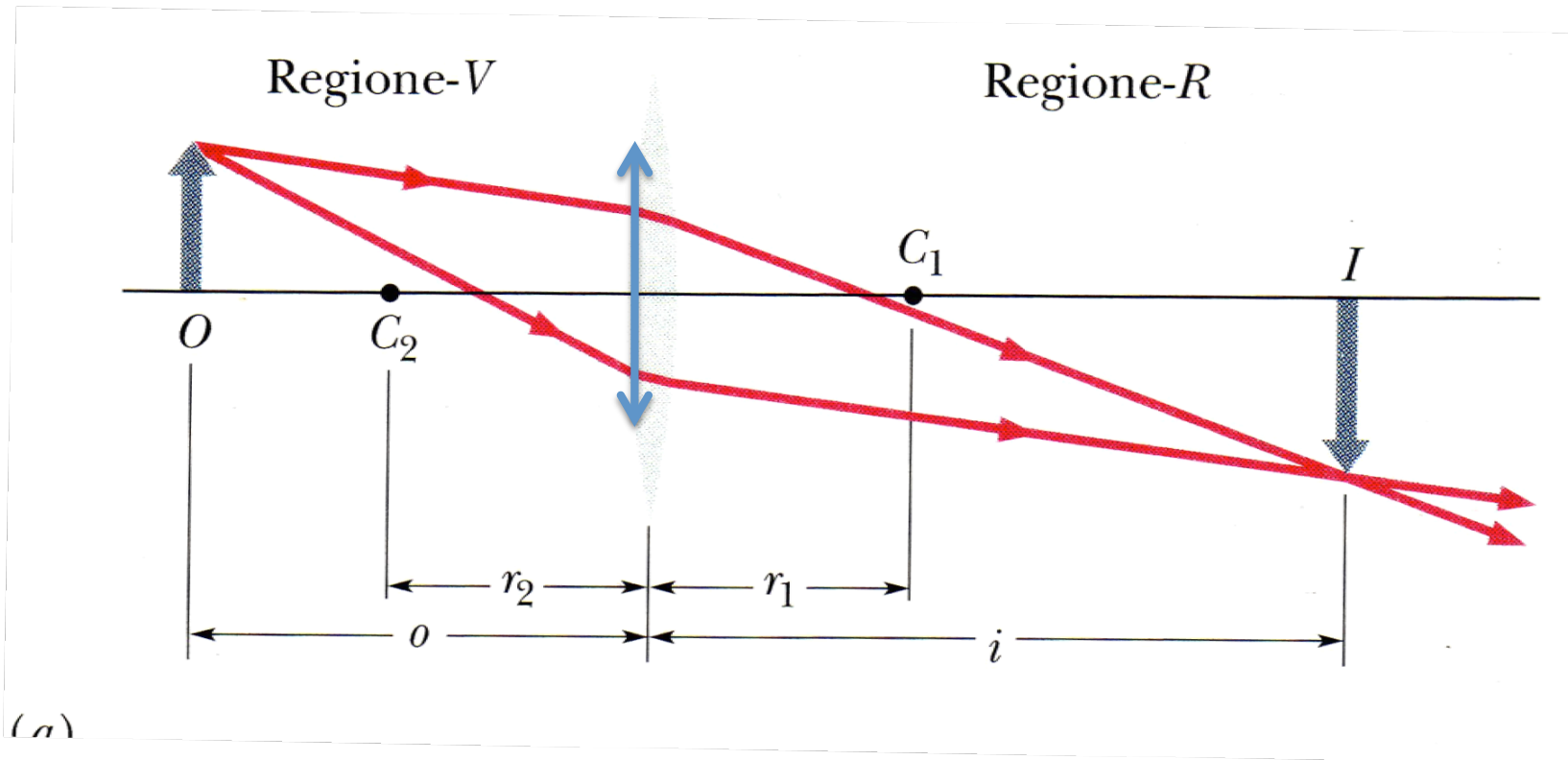
(**Focale equivalente**: distanza a cui viene visto l'obiettivo dal fuoco)

RAPPORTO DI APERTURA: Rapporto tra la Distanza Focale e l'Apertura: $f/$ (es. $f/10$)

LUMINOSITA' (di un Telescopio): è legata al suo Rapporto di Apertura: Minore è il Rapporto di Apertura, maggiore la Luminosità.

CAMPO DI VISTA (**Field of View, FOV**): la porzione di cielo (in gradi X gradi) inquadrata dal sistema ottico (telescopio + oculare, telescopio + CCD, etc.)

Fuoco di una lente sottile

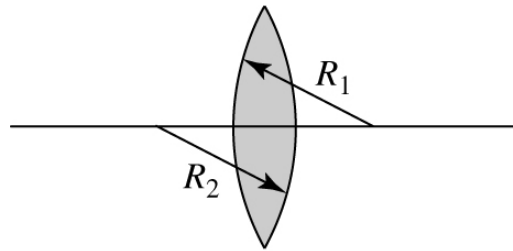


$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

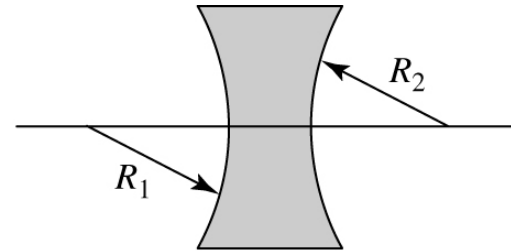
Per i Telescopi $i=f$: La posizione dell'immagine è SEMPRE il fuoco

Lens maker's formula

$$\frac{1}{f} = (n_{\lambda} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



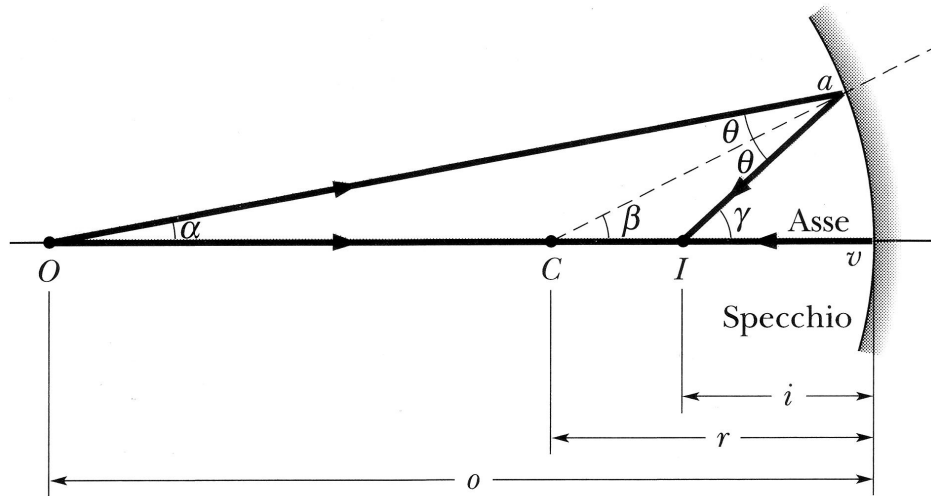
(a)



(b)

Se $R_1 = R_2 = R$, $f = R/2(n-1)$

Fuoco di uno specchio sferico



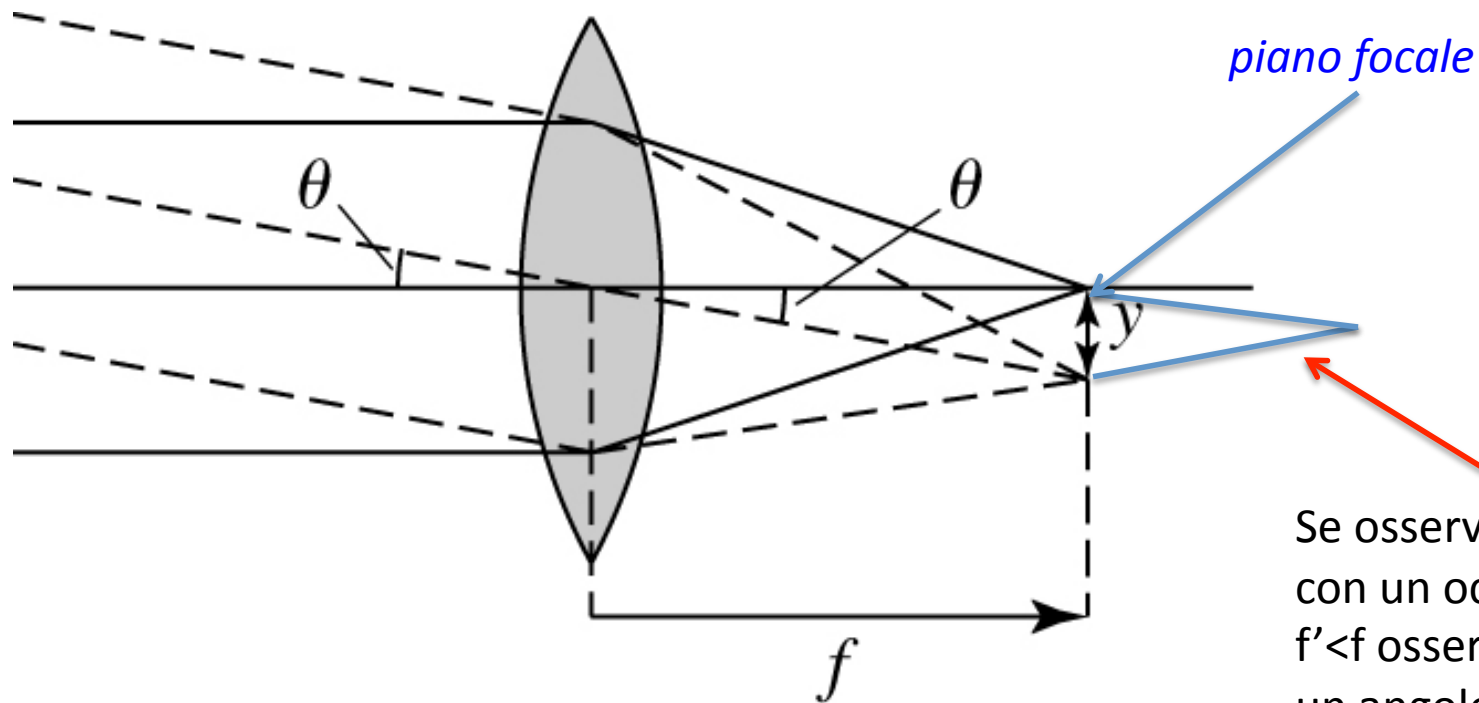
Come per le lenti sottili:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

***In questo caso:
 $f = r/2$ sempre***

*Vale per piccoli angoli e per
raggi vicini all'asse ottico*

Scala dell'immagine



$$y = f \cdot \operatorname{tg} \theta \approx f \cdot \theta$$

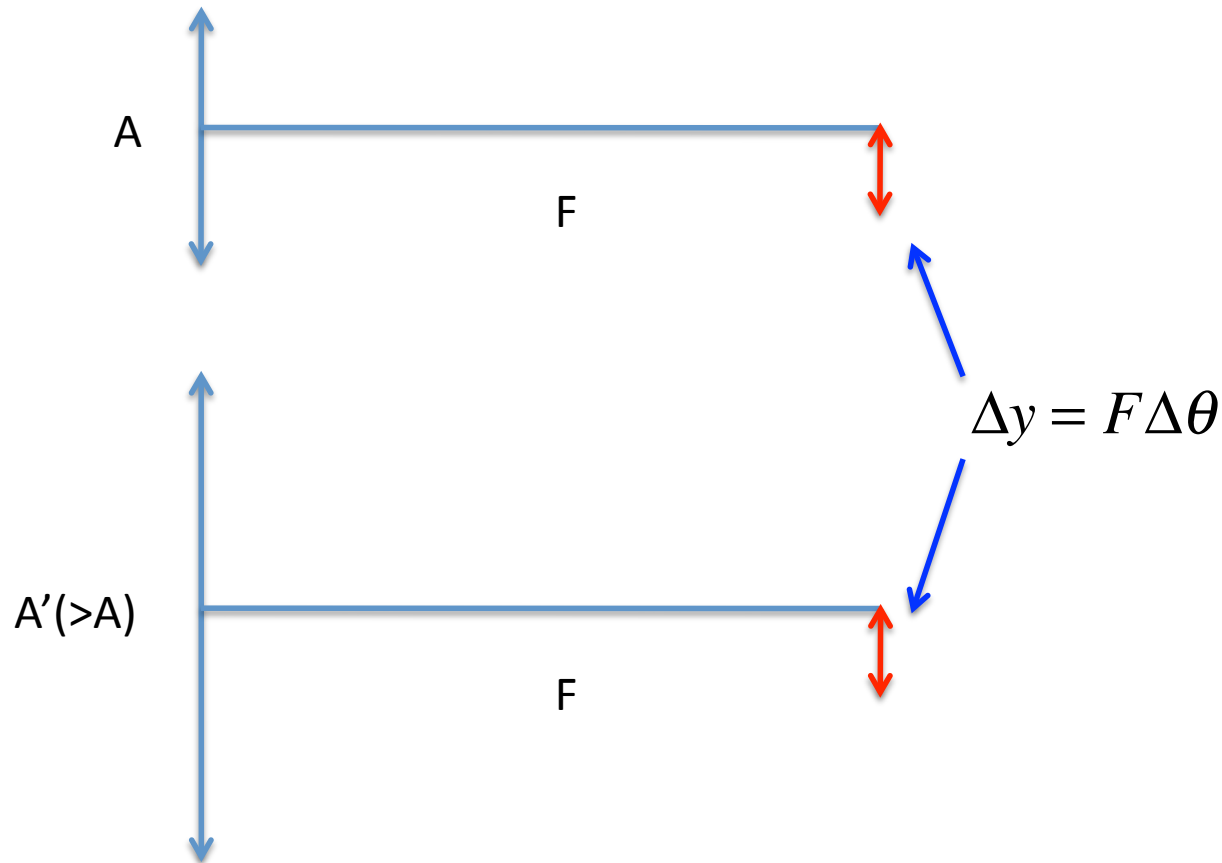
$$\frac{dy}{d\theta} = f \rightarrow \frac{\Delta\theta}{\Delta y} = \frac{1}{f}$$

Se osserviamo l'immagine con un oculare di focale $f' < f$ osserveremo Δy sotto un angolo $\Delta\theta' > \Delta\theta$.
Il rapporto $\Delta\theta' / \Delta\theta = f / f'$ fornisce

l'INGRANDIMENTO

Tipicamente in arcsec/mm (ma con CCD in arcsec/pixel)

A parità di f l'immagine ha la stessa dimensione sul piano focale, a prescindere dall' Apertura



... ma nel secondo caso
nell'immagine è raccolta
più luce

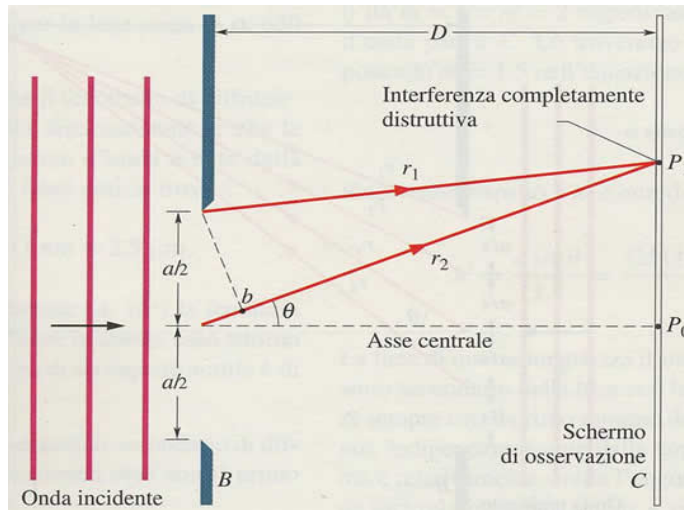
$$f'/ = F/A' < f/ = F/A:$$

Più piccolo è il rapporto focale più il telescopio è “luminoso”

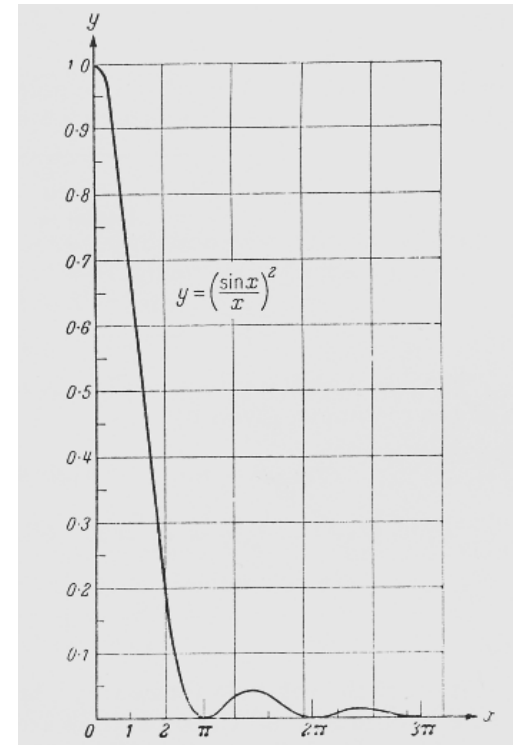
In linea di principio aumentando F potremmo avere un'immagine grande a piacere...

Ma esiste un limite di diffrazione

Diffrazione da fenditura



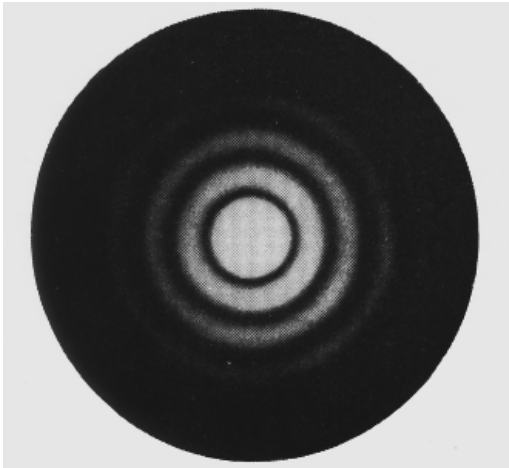
$$\sin \theta = m \cdot \frac{\lambda}{D}$$



Una sorgente puntiforme posta all'infinito produce sempre un'immagine di larghezza angolare finita !

