

Ottica dei telescopi

Dopo aver fornito alcuni cenni sull'ottica astronomica, mostriamo vari esempi di telescopi presenti e futuri, terrestri e spaziali, dal vicino UV al vicino IR.

Avvertenza:

non vengono trattati i telescopi solari!

non vengono trattati i telescopi Gamma e X, nè quelli IR e radio!

Si veda anche il capitolo: *Montature dei telescopi* che collega concetti di astronomia sferica con la meccanica e i controlli.

Per approfondire questi concetti, in particolare per l'ottica fisica, si veda anche la versione in inglese.

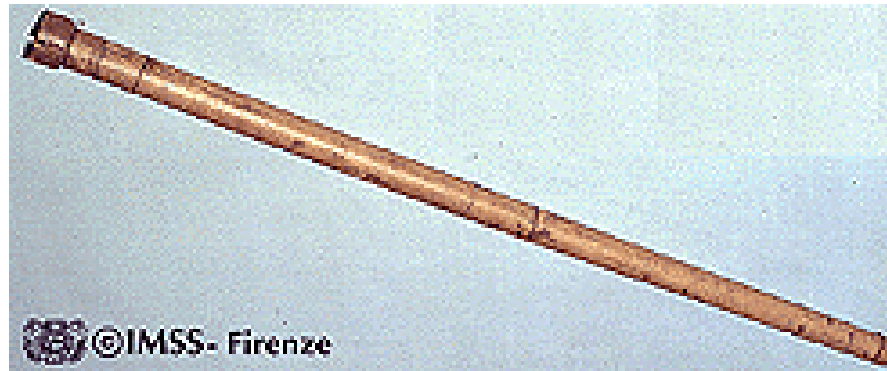
Come si studiano i corpi celesti?

La strada maestra è mediante **la luce**.

Solo in alcuni casi eccezionali si riesce a ottenere **materia** proveniente dagli astri, ad es. le meteoriti, il vento solare e i neutrini dal Sole, i raggi cosmici da sorgenti molto remote, ma sono appunto eccezioni.

Un caso particolare è il Sistema Solare, perché abbiamo la possibilità di inviare sonde su tutti i pianeti, sugli asteroidi, sulle comete (e l'uomo in orbita circum-terrestre, sulla Luna e forse tra pochi decenni su Marte). **Dunque, mentre l'Universo si osserva da lontano (da terra o dalle sue vicinanze), il Sistema Solare si può sia *osservare* da terra che *esplorare* da vicino.**

Astronomia e Ottica



Galileo e il suo telescopio con lente e oculare



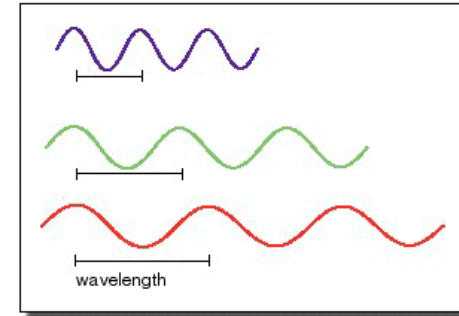
Astronomia e **Ottica** sono dunque sempre state **indissolubilmente legate**, sin dalla prima invenzione del cannocchiale (Galileo Galilei a Padova, verso il 1609), poi con Newton, e poi Campani, Fraunhofer, Ritchey, Schmidt fino ai nostri giorni.

Newton e il suo telescopio con specchio e oculare

La luce

La luce è la manifestazione visibile di un fenomeno molto più generale, che possiamo descrivere ricorrendo a due concetti complementari:

1. L'onda elettromagnetica di Maxwell
2. Il fotone di Einstein

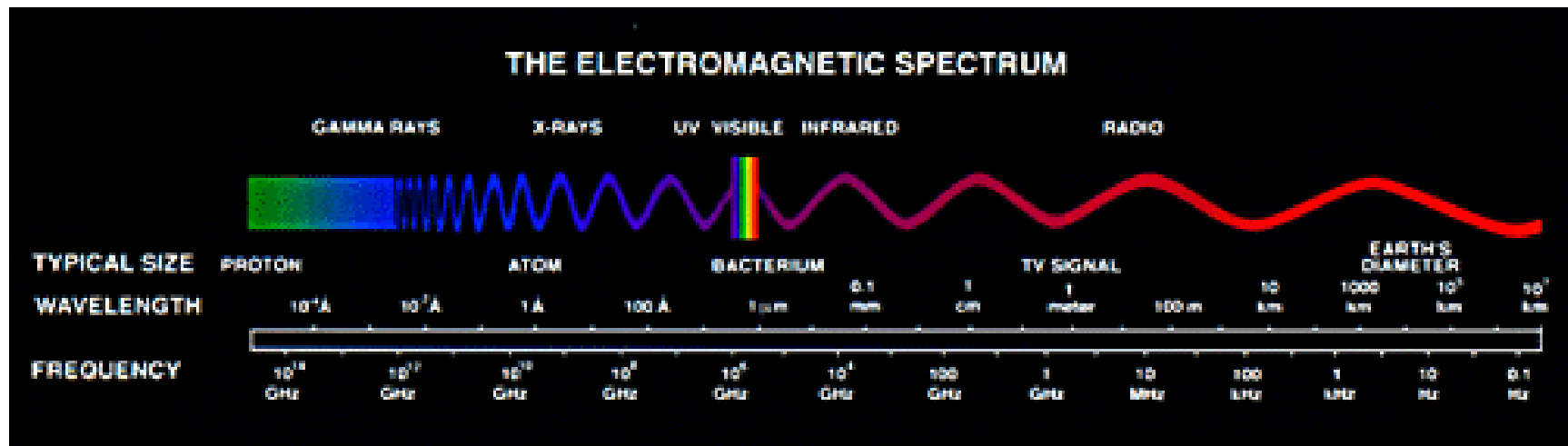


In entrambi i casi la luce è caratterizzata da:

- Lunghezza d'onda λ (misurata ad es. in cm, oppure in nanometri nm, oppure in micrometri μm oppure in Angstrom A, $1 \text{ A} = 10^{-8} \text{ cm}$)
- Frequenza ν (misurata in s^{-1} , cioè in Hertz Hz)
- Energia: $E = h\nu$ (misurata ad es. in erg)

Nel vuoto $\lambda = c/\nu$, dove $c \approx 3 \times 10^5 \text{ km/s}$ è la velocità della luce. La costante $h \approx 6.6 \times 10^{-27} \text{ cgs}$ è la **costante di Planck**.

Alcuni Concetti Ottici - 1



- In questi appunti verrà trattata solo l'astronomia 'tradizionale' (nel **visibile**, pur se esteso rispetto alla risposta dell'occhio umano), **non quella nelle onde radio e lontano Infrarosso, nè quella nell'UV e nei raggi X e Gamma.**
- L'intervallo tradizionale in λ per l'Astronomia da Terra è tra 3000 Å e 11000 Å (o anche, da 300nm a 1100 nm, o da 0.3μm a 1.1μm):
il limite inferiore è posto dalla trasparenza della atmosfera terrestre
il limite superiore dalla efficienza dei rivelatori e dalla trasmissione dell'atmosfera

Alcuni Concetti Ottici - 2

- l'estensione al vicino UV da 1000 Å a 3000 Å **è possibile solo dallo spazio**, e.g. con il telescopio spaziale Hubble (HST).
- L'estensione al **vicino IR** (da 1 μm a 20 μm) è possibile sia da terra che dallo spazio
- Per coprire questa larghissima banda ci vogliono differenti rivelatori, ma **le ottiche rimangono essenzialmente le stesse usate a terra.**

La divisione dei compiti



$$0.1 \text{ A} < \lambda < 1000 \text{ m}$$



Da terra si può osservare sia nella finestra 'tradizionale' dal blu al vicino IR che nelle onde radio. Per le altre bande (gamma, X, UV, lontano IR) si deve salire sopra alla atmosfera. Ecco il perché della astronomia dallo spazio (si possono anche usare razzi sub-orbitali e palloni stratosferici).