Nel caso dei telescopi: diffrazione da apertura circolare

Diffrazione da apertura circolare

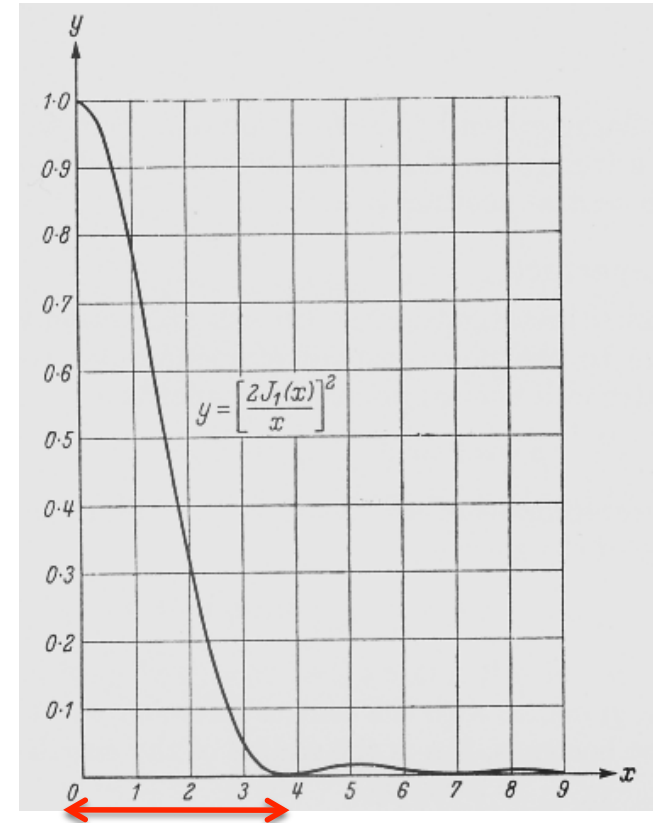


Pattern di Airy (1835)

*Criterio di
risoluzione di
Rayleigh:*

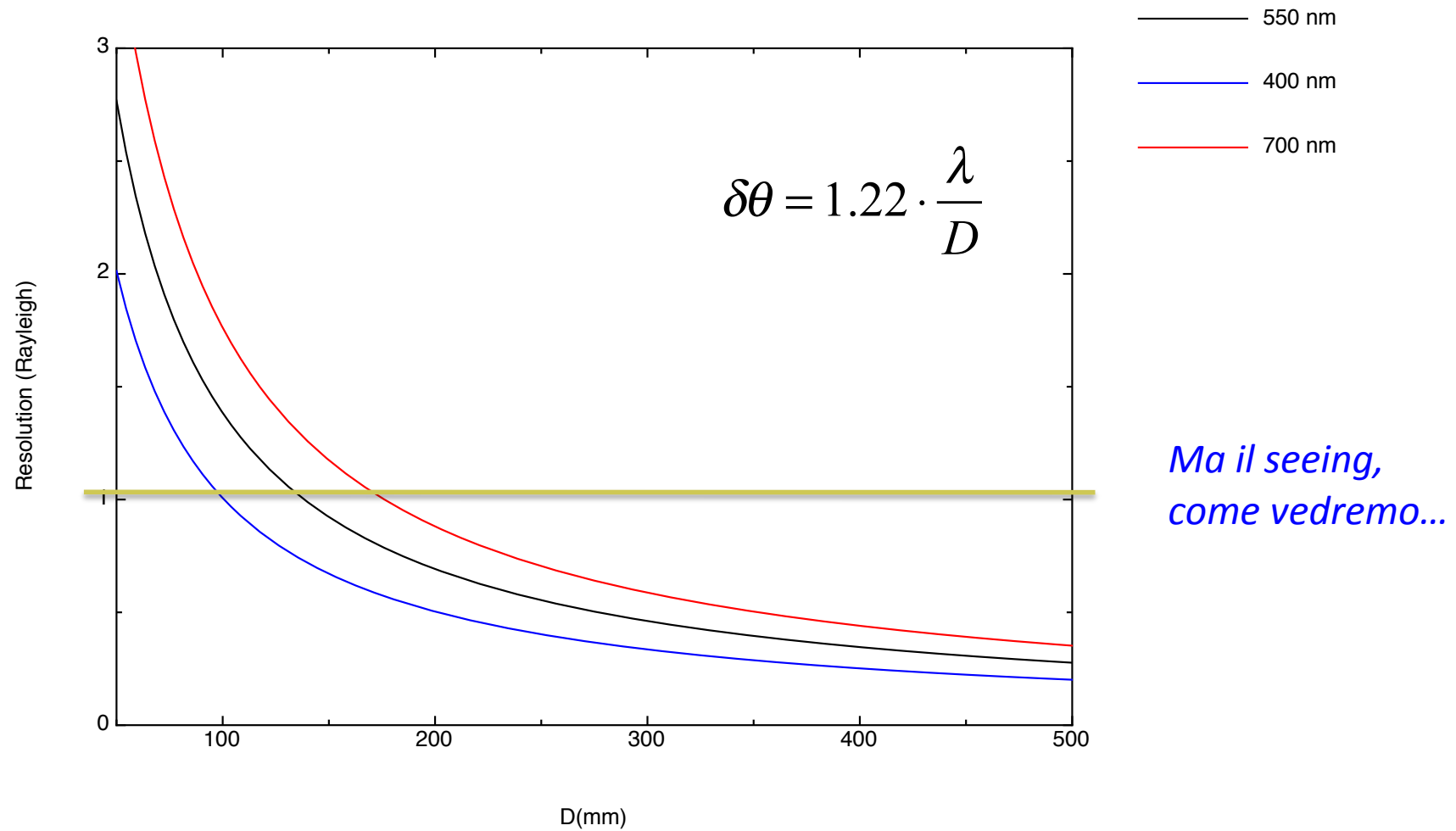


Al diminuire di $\delta\theta$ migliora la risoluzione: si distinguono stelle altrimenti non risolte



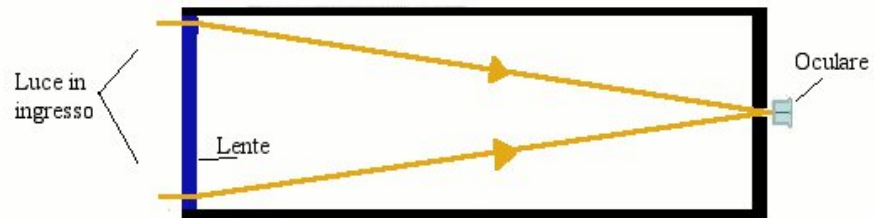
$$\delta\theta = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Risoluzione – secondo il criterio di Rayleigh – in funzione dell'Apertura

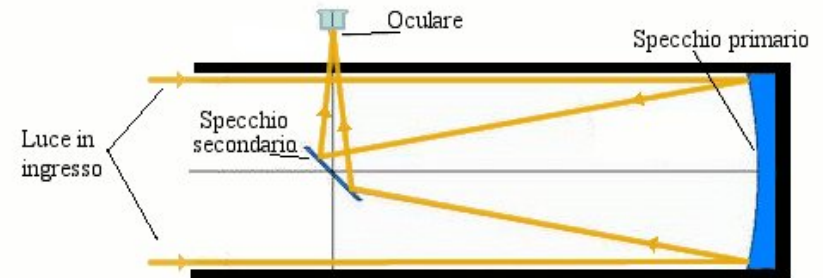


DUE GRANDI CATEGORIE DI TELESCOPI

RIFRATTORI

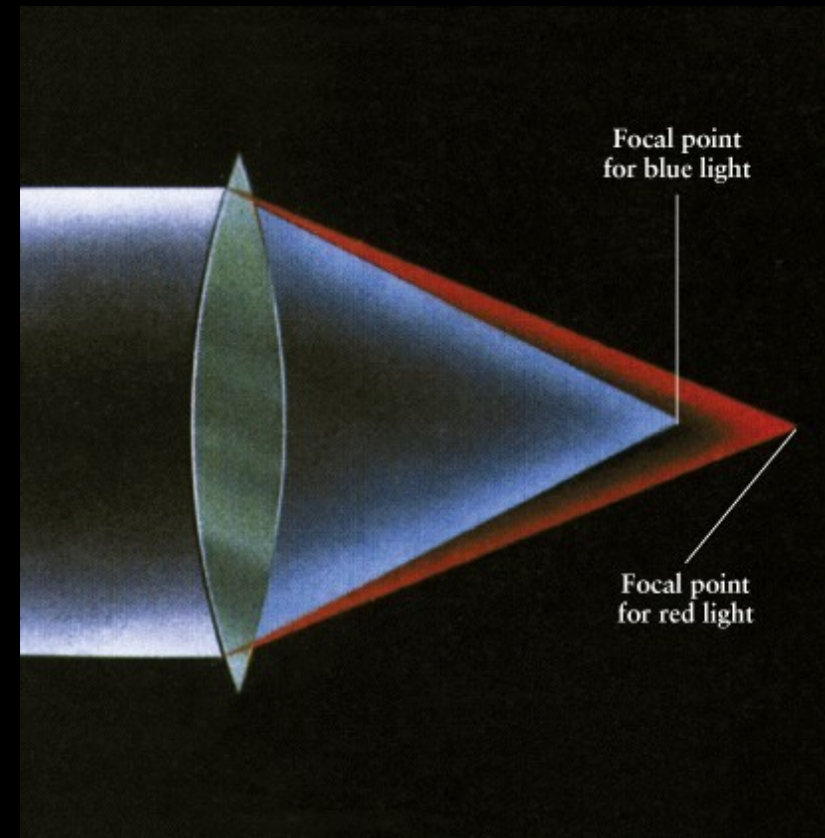
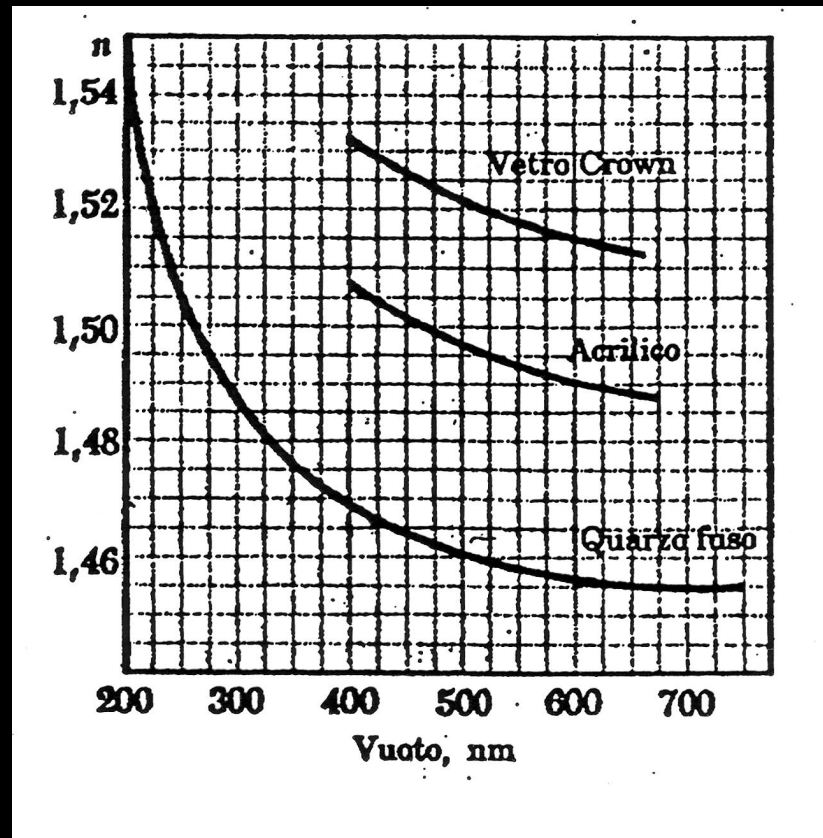


RIFLETTORI

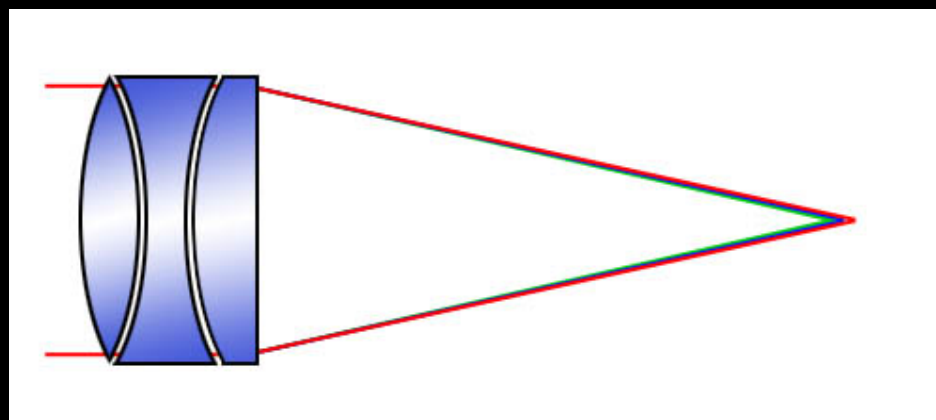
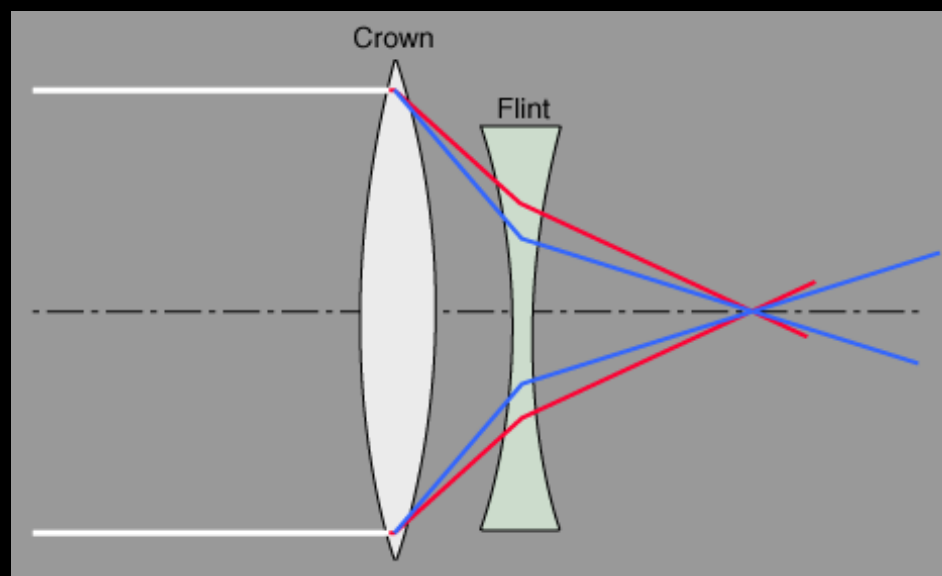


$n = n(\lambda)$: Nelle lenti, è presente
l'aberrazione cromatica.

Essa è dovuta alla dipendenza dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda della radiazione.

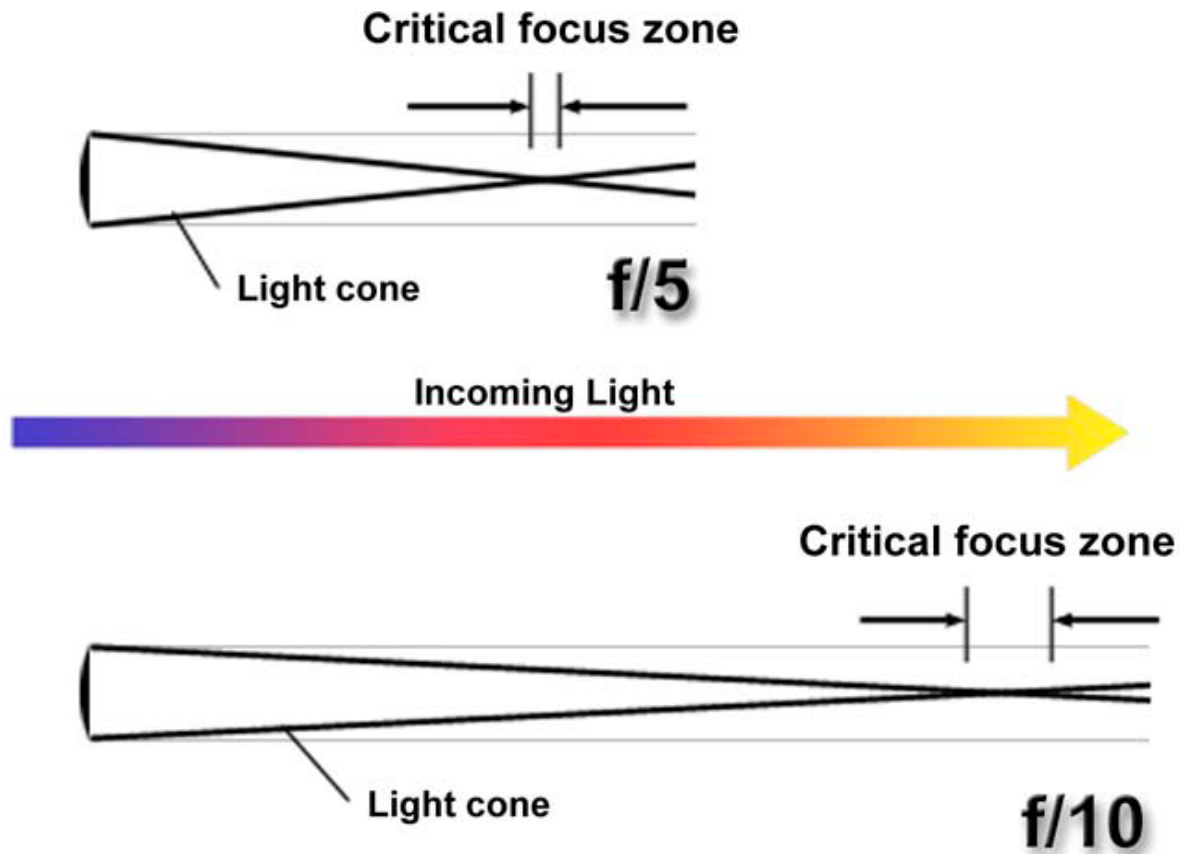


L'aberrazione cromatica nelle lenti si corregge costruendo doppietti o tripletti costituiti da lenti realizzate con vetri diversi: telescopi acromatici e apocromatici

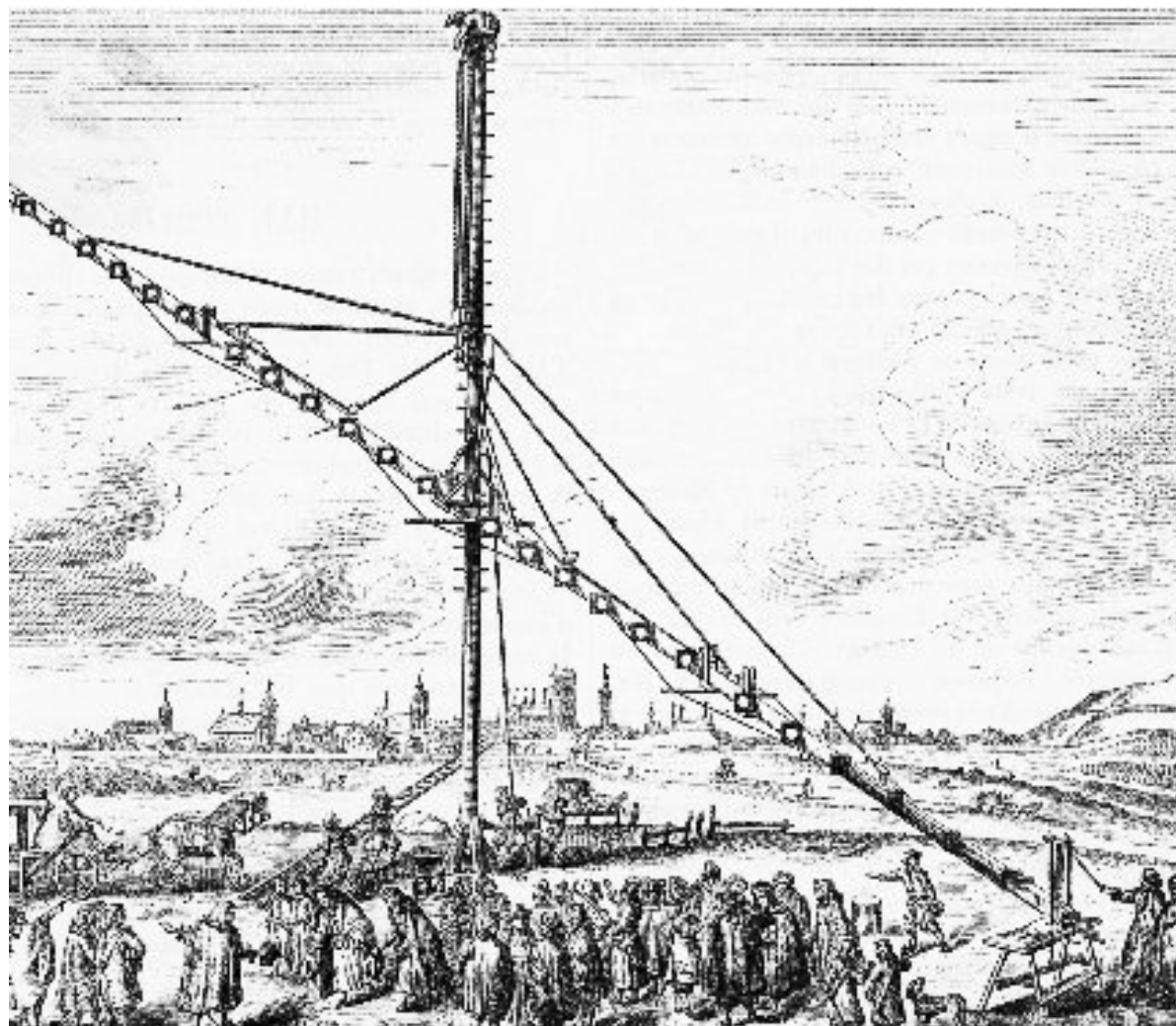


Critical Focus Zone

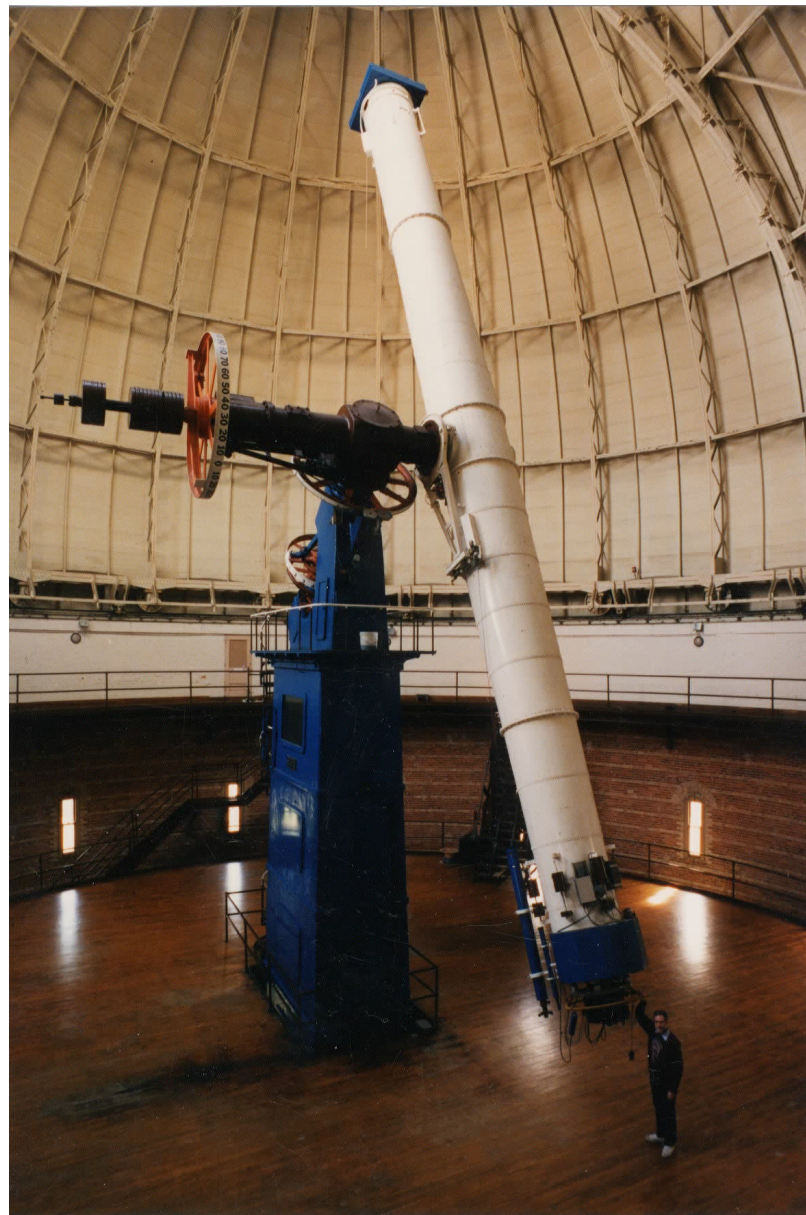
$$CFZ(\mu m) = f^2 2.2$$



Negli antichi rifrattori – che usavano una sola lente – si utilizzavano rapporti focali enormi...