Alcuni Concetti Ottici - 3

La quantità di luce, o se si vuole di energia luminosa, F , che si raccoglie da un astro aumenta con l'area del telescopio, cioè con il **quadrato del diametro D** :

$$F = F_0 D^2 \quad (\text{erg/s, oppure Watt})$$

con F_0 opportuna costante.

Si noti che riserveremo la dizione '**flusso**' alla quantità **per unità di superficie**. Ad es., se il nostro occhio ha una pupilla con diametro 8 mm (un giovane con la pupilla molto dilatata), un telescopio con specchio di 8 m raccoglierà $(8000/8)^2 = 10^6$ volte più luce, a parità di flusso luminoso. Alternativamente, possiamo pensare che il numero di fotoni raccolti nell'unità di tempo sia:

$$n = n_0 D^2 \quad (\text{fotoni/s})$$

Dopo un tempo Δt avremo raccolto in totale $N = n\Delta t$ fotoni. L'astronomia è anche la scienza dei lunghi tempi di posa, talvolta Δt arriva a varie ore!

Alcuni concetti ottici - 4

Invece, la capacità di risolvere angoli piccoli cresce **solo linearmente con il diametro D**. Tale angolo limite Θ_{lim} (che possiamo considerare come l'inverso del *potere risolvante* PR) dipende anche dalla lunghezza d'onda λ :

$$\Theta_{\text{lim}} = (\text{PR})^{-1} = K \lambda / D \quad (\text{radianti})$$

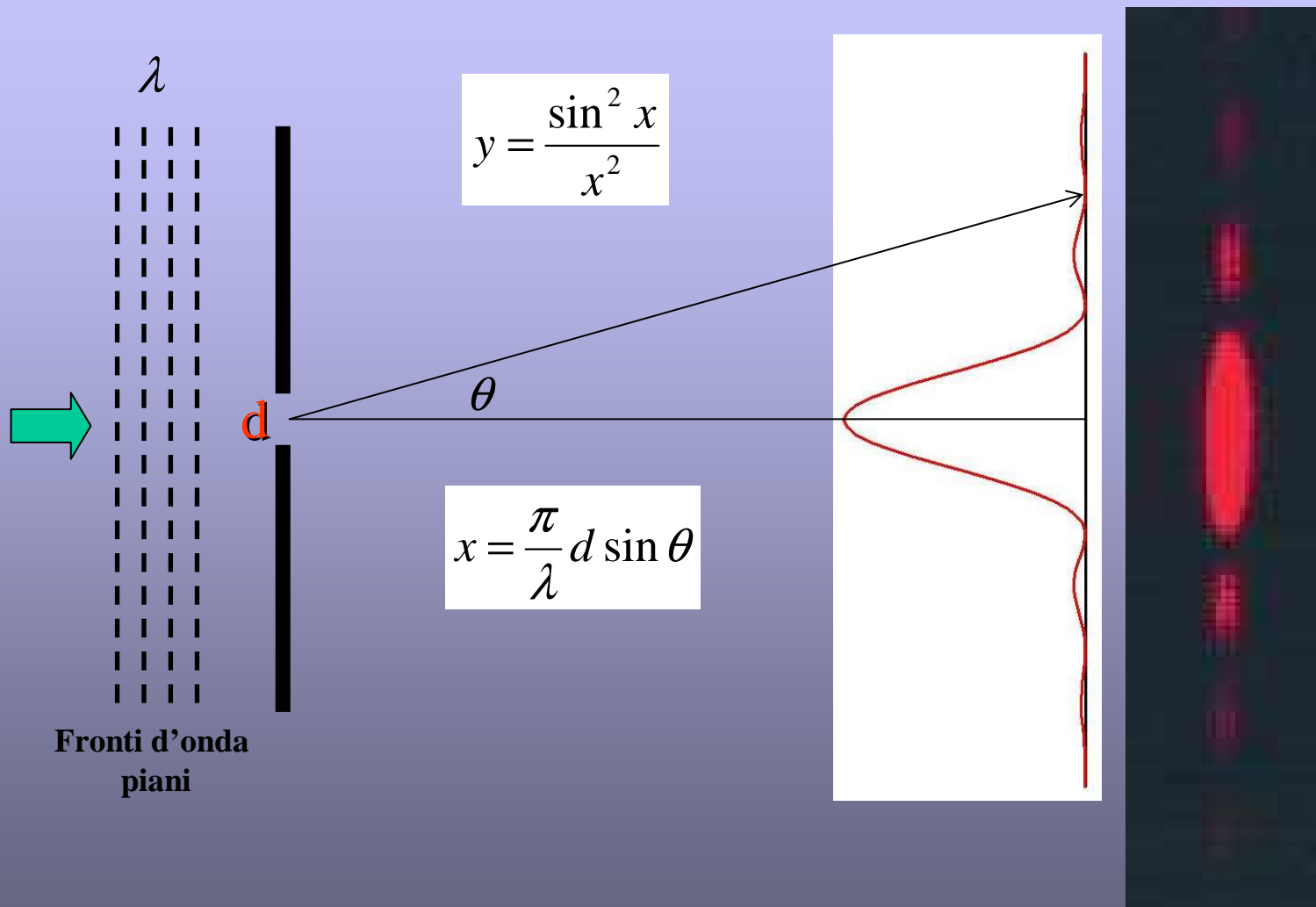
con K opportuna costante che dipende dalla forma dell'apertura. $K = 1.22$ se l'apertura (lente o specchio che sia) è circolare, e se si usano radianti per misurare gli angoli.

Secondo tale relazione, un telescopio di 5m nel visibile in teoria risolverà angoli a livello di 0".02

Il motivo di questa relazione sta nella natura ondulatoria della luce, più precisamente la legge $\Theta_{\text{lim}} = K \lambda / D$ è causata dalla **diffrazione**.

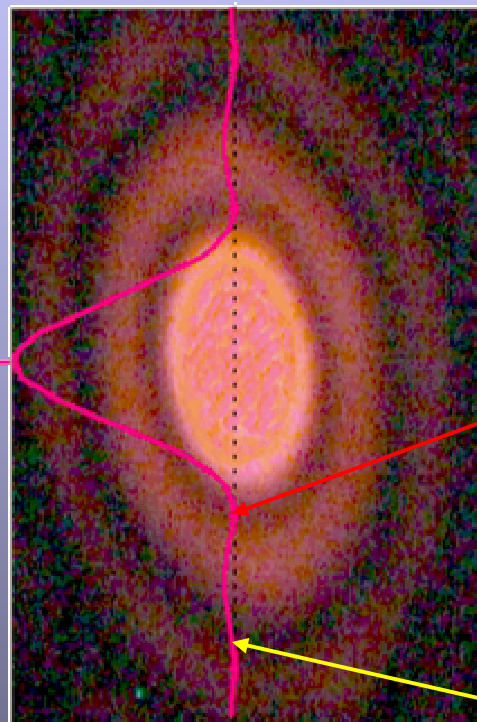
(a tale proposito, si vedano le lezioni in inglese)

Diffrazione da una fenditura



$$y = 0 \Rightarrow x = \pm\pi, \pm 2\pi, \dots, m\pi \Rightarrow d \sin \theta = m\lambda$$