Il più grande rifrattore mai costruito: Yerkes Chicago University, 1895.

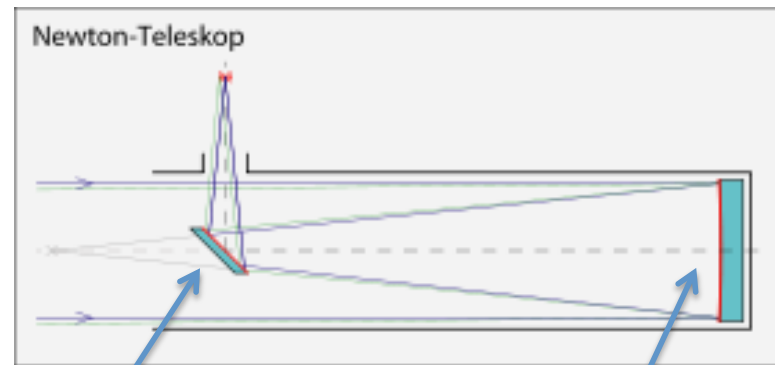


Per problemi di peso, facilità di realizzazione, assenza di cromatismo, tutti i grandi telescopi moderni sono Riflettori



Prendono spunto dal primo tipo di telescopio di questo tipo, realizzato da Newton

Configurazione newtoniana classica:

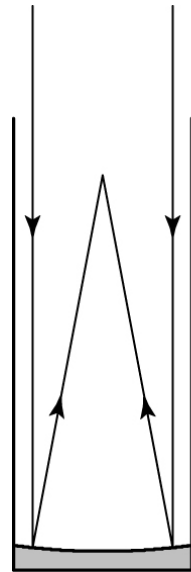


Specchio secondario
piano (secondario)

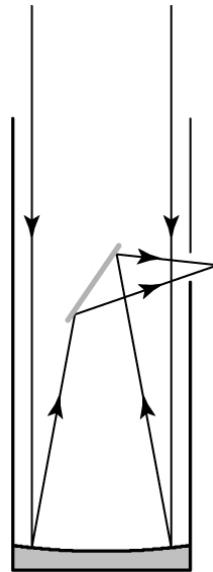
Specchio primario
sferico (primario)

Configurazioni ottiche riflettori

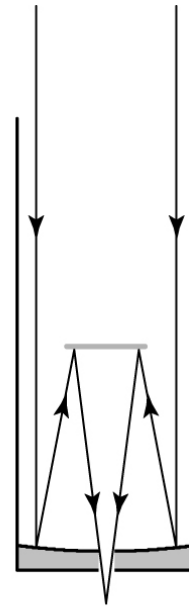
*Newtoniano
al fuoco
primario*



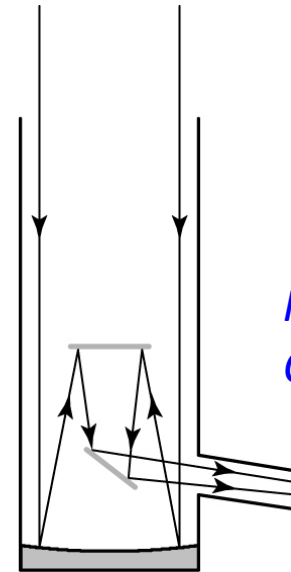
(a)



(b)



(c)



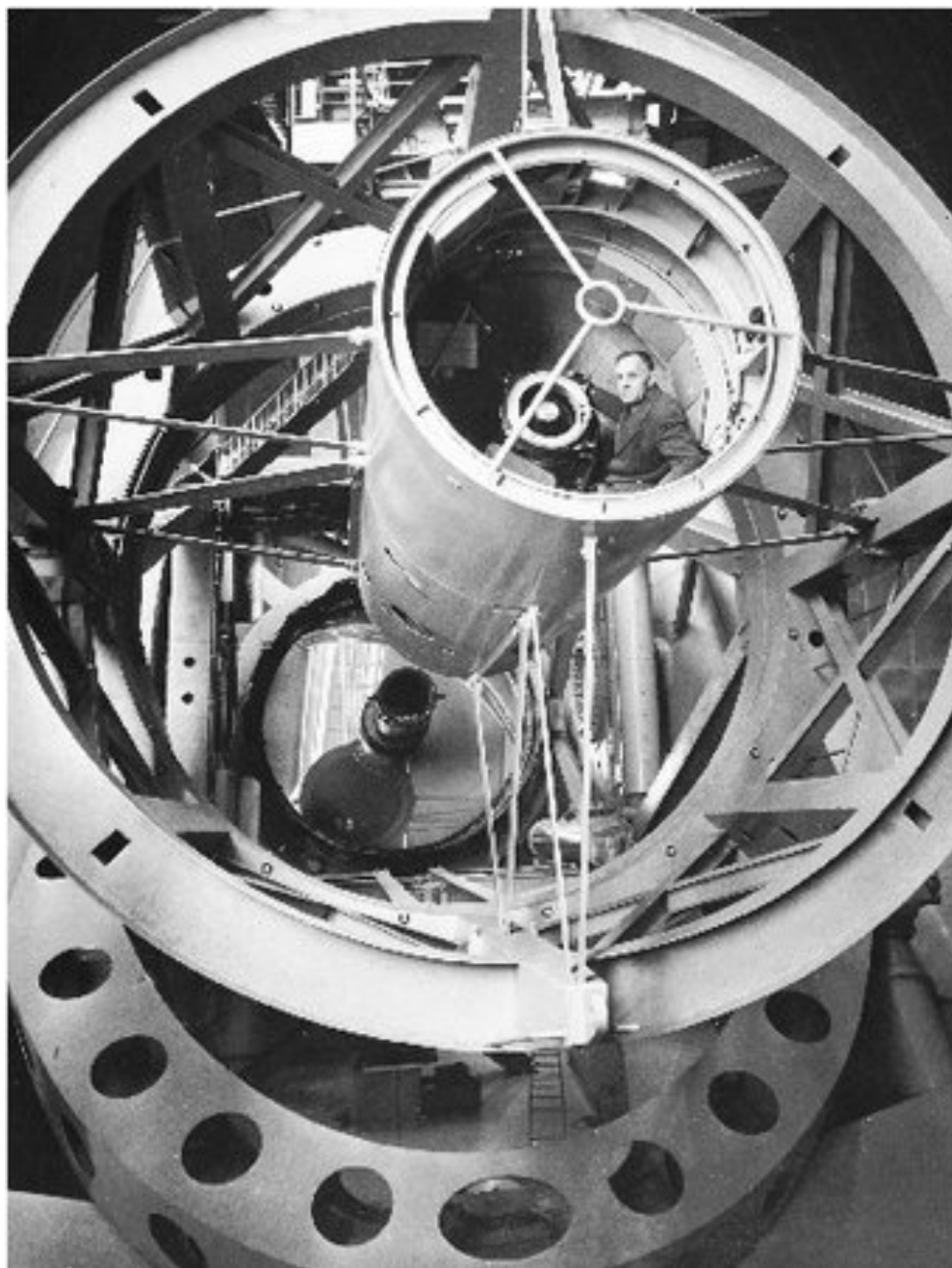
(d)

*Fuoco Nasmyth/
Coudé*

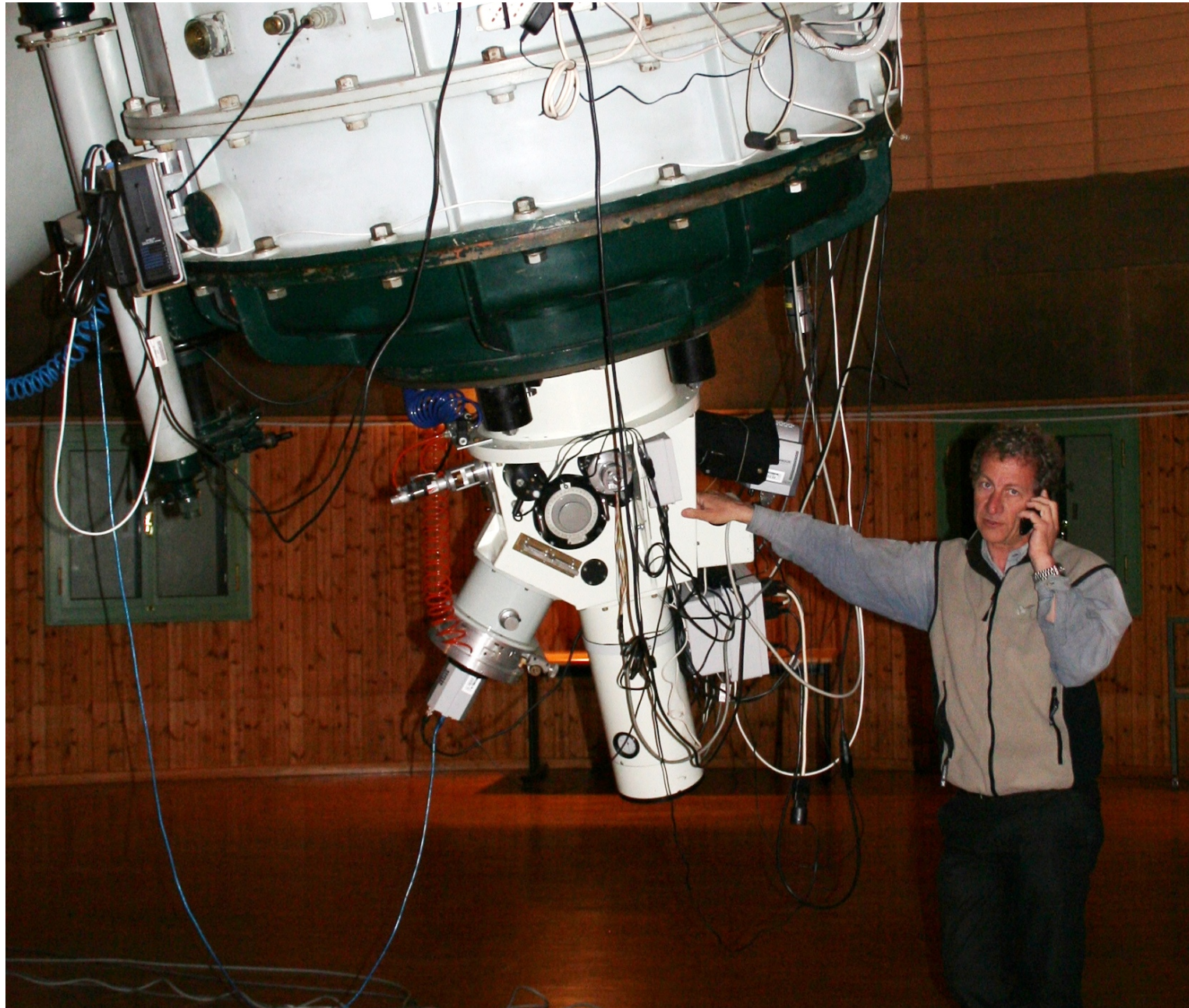
*Fuoco Newton
classico*

Fuoco Cassegrain

Hubble al fuoco primario del telescopio Hale di Mount Palomar

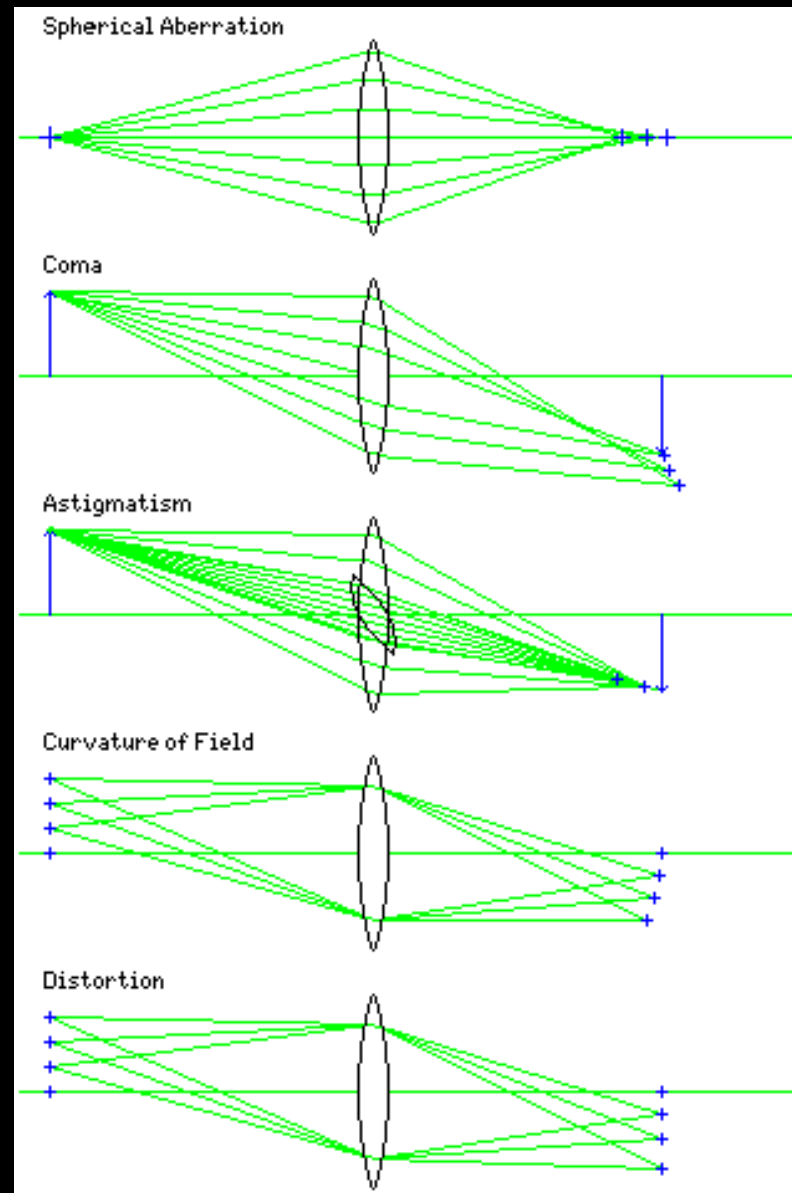


Spettroscopio al fuoco Cassegrain del Telescopio Galileo di Asiago



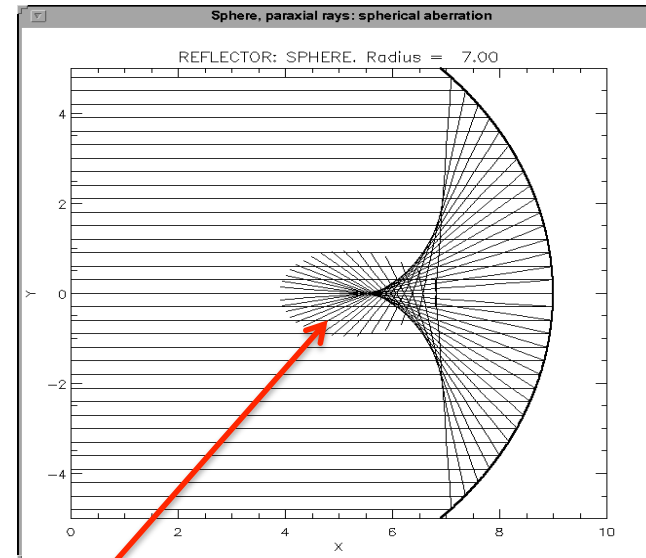
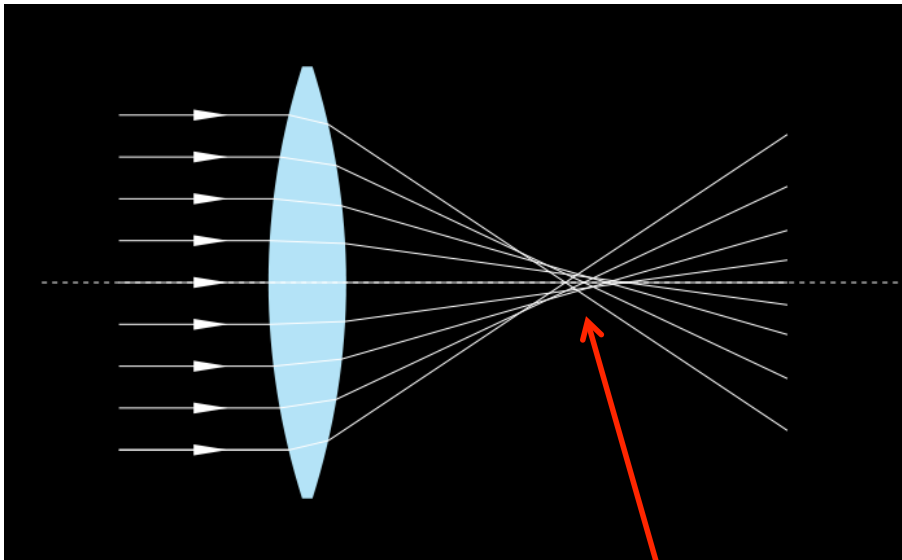
Tutti i sistemi ottici sono soggetti ad ABERRAZIONI

*Le cinque
aberrazioni di
Seidel (1856)*



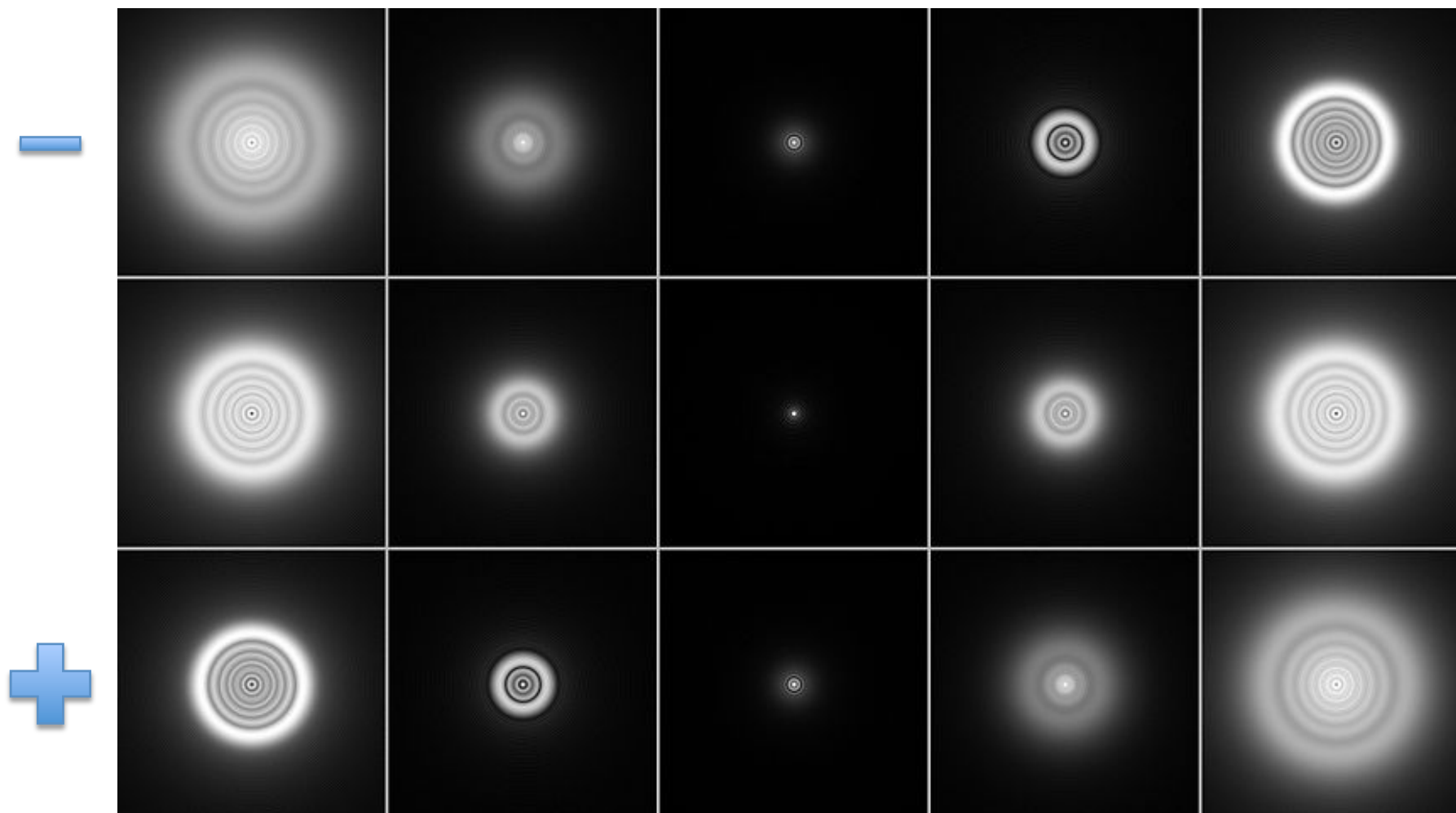
Aberrazione Sferica

Specchi sferici e lenti a curvatura sferica



Il fuoco (di una sorgente puntiforme) NON è un punto

SFERICA



← Intrafocale Extrafocale →

Come si elimina/riduce l'Aberrazione Sferica ?