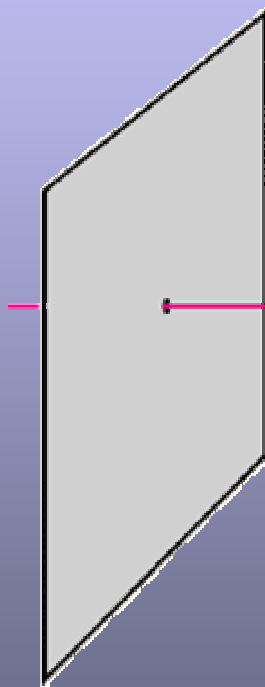
Disco di Airy



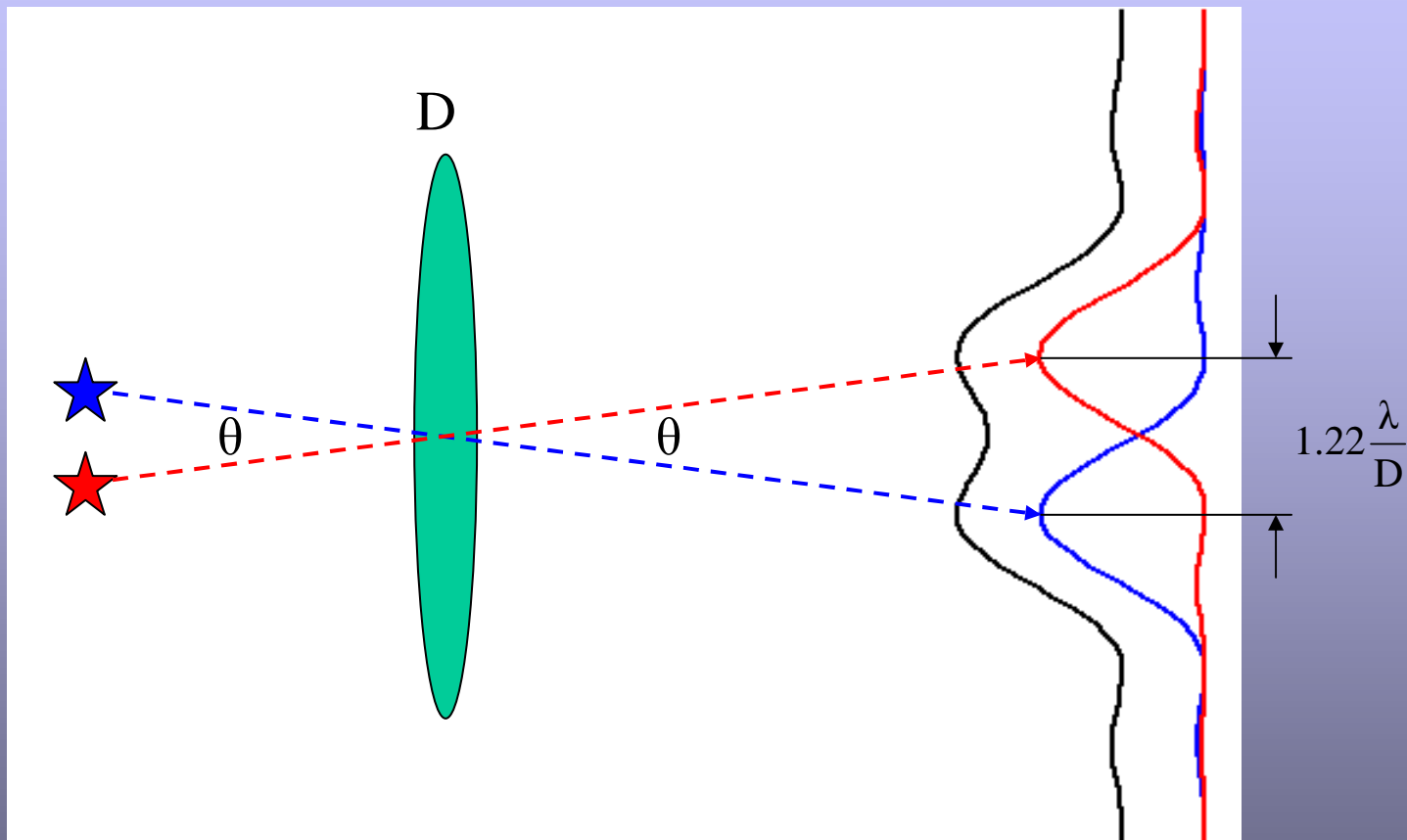
$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