Dipende dalla quarta potenza dell'Apertura e dall'inverso della terza potenza della lunghezza focale  si riduce lavorando con rapporti focali spinti ($f/10$ o oltre).

Si elimina usando superfici non sferiche (paraboliche o di altra forma) – sistemi aplanatici

Aberrazione sferica HST

(dopo il lancio è stata aggiunto un correttore)



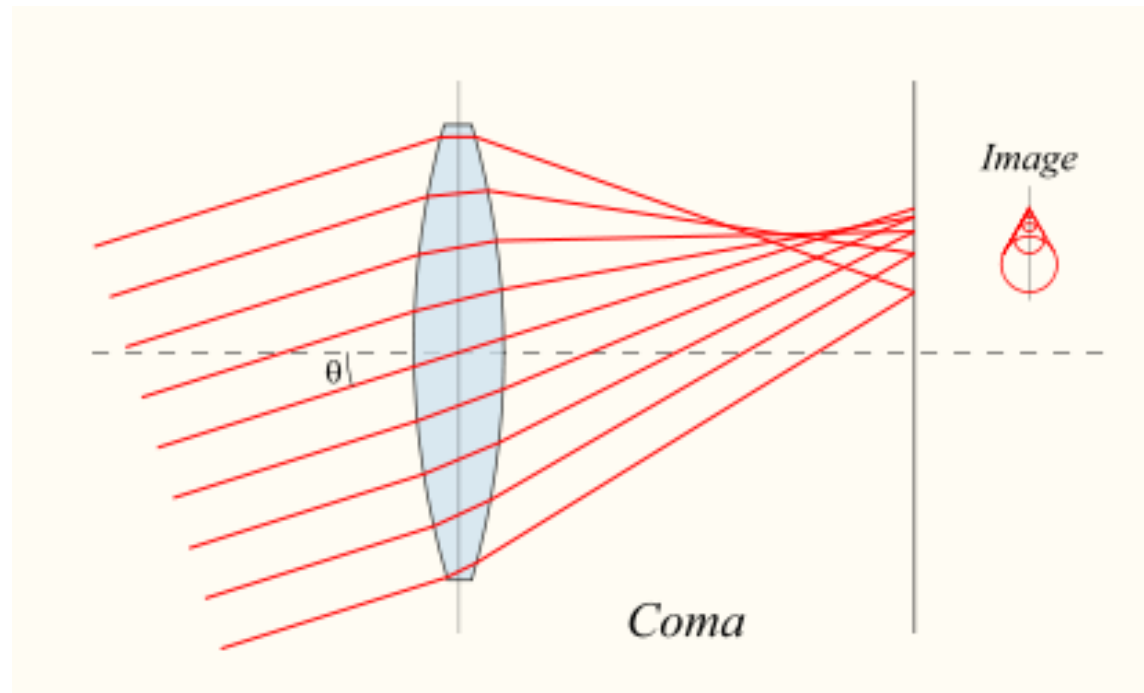
Prima della cura



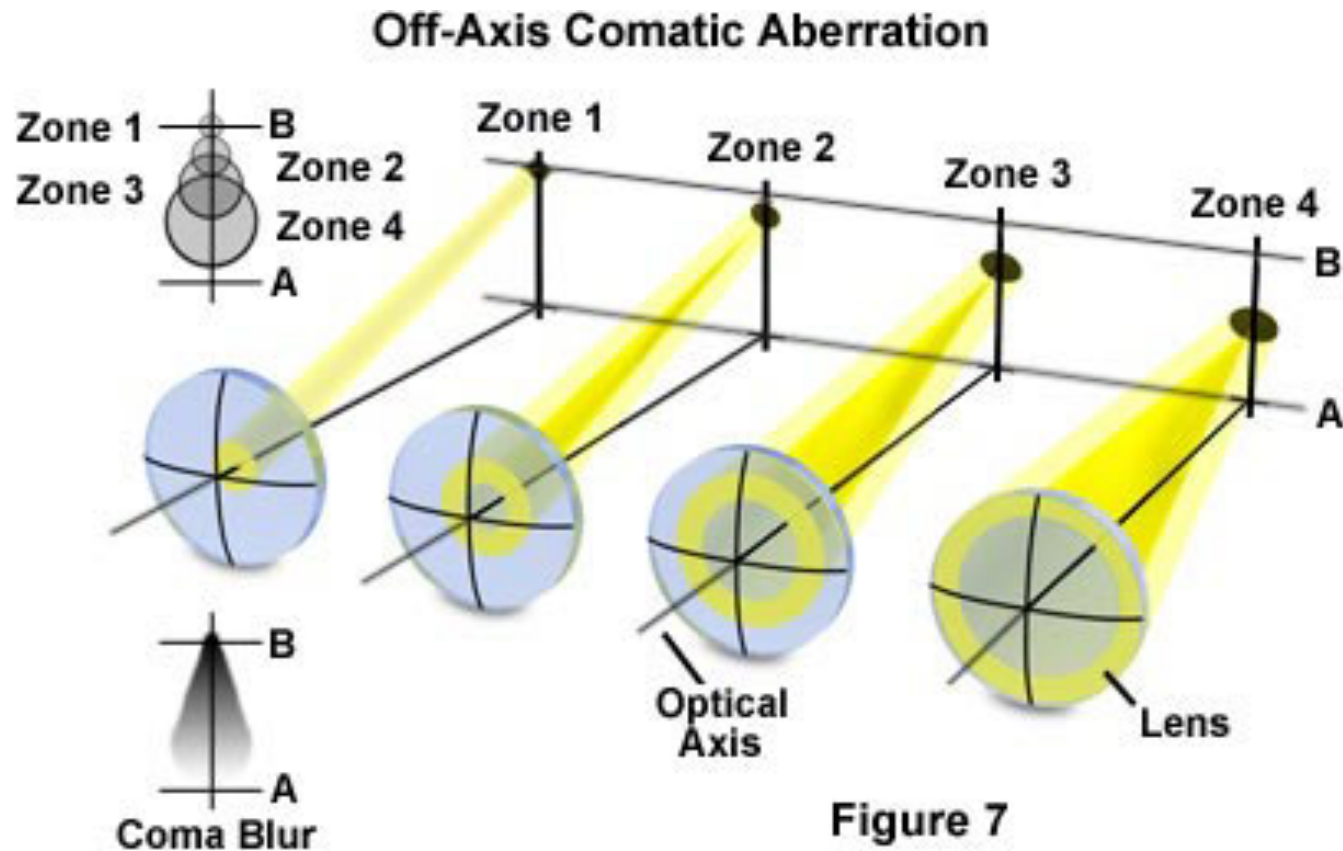
Dopo la cura

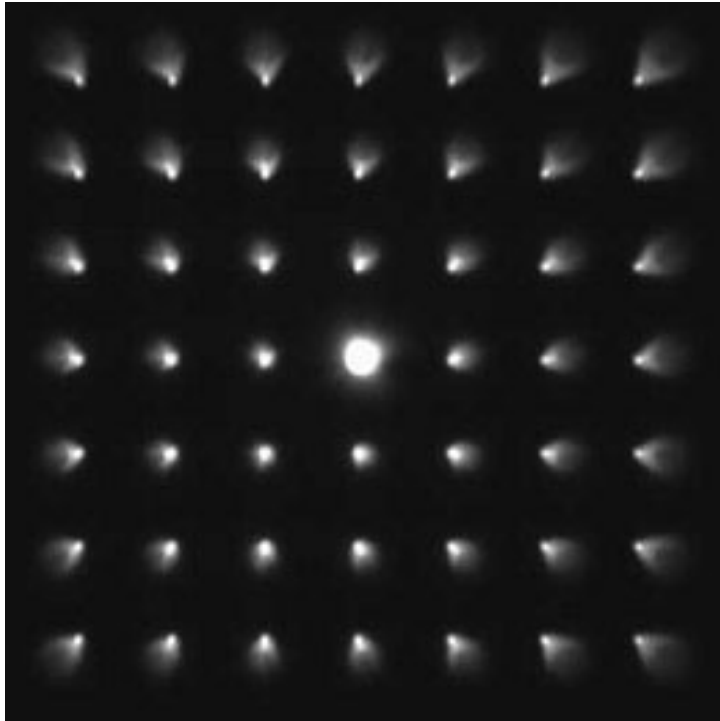
Coma

immagine “a cometa” molto evidente allontanandosi dall’asse ottico nei telescopi a rapporto focale molto spinto



I raggi parassiali sono focalizzati in un sol punto; quelli extra-assiali (che formano un angolo grande con l'asse ottico) vengono focalizzati su cerchi il cui diametro aumenta al crescere dell'angolo che il fascio forma con l'asse. La sovrapposizione di questi cerchi produce l'immagine a cometa.





COMA



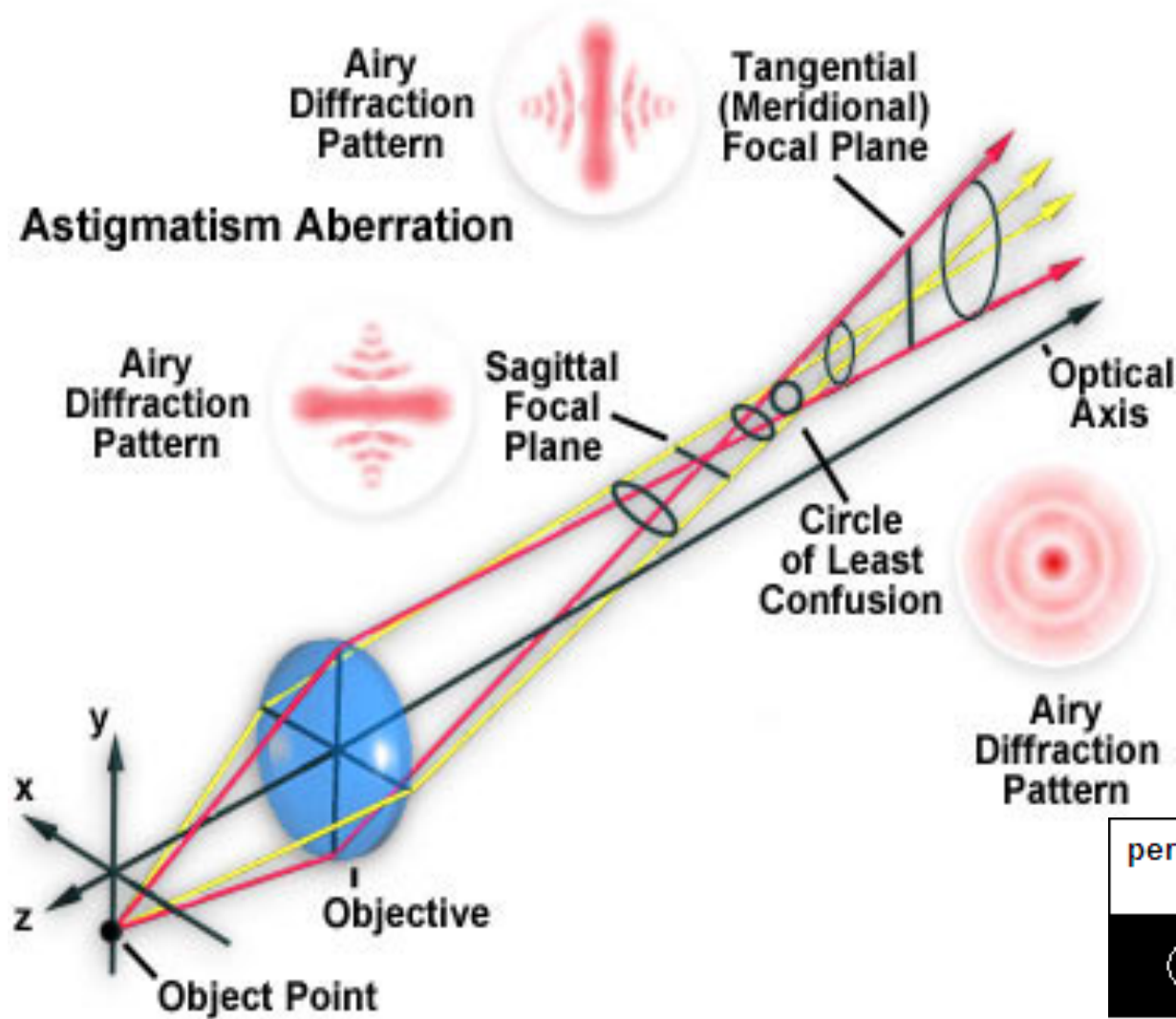
Come si elimina/riduce il Coma ?

Il coma è presente anche negli **specchi parabolici**: per minimizzarlo si lavora con grandi rapporti focali e/o vicini all'asse ottico, o si utilizzano opportuni correttori di coma.

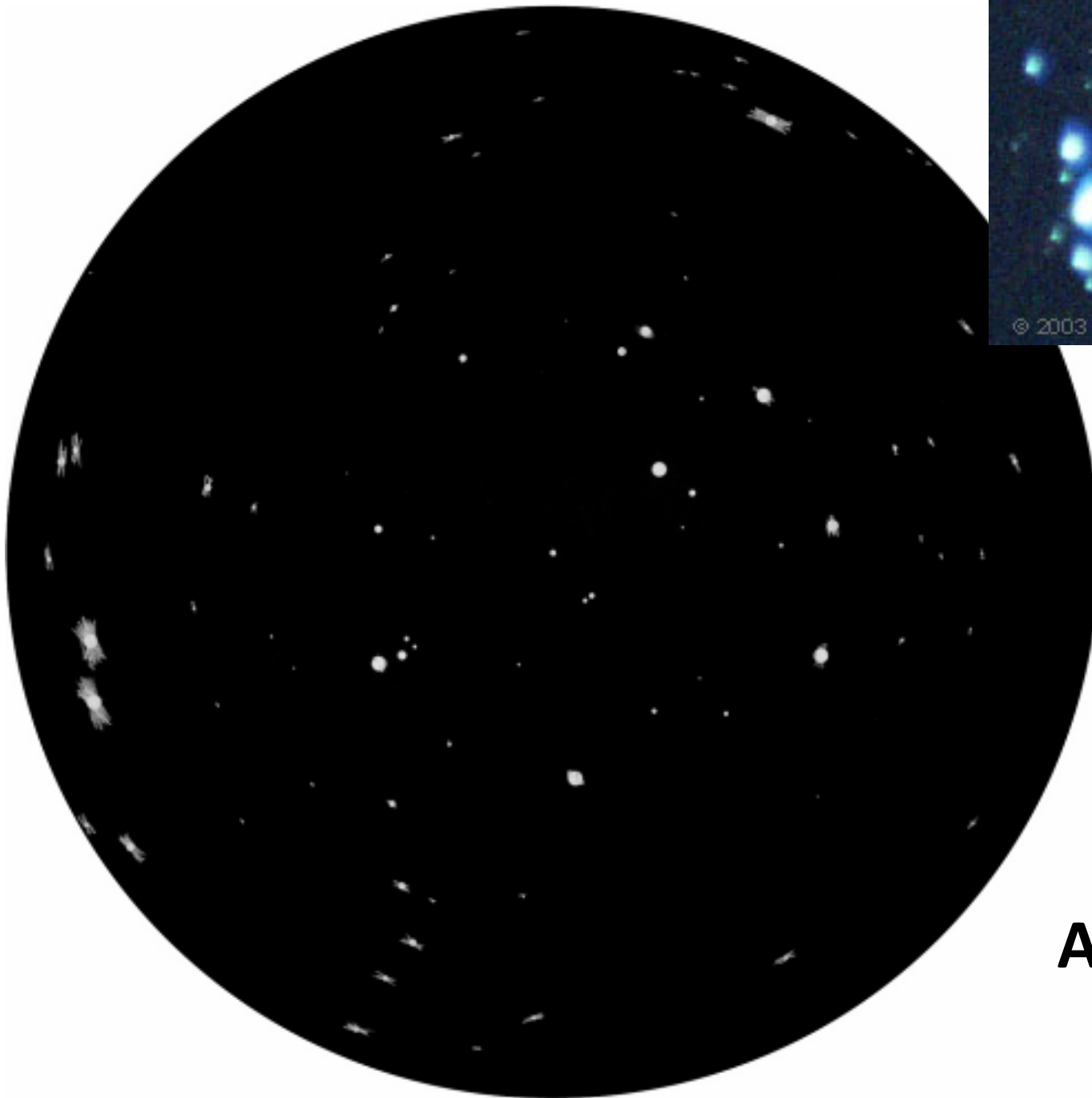
Per eliminarlo si usano altri tipi di curvatura (es iperbolica, come nei Ritchey-Chrétien)

Astigmatismo

Una sorgente fuori dall'asse ottico “vede” due raggi di curvatura diversi nei due piani (sagittale e tangenziale)



perfect	0.37 λ P-V astigmatism		
	tangential	best	sagittal
Airy disc			



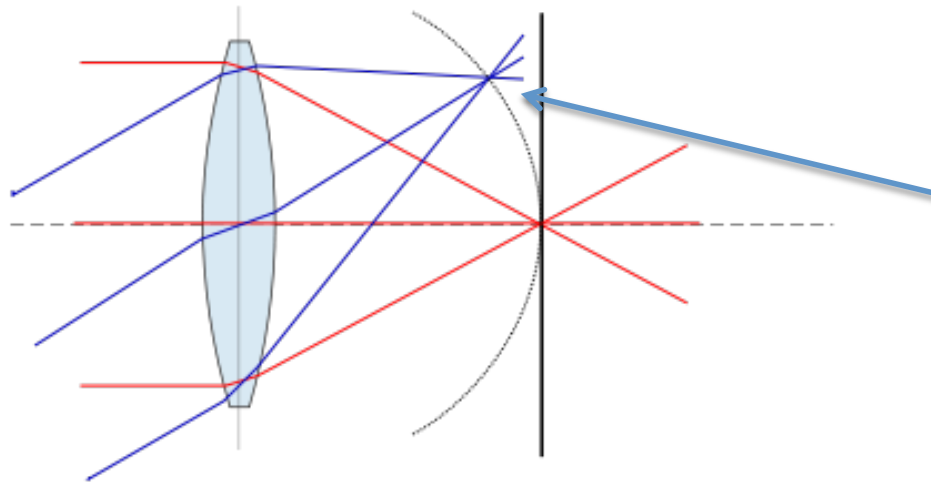
ASTIGMATISMO

Come si elimina/riduce l'Astigmatismo ?

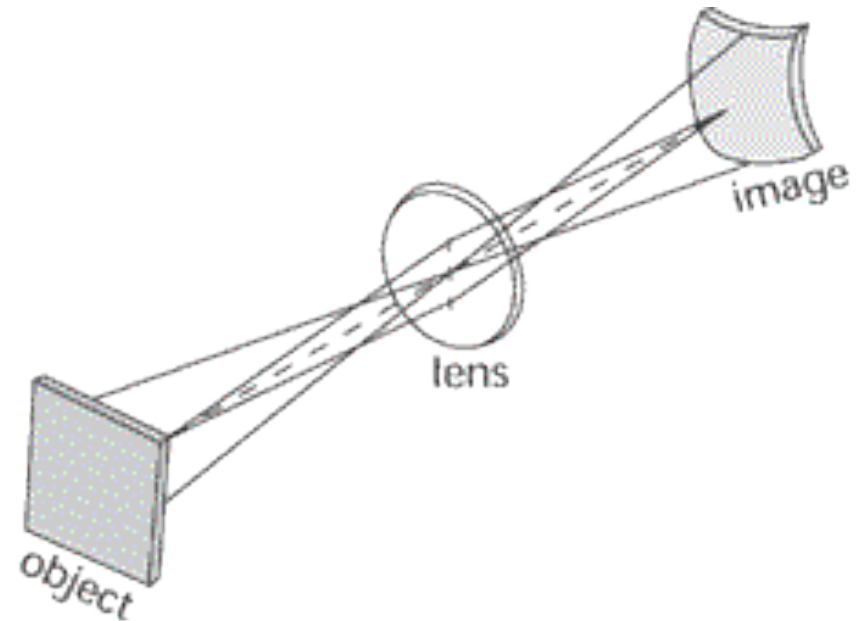
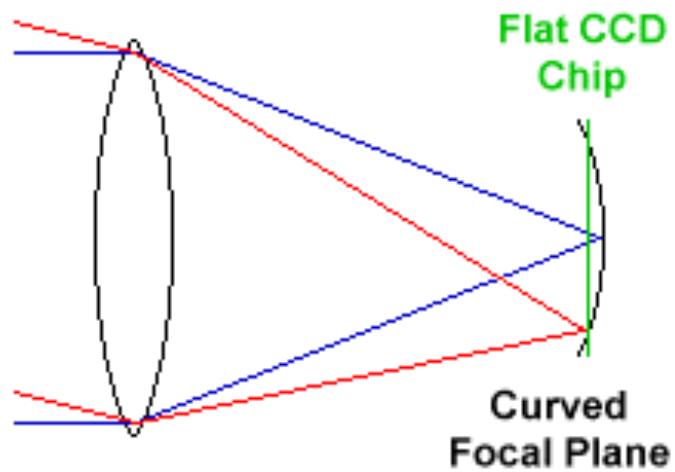
Non allontanandosi eccessivamente dall'asse ottico
(L'Astigmatismo, a parità di distanza dall'asse ottico, è meno marcato dell'aberrazione sferica e del coma)

Utilizzando tre elementi ottici (di cui uno funge da
“correttore”)

Curvatura di campo (Petzval Curvature)

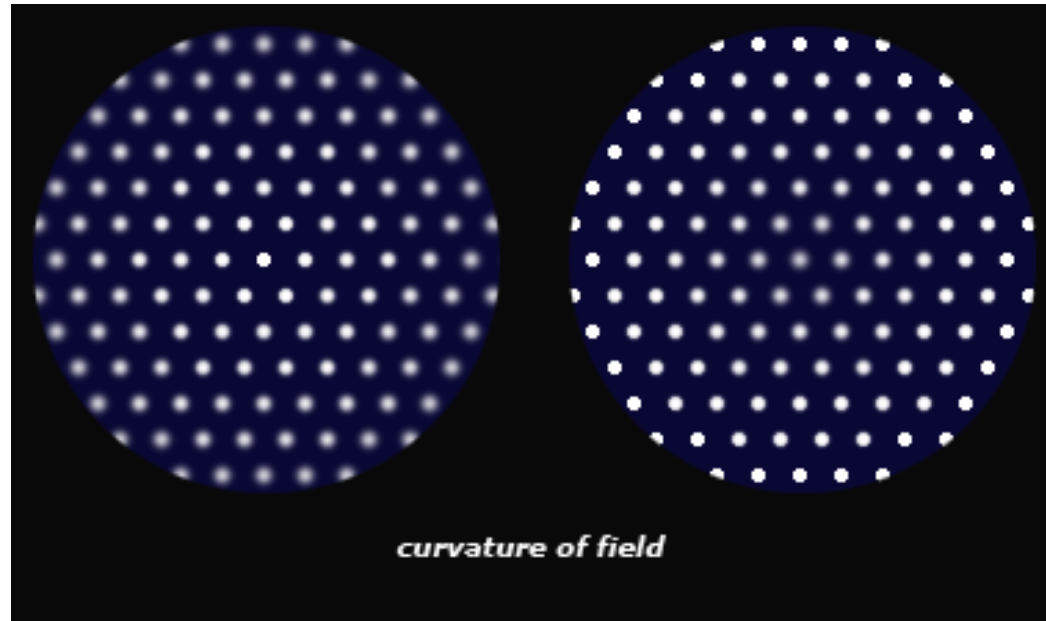


Man mano che ci si allontana dall'asse ottico il piano focale si trova a una distanza maggiore del fuoco



Non era un problema per le lastre fotografiche che possono essere piegate

Effetto della Curvatura di Campo sul fuoco



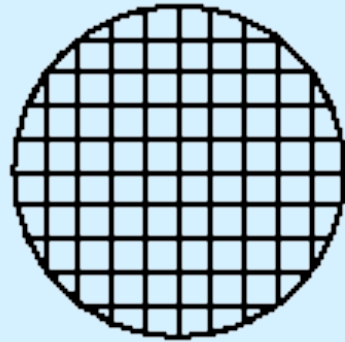
Come si elimina/riduce la Curvatura di Campo ?

Lavorando con campi non troppo ampi

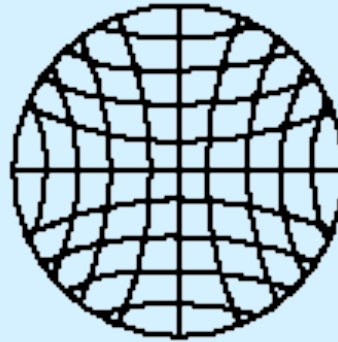
Si elimina con opportuni correttori ottici (in genere lenti): “flattener”

Distorsione

La scala dell'immagine è diversa al centro e alla periferia del campo visivo



Undistorted
Image



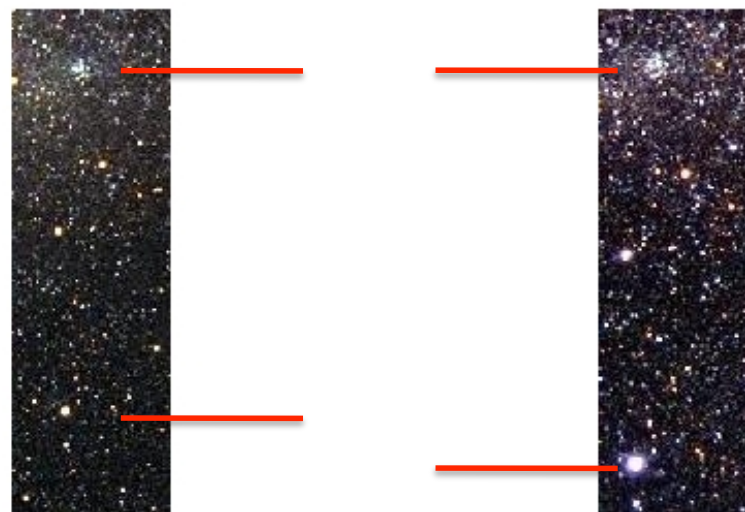
Pincushion
Distortion



Barrel
Distortion



La Distorsione NON agisce sulla forma del pattern di diffrazione della sorgente (puntiforme) ma sulla posizione relativa delle sorgenti
La scala dell'immagine cambia all'interno del frame.



In generale...

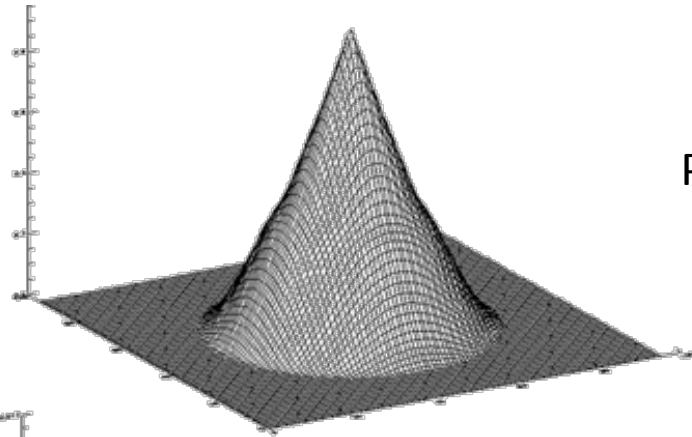
Tutte le aberrazioni dipendono in qualche modo dal rapporto focale e dall'Apertura:

Al crescere del rapporto focale e al diminuire dell'apertura le aberrazioni diminuiscono (ci si avvicina all'approssimazione parassiale).

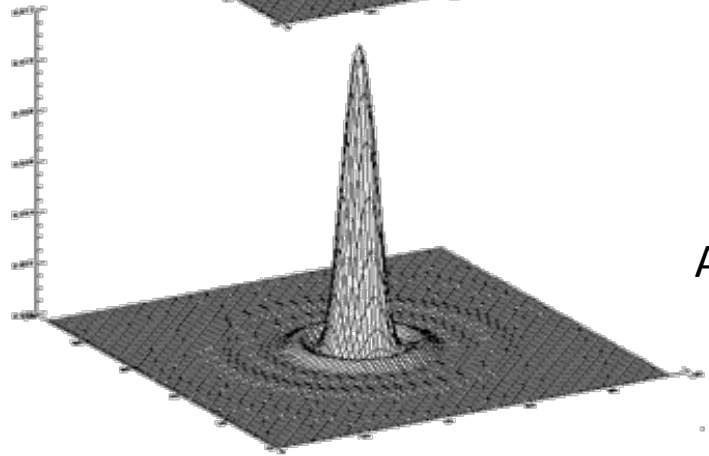
Nel caso reale le aberrazioni sono contenute (e in alcuni casi alcune aberrazioni sono annullate) progettando opportunamente il sistema ottico: curvatura degli specchi o delle lenti e aggiungendo componenti ottici “correttori”.

Point Spread Function (psf)

A causa delle aberrazioni e delle caratteristiche specifiche del sistema ottico l'immagine del punto non è quasi mai un pattern di Airy



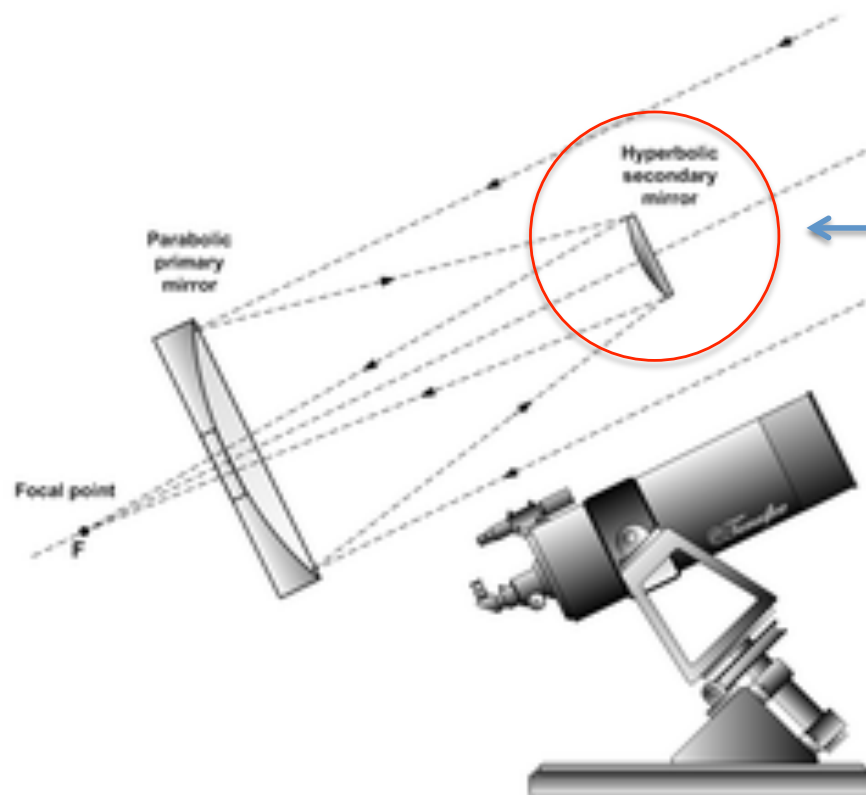
Psf reale



Airy pattern

Ogni sistema ottico è caratterizzato da una sua psf (che solo idealmente coincide con il pattern di Airy). Con buona approssimazione la psf può essere approssimata con un andamento gaussiano.

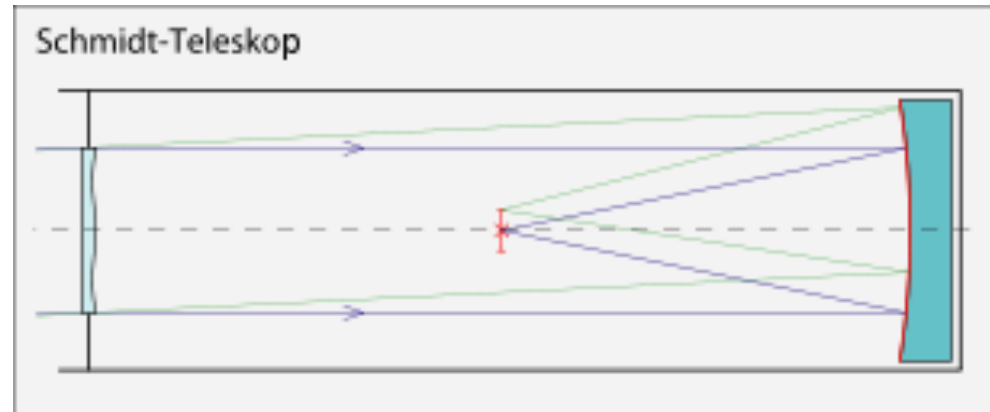
Cassegrain classico



*L'uso di un
secondario curvo
produce una
lunghezza focale
equivalente >> di
quella dello
specchio primario:
ciò produce
configurazioni
molto compatte*

Utilizza rapporti focali molto spinti (es $f/15$) per ridurre il coma

Telescopio Schmidt

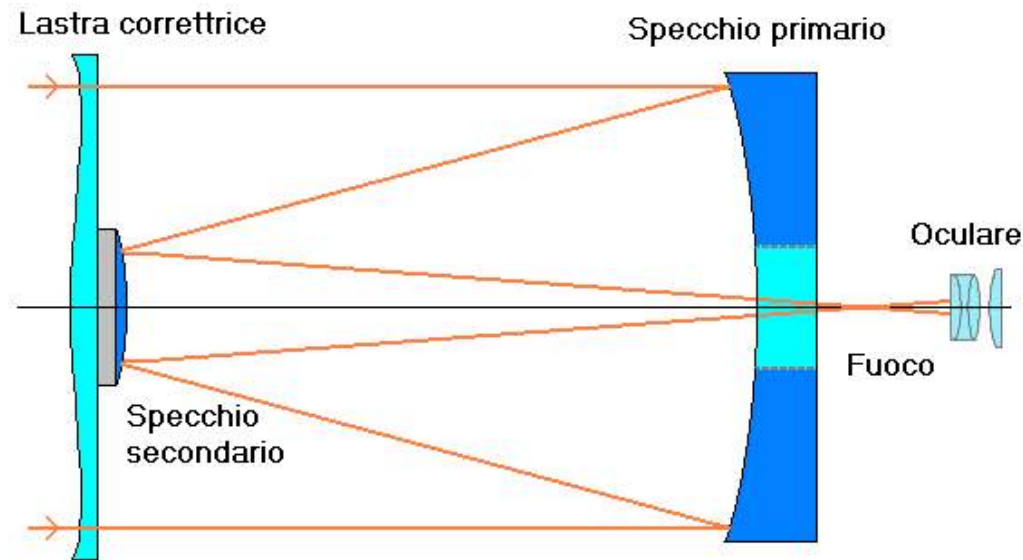


Telescopio prettamente fotografico: il rivelatore viene posto direttamente nel fuoco. Il piano focale è curvo.
Usato per riprendere grandi campi

*Il Palomar Oschin Schmidt Telescope da 48''
con il quale si è realizzato il primo Sky Atlas
fotografico completo del cielo*



Schmidt-Cassegrain (famiglia dei catadiottrici)



Specchio primario Sferico: Facile lavorazione, basso costo

Lastra correttrice: corregge l'aberrazione sferica e permette un contenimento del coma e dell'astigmatismo.

Il telescopio del Dipartimento: Schmidt-Cassegrain



Apertura: 200 mm

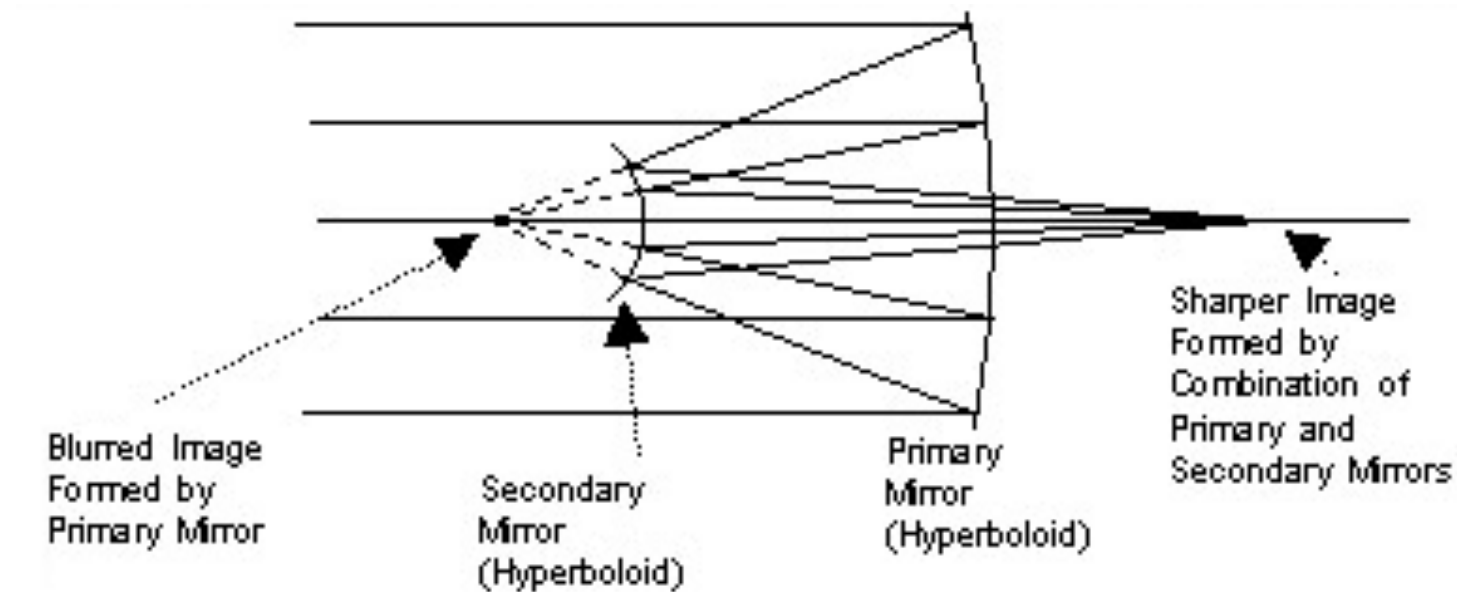
Focale: 2000 mm

f/10

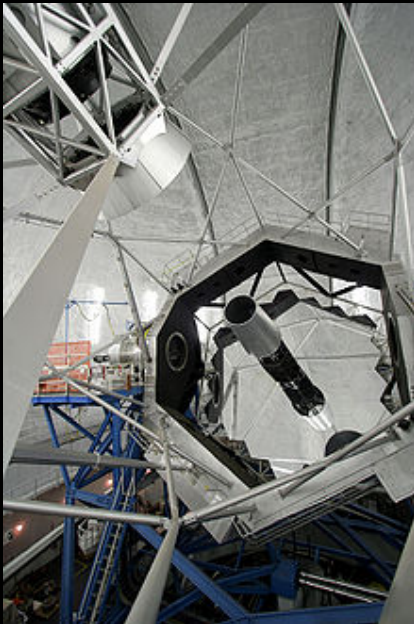
Risoluzione (teorica) $\approx 0.6''$

Configurazione Ritchey-Chrétien

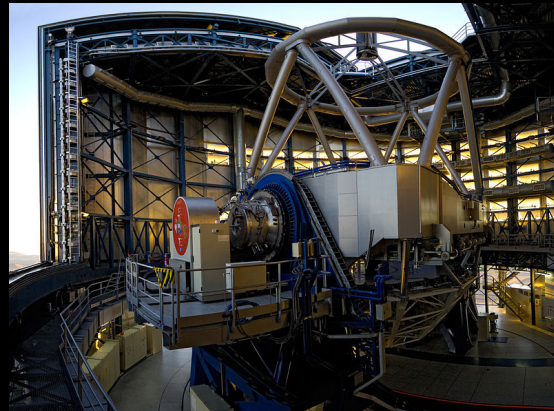
Configurazione Cassegrain ma con primario e secondario Iperbolici -
Elimina il Coma -Consente rapporti focali molto spinti e quindi strumenti
molto luminosi e “compatti”: molto importante per grandi Aperture!