$$\theta = 2.33 \frac{\lambda}{d}$$

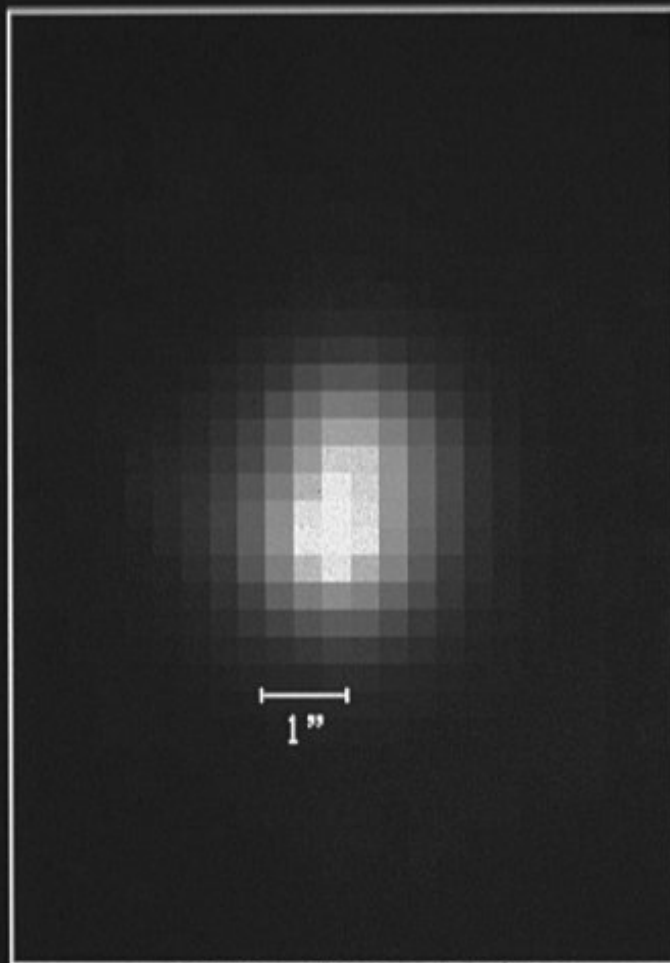
Fenditura circolare



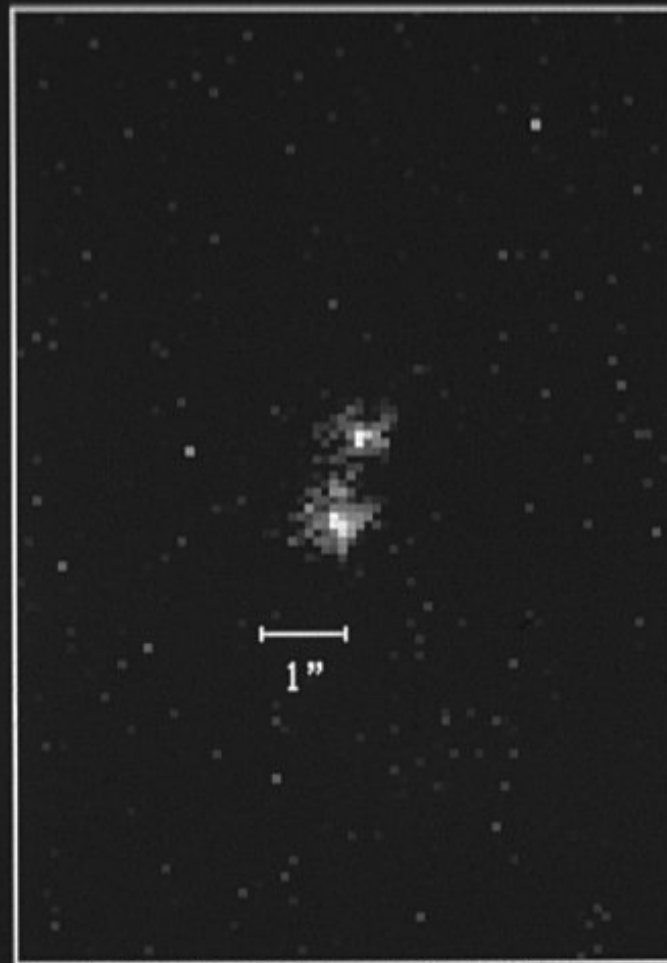
Potere risolutivo teorico del telescopio



Esempio: $D=10\text{m}$, $\lambda=5500 \text{ \AA} \rightarrow \theta=0.014''$
 $D=10\text{m}$, $\lambda=5 \text{ cm} \rightarrow \theta=21'$