Quasi tutti i principali telescopi al mondo adottano questa configurazione



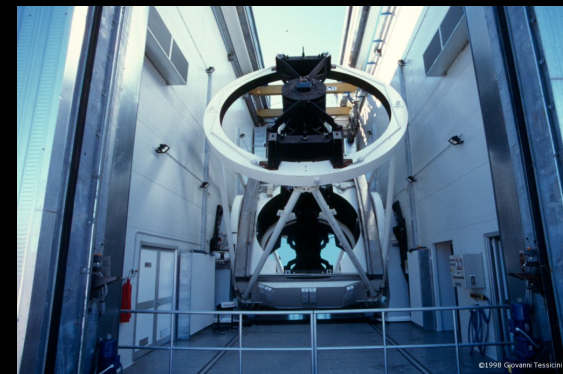
Keck (Hawaii), 10 m



Eso (Cerro Paranal,
Chile), 8.2 m

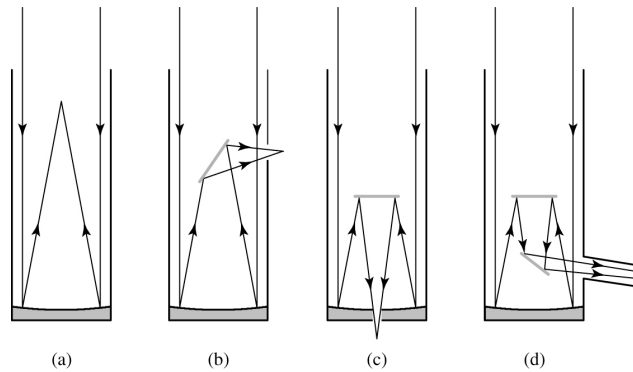


Hubble Space telescope, 2.4 m

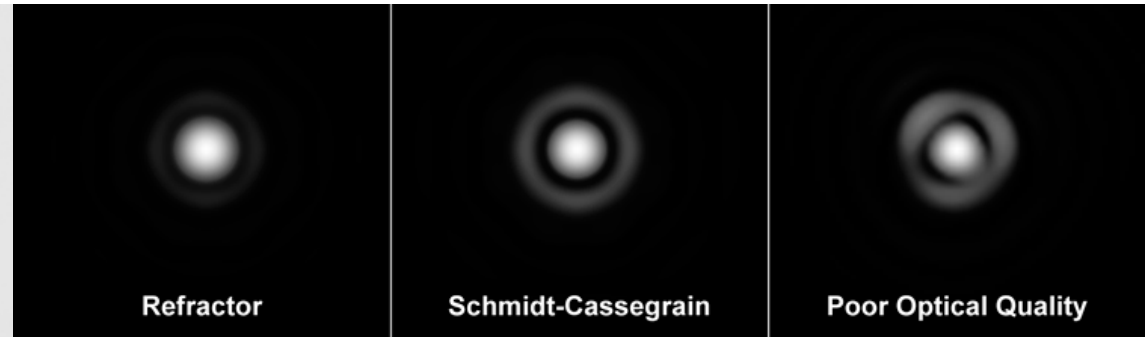
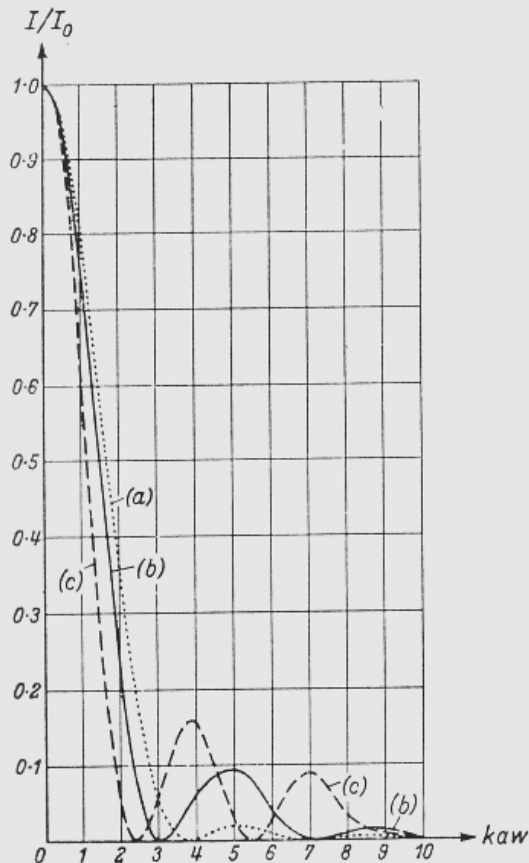


Telescopio nazionale Galileo
(Las Palmas, Canarie) 3.6 m

Effetti dell'ostruzione sul pattern di Airy



Tutte le configurazioni ottiche dei riflettori presentano necessariamente una “ostruzione”

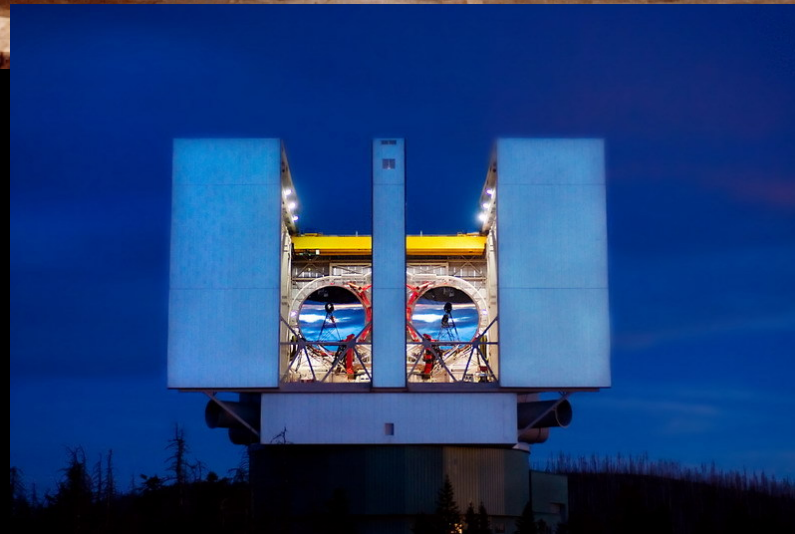


All'aumentare dell'ostruzione aumenta l'intensità nei massimi secondari.

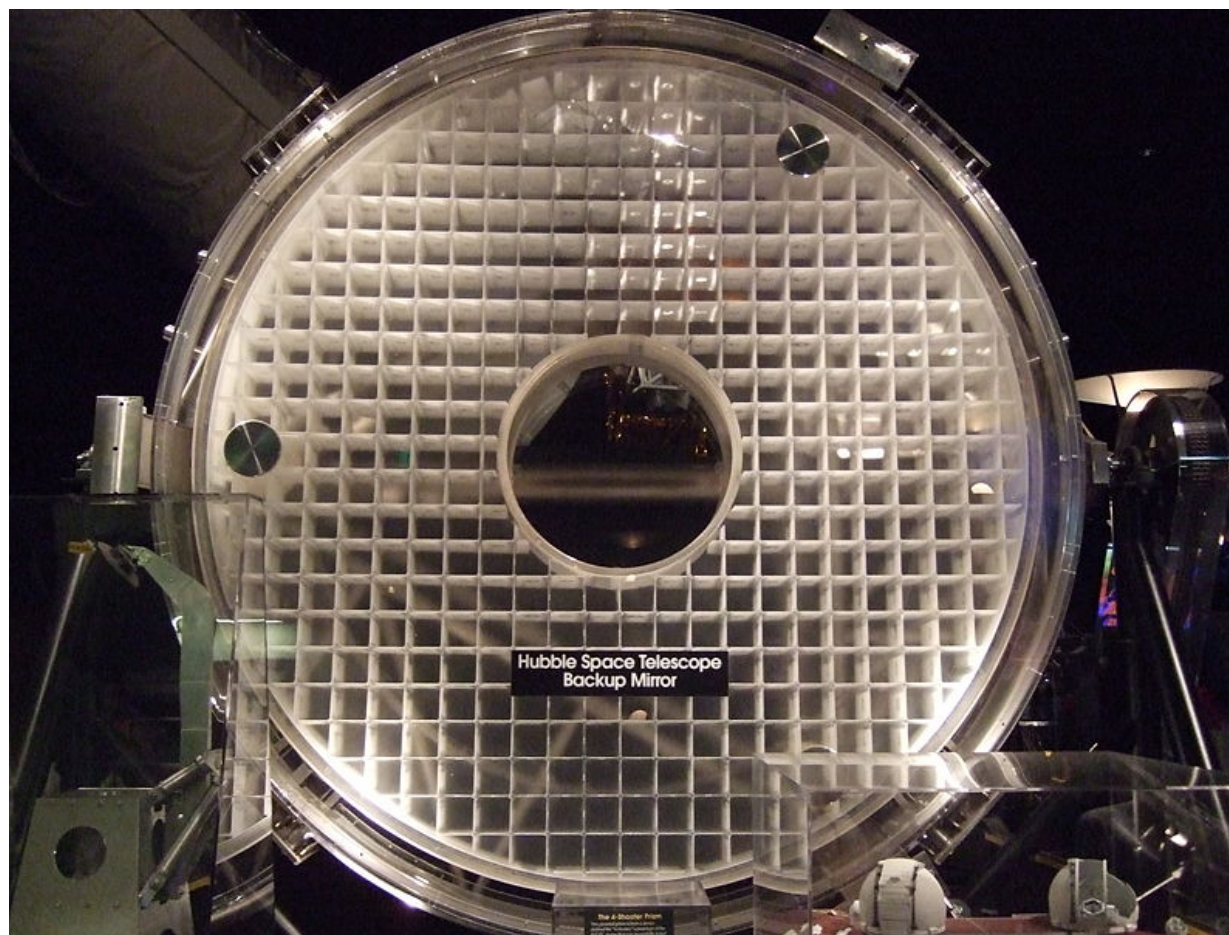
Le immagini stellari di un rifrattore apocromatico di alta qualità ottica (ben corretto per le aberrazioni) sono più “incise” di quelle dei riflettori.

I GRANDI TELESCOPI

Struttura di uno degli specchi da 8.4 m del Large Binocular Telescope (prima dell'alluminatura)



Grandi specchi: tecniche realizzative



Strutture a **nido d'ape** (Honeycomb) come substrato: contenimento del peso

Gli specchi dei telescopi

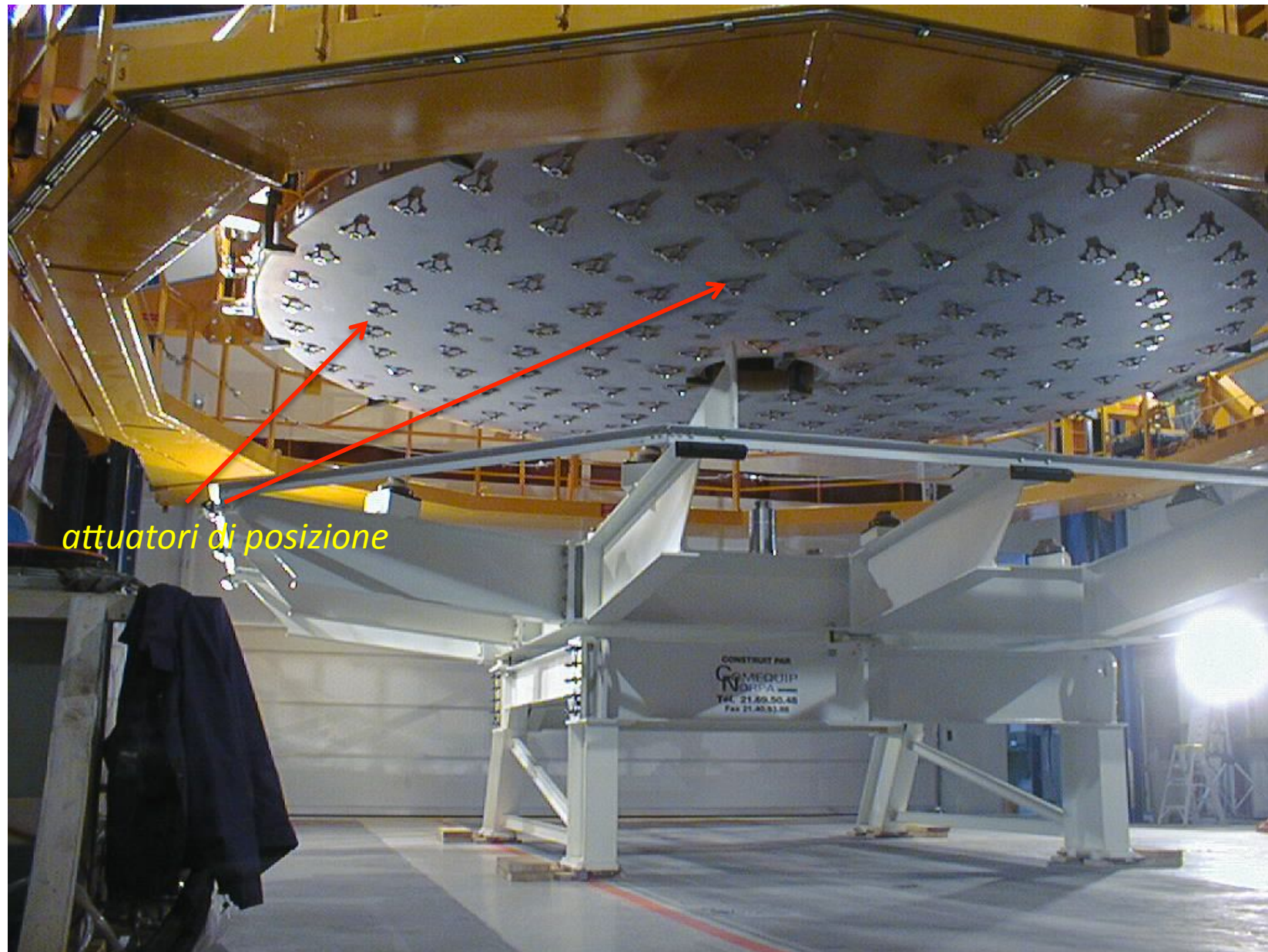
- Forma giusta: le tolleranze sulle curvature sono $\ll$ di λ !
- Alta riflettività: tipo, qualità e durata del coating
- “indeformabilità”



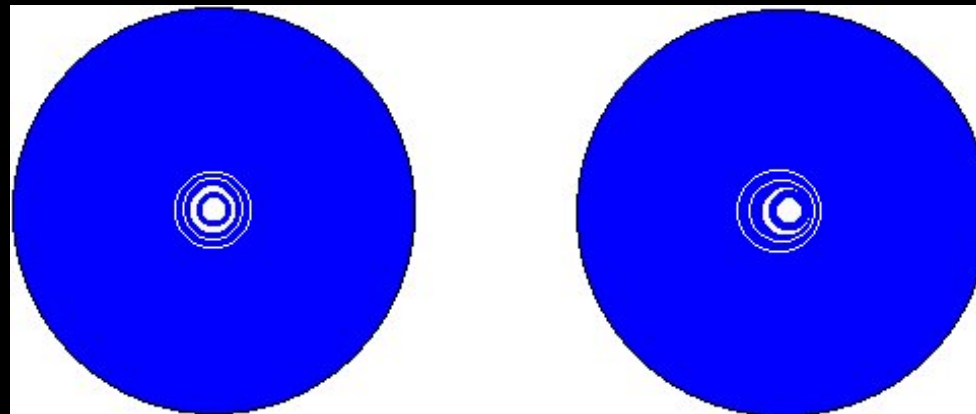
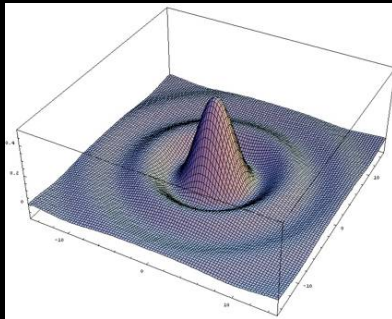
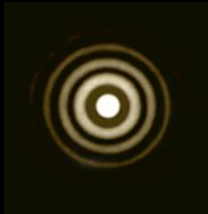
Specchi **segmentati**



Necessità di ottiche “Attive” per tenere lo specchio nella forma giusta



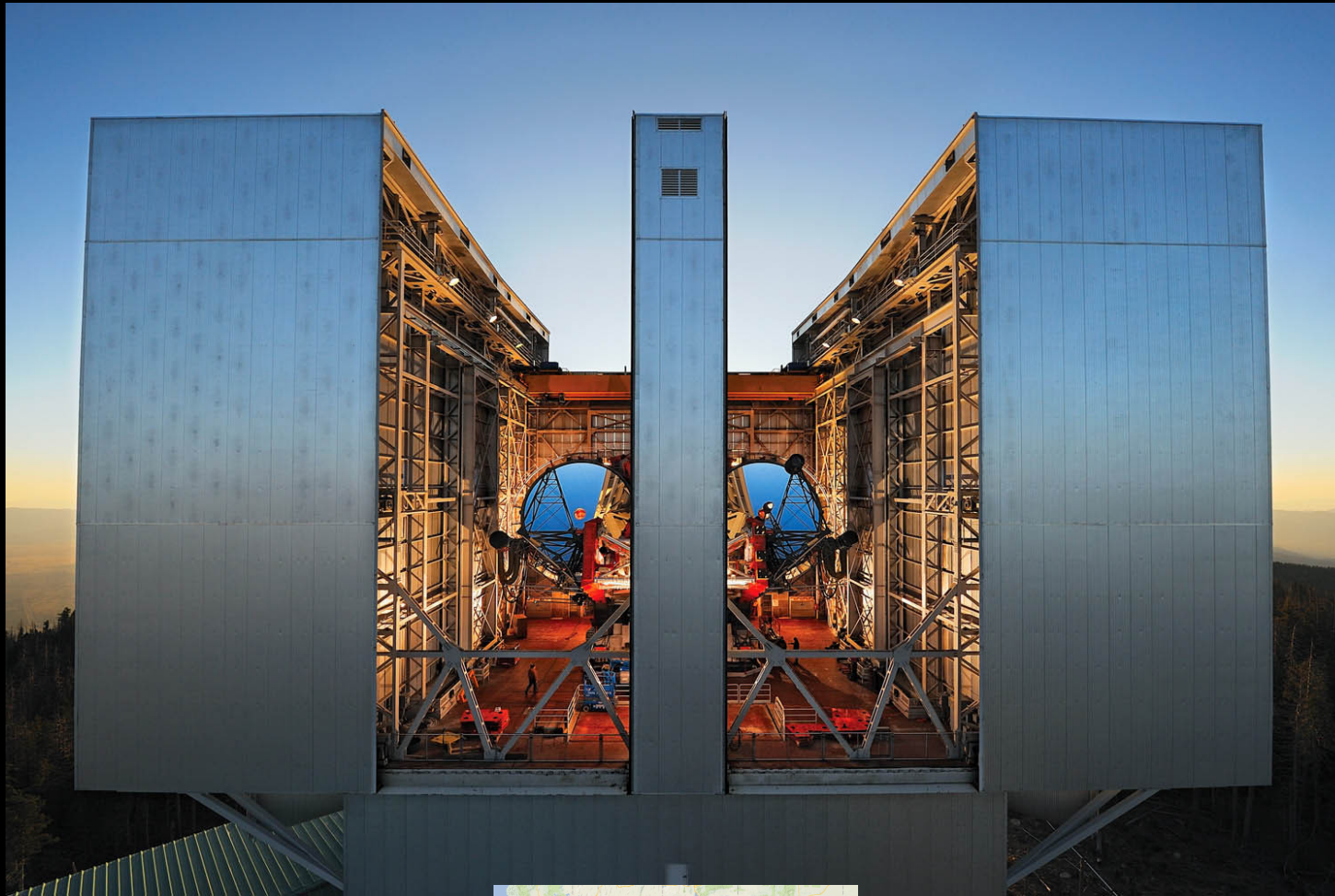
Collimazione Telescopio



I quattro telescopi da 8.2 m di diametro dei Very Large Telescopes (VLT) dell'European Southern Observatory (ESO) sul Cerro Paranal (2700 m slm) nel deserto di Atacama in Cile



Large Binocular Telescope (LBT) – due specchi da 8.4 metri di diametro.
Mount Graham, Arizona (USA) – 25% partecipazione italiana



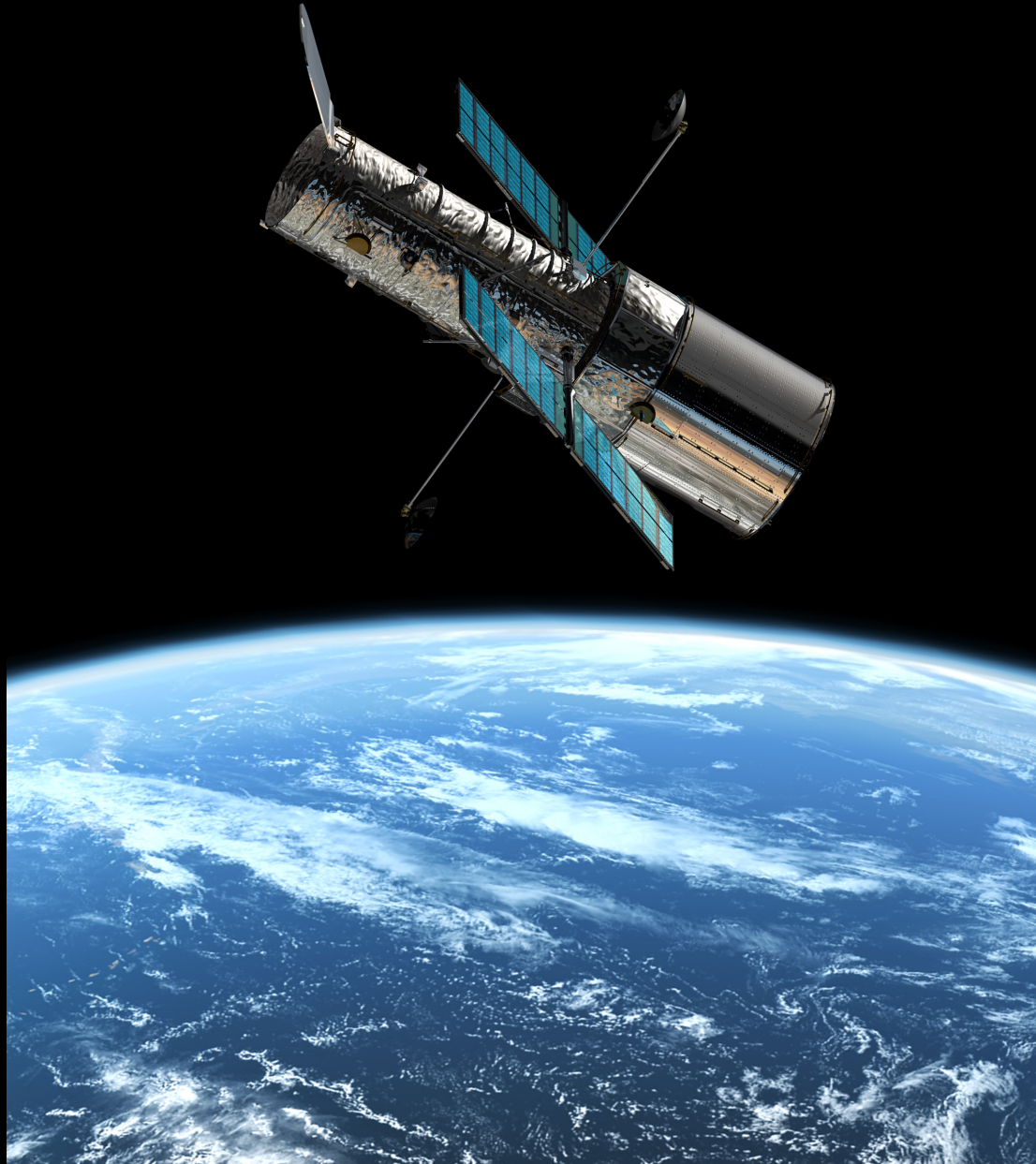
Complesso di telescopi (fino a 10 m di diametro) sulla sommità dell'isola di Mauna Kea, Hawaii (4200 m slm)



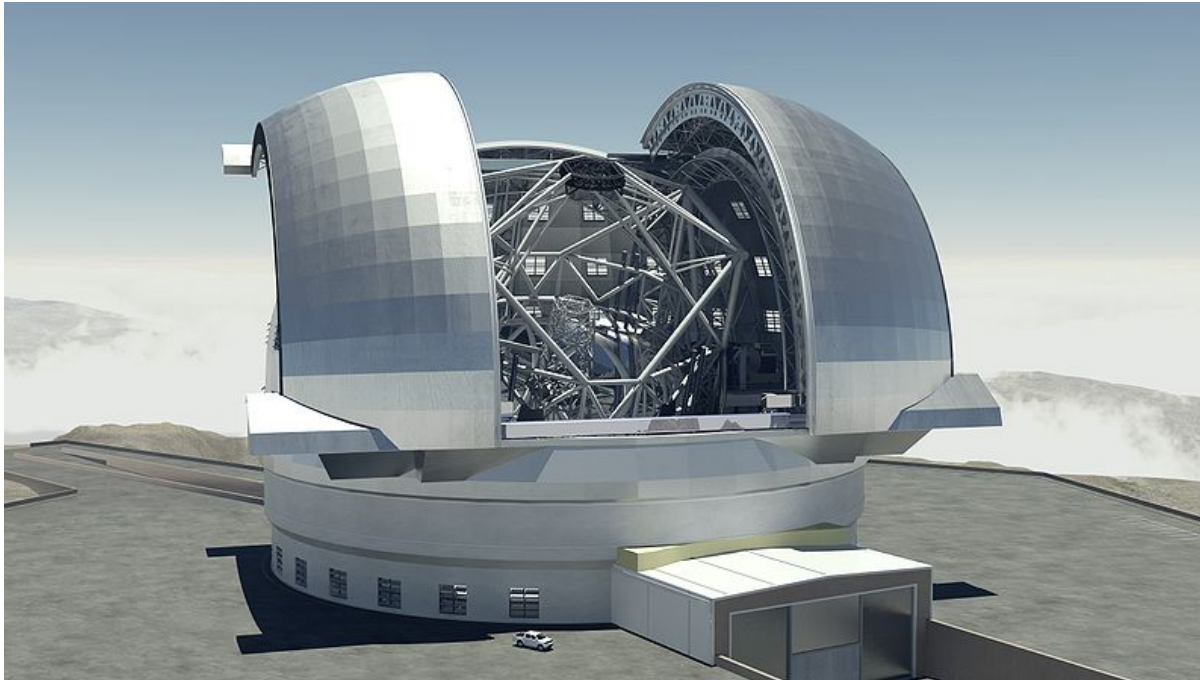
Complesso di Osservatori a La Roque de Los Muchachos (2400 m slm) sull'isola di La Palma, Canarie. Qui si trovano anche il Telescopio Nazionale Italiano da 3.5 m di diametro e il telescopio Gran Canarias da 10.4 m, attualmente il più grande del mondo.



Il telescopio spaziale Hubble (HST), 2.4 m di diametro

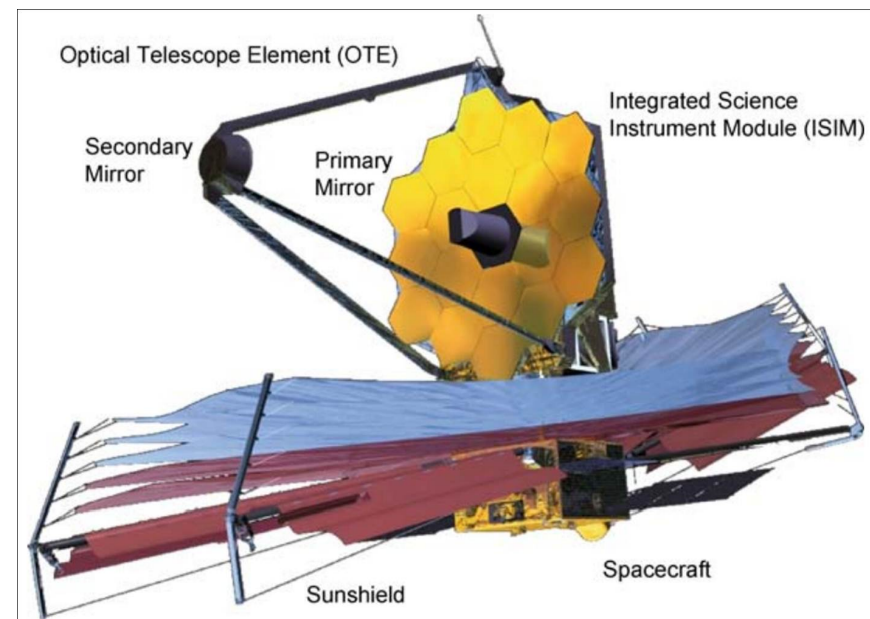


Il futuro dei telescopi ottici

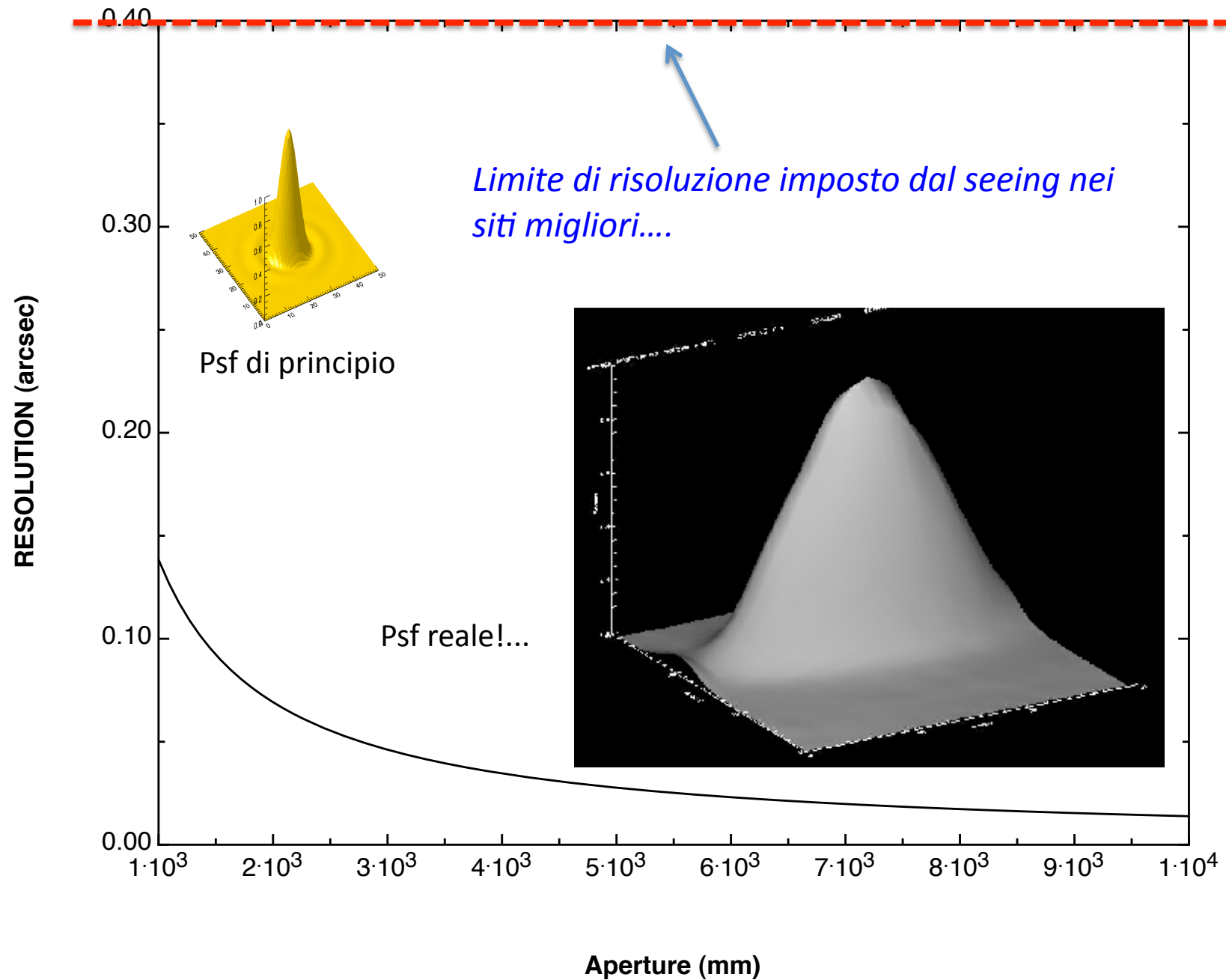


European Extremely
Large Telescope
(EELT). Diametro
39.3 m

James Webb Space Telescope
(JWST). Diametro 6.5 m



I limiti del seeing

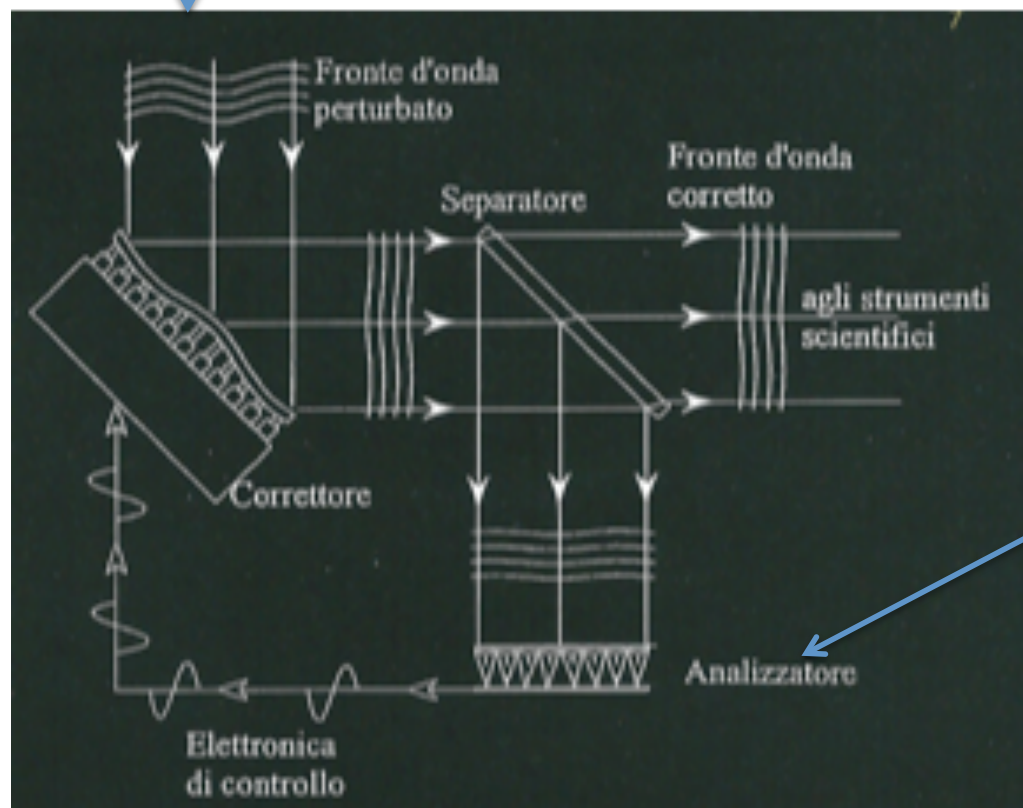


Uno modo per compensare il seeing:

le Ottiche Adattive



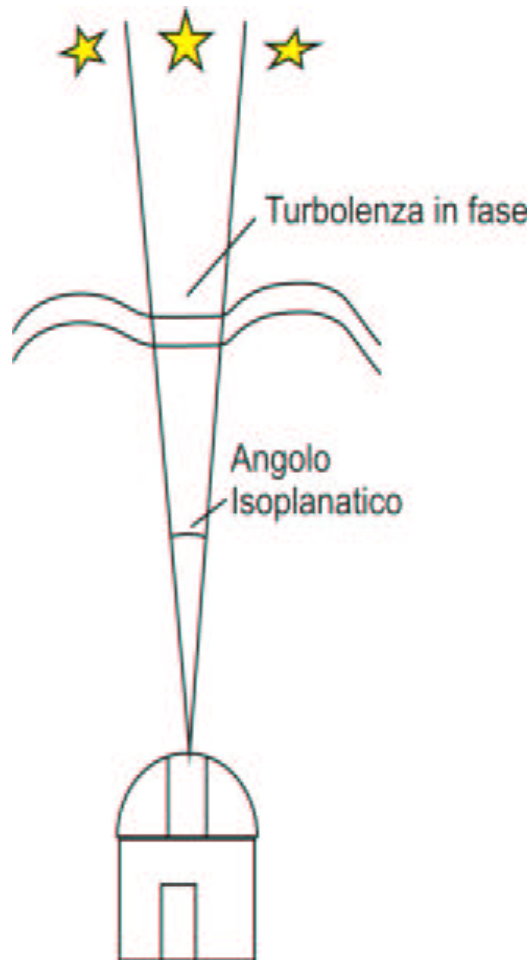
1. Si fotografa ad alta frequenza (fino a 1 KHz!) una Stella di riferimento (molto vicina al campo inquadrato!)



3. L'elettronica modifica di conseguenza la forma dello specchio

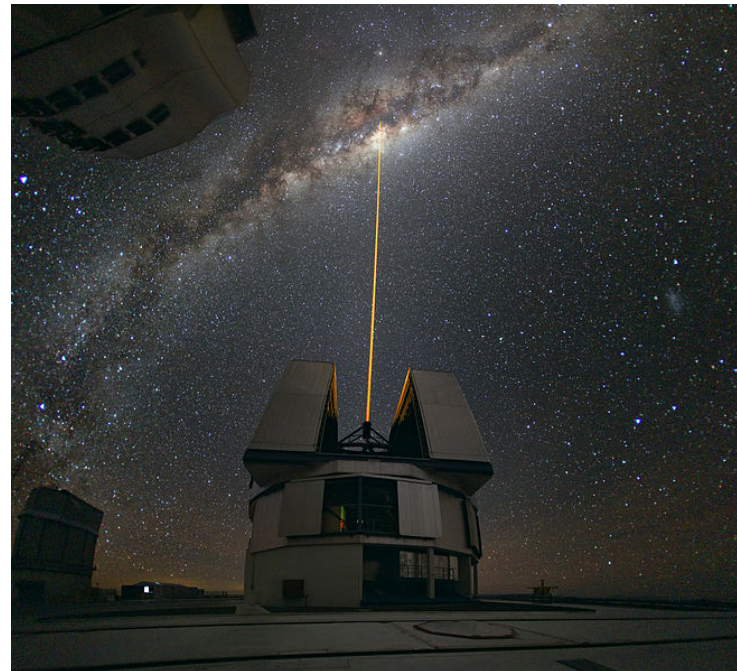
2. L'analizzatore confronta la psf teorica con quella osservata

1. La stella e il soggetto fotografato devono rientrare nello stesso angolo isoplanatico (la turbolenza deve agire nello stesso modo sulla stella e sul soggetto)

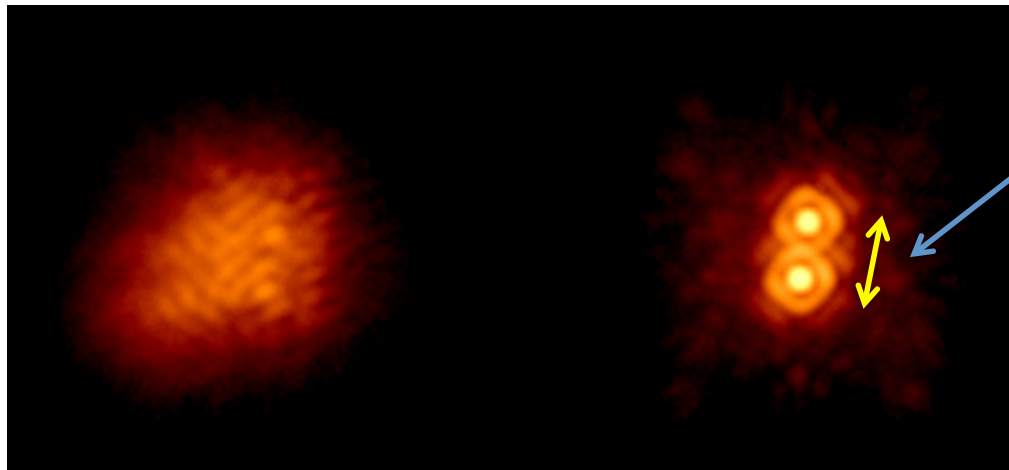


2. La stella deve essere sufficientemente luminosa per essere registrata bene con un tempo di esposizione molto breve ($\approx 1\text{ms}$!)

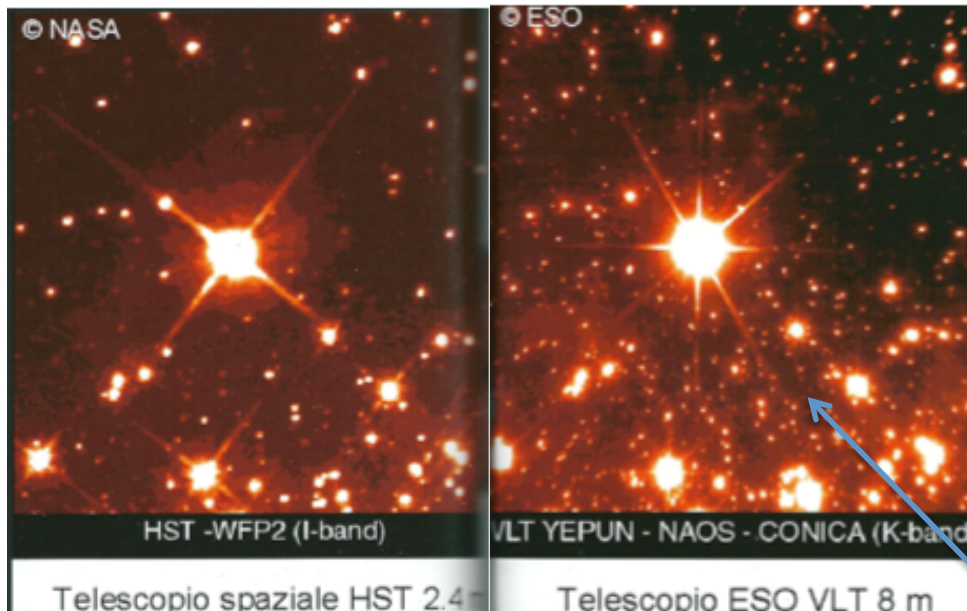
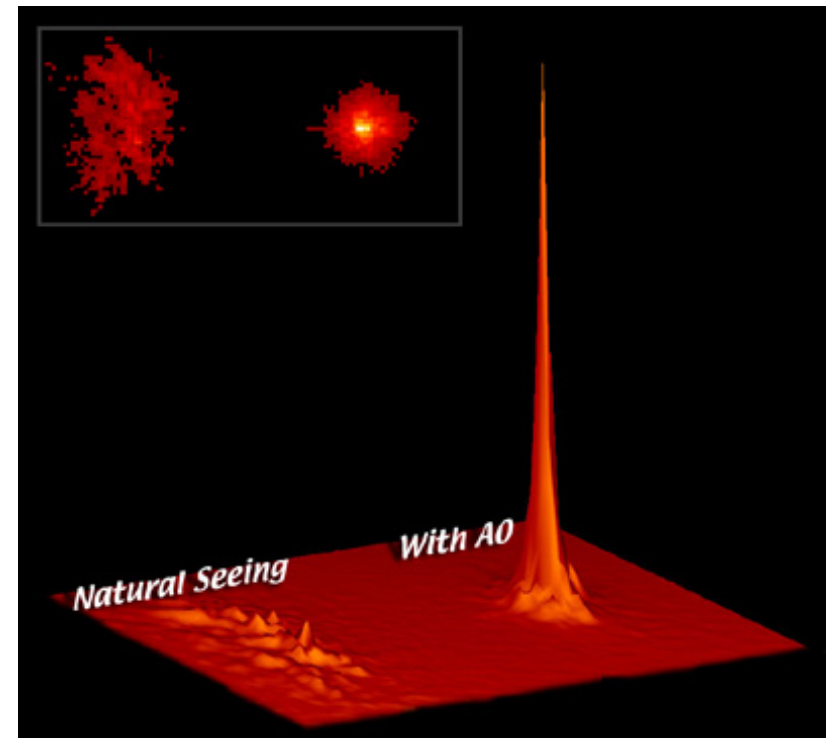
Se non c'è una stella di magnitudine sufficiente nel campo si genera una **stella artificiale** con un fascio laser a 589 nm, che eccita gli atomi di sodio a circa 100 km di altezza



Effetto delle ottiche adattive



0.3"



Telescopi dell'ESO con
ottiche adattive

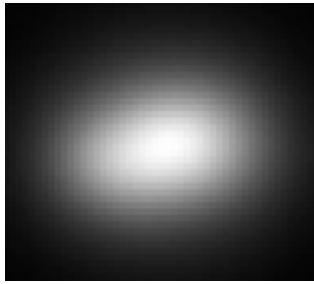
Altre tecniche per la riduzione degli effetti del *seeing*, utilizzabili per oggetti sufficientemente luminosi:

Speckle Imaging:

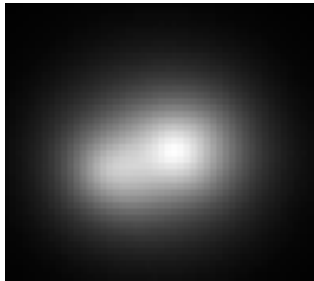
Si mettono a registro e si sommano (stacking) molte immagini con tempi di esposizione molto brevi (decimi o centesimi di secondo)

Lucky Imaging:

Una forma di Speckle Imaging in cui si selezionano solo i frame con migliore rapporto Segnale-Rumore



sum of all 50000 images (of 0.025 s, equivalent of a single 21m exposure). FWHM of the Seeing disk is around 0.9 arcsec.



sum of all 50000 single images with the center of gravity (centroid) of each image shifted to the same reference position.



25000 (50% selection) best images added together with the brightest pixel in each image moved to the same reference position.



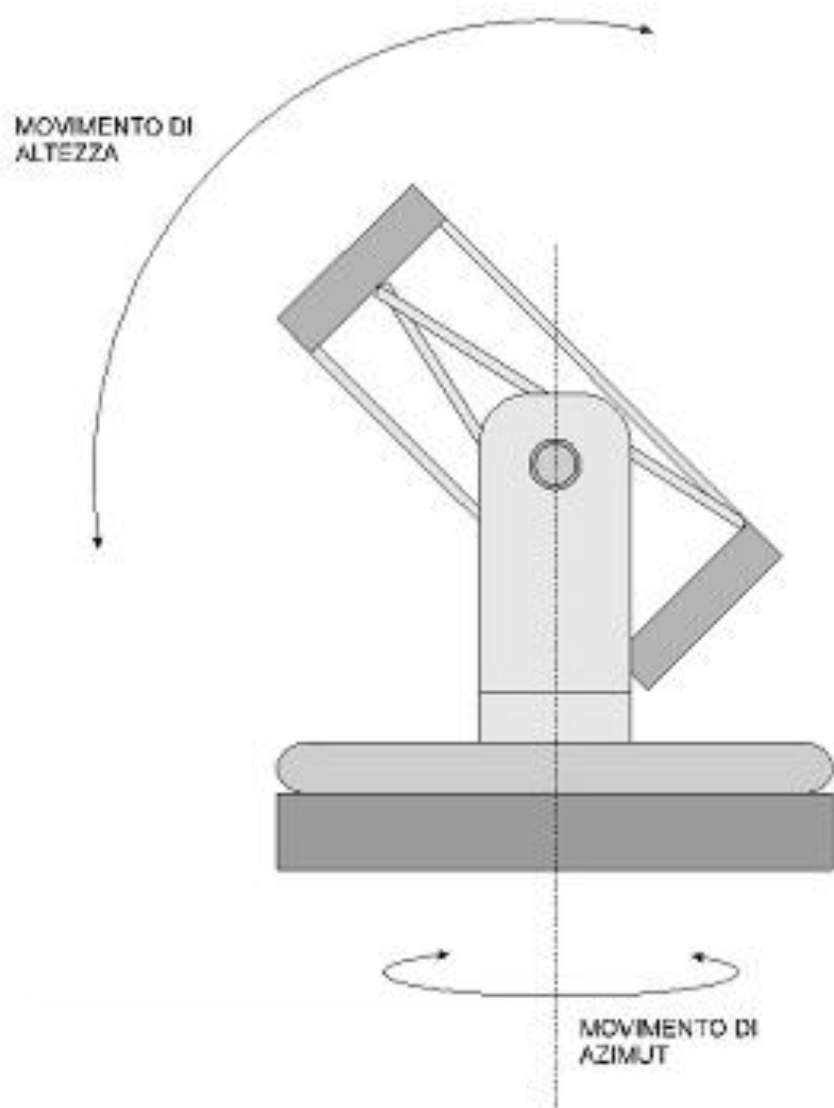
5000 (10% selection) best images added together with the brightest pixel in each image moved to the same reference position. An Airy ring around the brightest object becomes clearly visible.



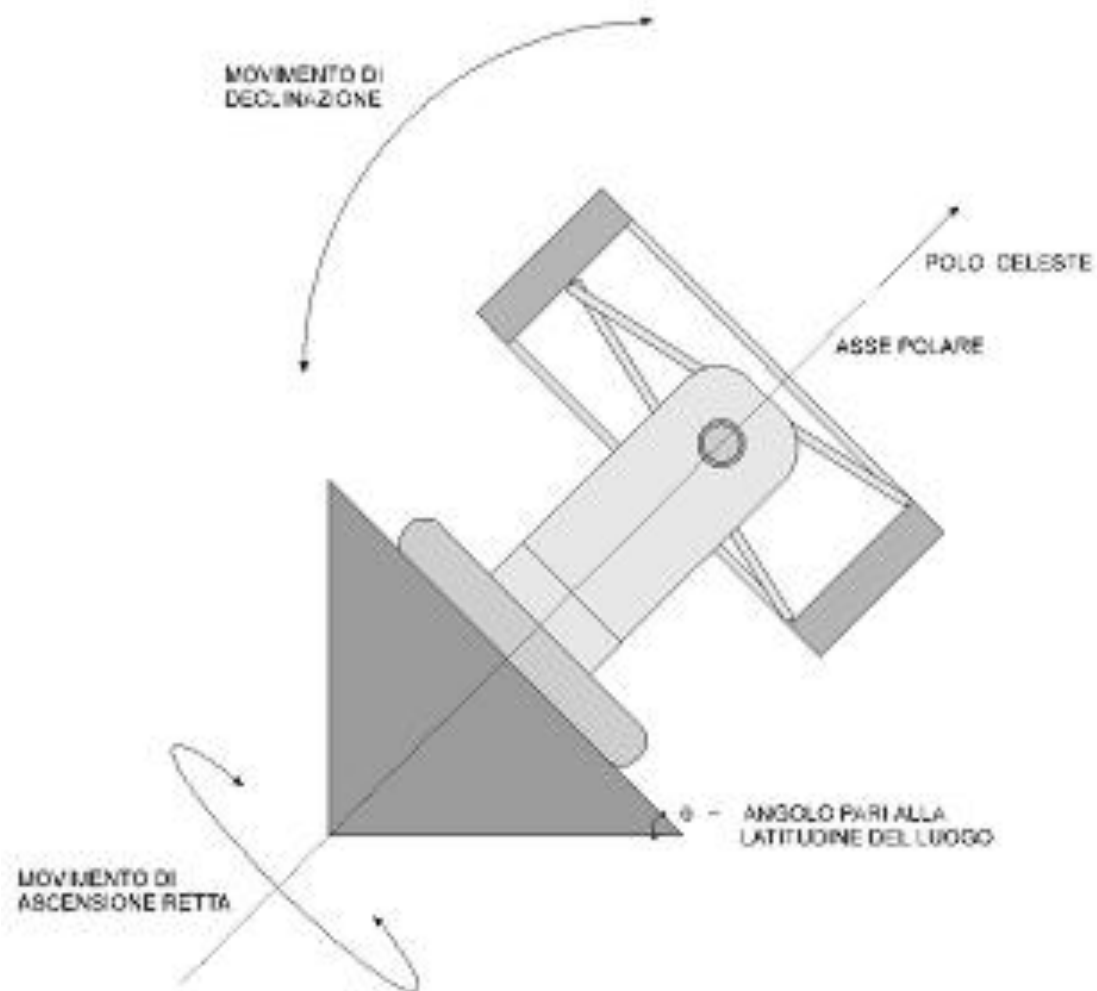
500 (1% selection) best images added together with the brightest pixel in each image moved to the same reference position.

Tipi di Montature

Montatura Altazimutale



Montatura Equatoriale



Montature Equatoriali

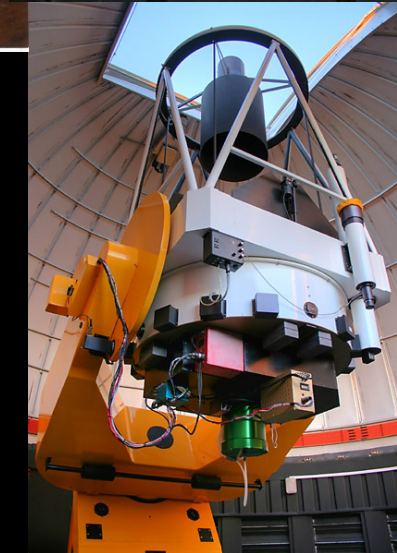
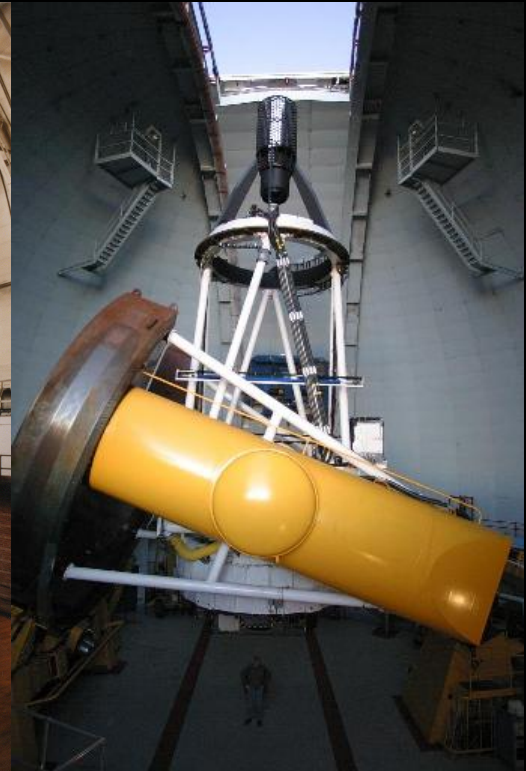
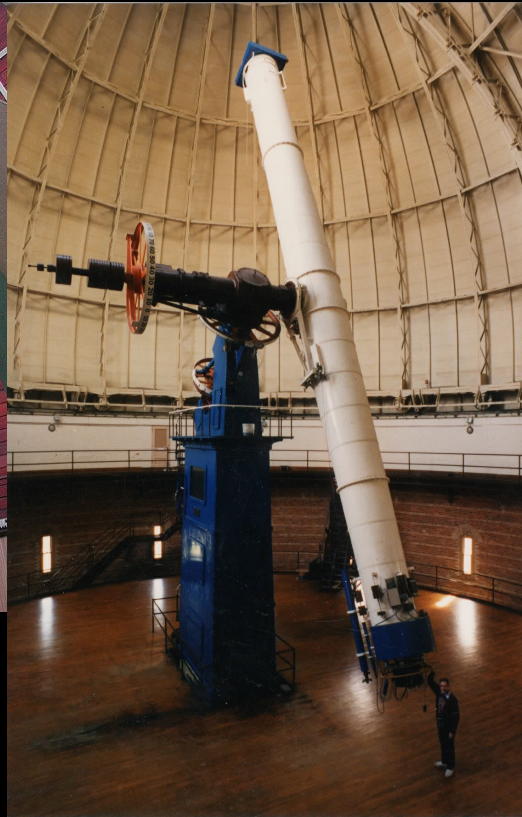
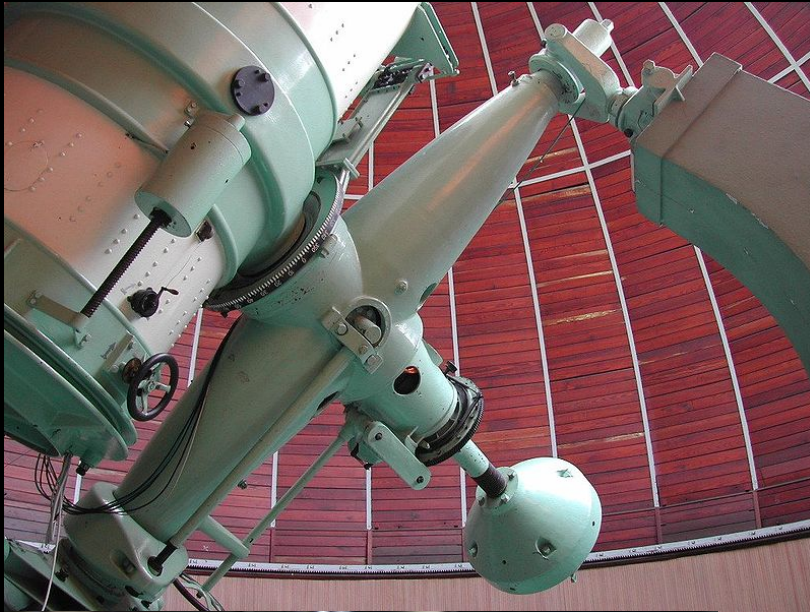
Pro:

- Facilità di puntamento a partire dalle coordinate equatoriali (RA, Dec)
- Un solo movimento per l'inseguimento

Contro (per grandi telescopi):

- Problemi meccanici (sbilanciamenti, torsioni, etc.)
- Ingombro e peso
- Una cupola necessariamente separata (maggiori volumi)

Svariati tipi di configurazioni equatoriali



Montature AltAzimutali

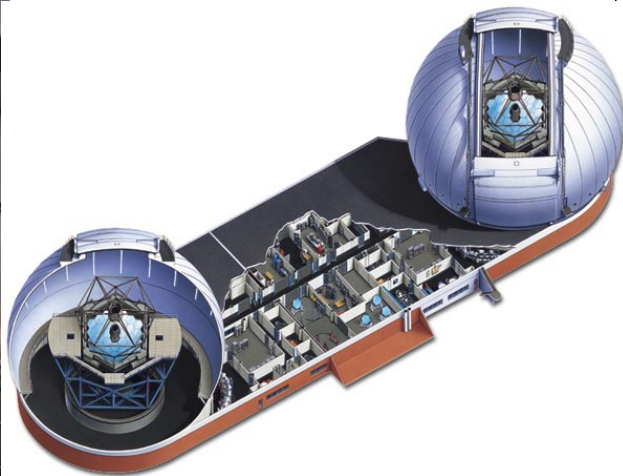
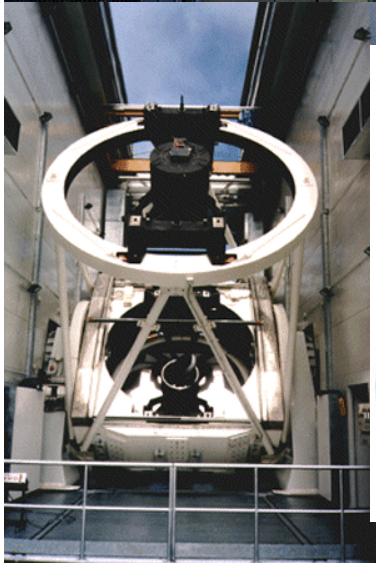
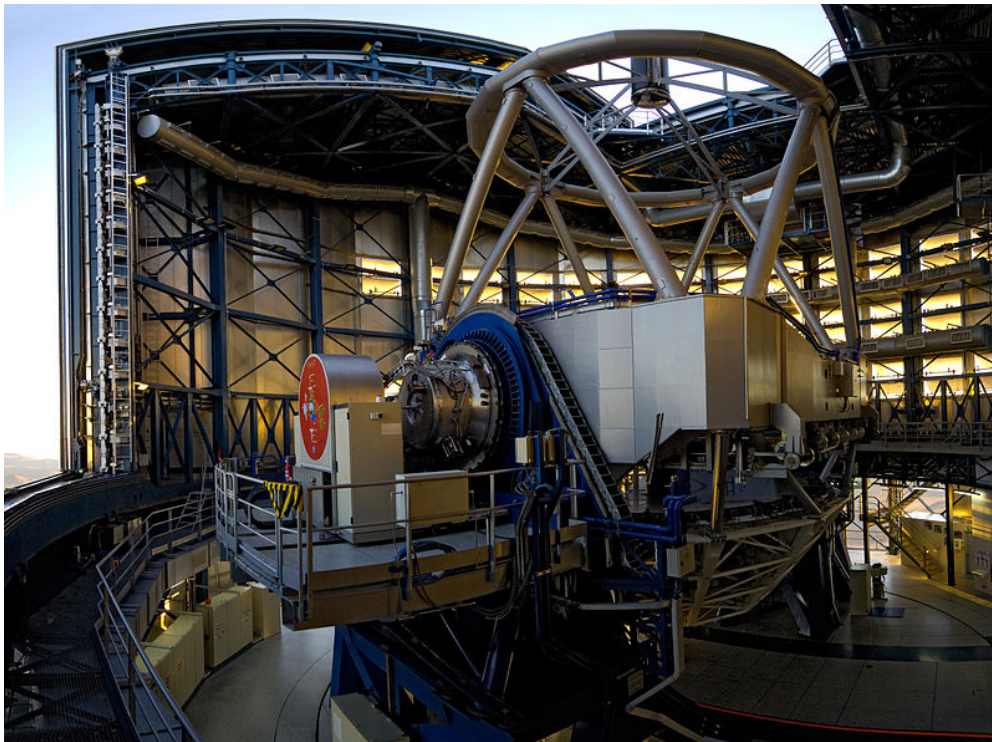
Pro:

- Semplicità meccanica
- Meno peso e ingombri
- Possibilità di avere un unico movimento di rotazione per telescopio e cupola

Contro:

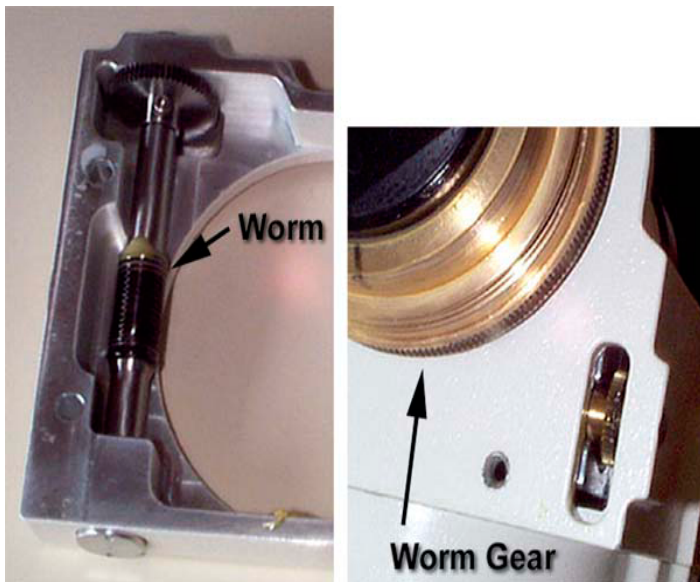
- Puntamento meno intuitivo a partire dalle coordinate equatoriali
- TRE movimenti: inseguimento + rotazione di campo.

Configurazioni Alt-Azimutali moderne



VLT (ESO)

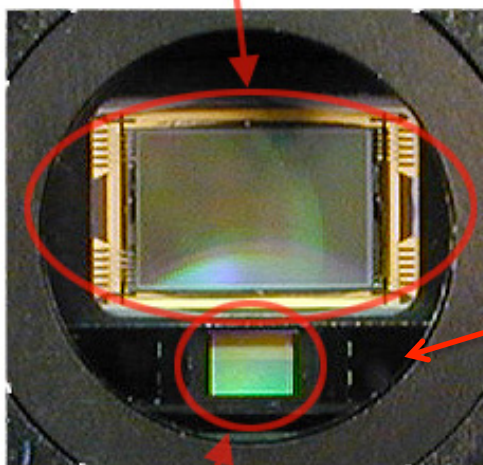
Tutte le montature vanno “guidate”



*Accoppiamento ruota dentata/vite
senza fine in una piccola montatura*



Main Imaging Chip



Guider Chip

Guida di una volta...

Guida moderna... (controllo al μm)