GROUND BASED IMAGE
LAS CAMPANAS OBSERVATORY
CARNEGIE INST. OF WASHINGTON



HUBBLE SPACE TELESCOPE
WIDE FIELD/PLANETARY CAMERA

NASA



(a)



(c)



(b)



(d)



Telescopi sempre più grandi

I due motivi appena detti:

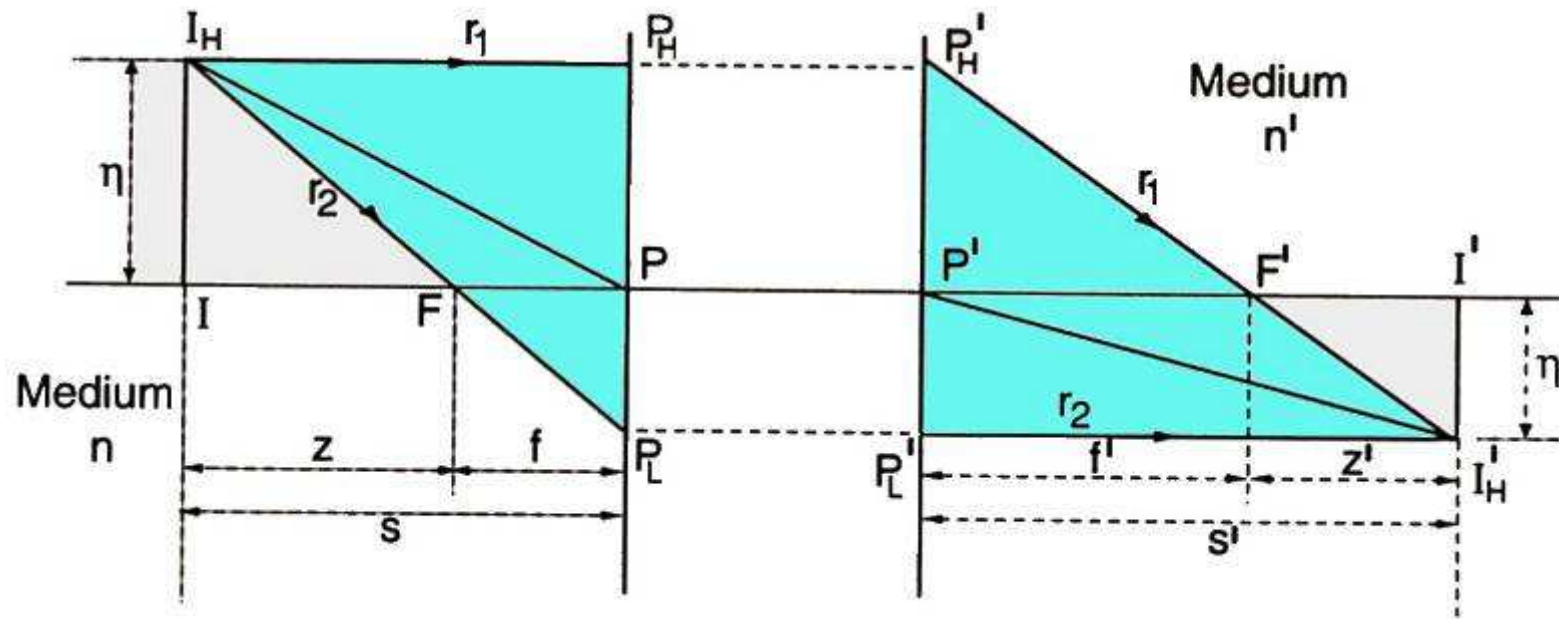
1. raccogliere quantità di luce sempre più piccole
2. distinguere dettagli angolari sempre più piccoli

sono alla base dell'incessante crescita di diametro dei telescopi astronomici.

I maggiori oggi **al suolo** hanno diametri fino a circa 10 metri, e cresceranno nell'immediato futuro fino a 30 o 50m.

Il maggiore oggi **in orbita** (HST) ha diametro 2.4m, e si prevede che verso il 2013 ci sarà il JWST (James Webb Space Telescope) con diametro di 6.5 metri, nel punto lagrangiano L2 del sistema Sole-Terra.

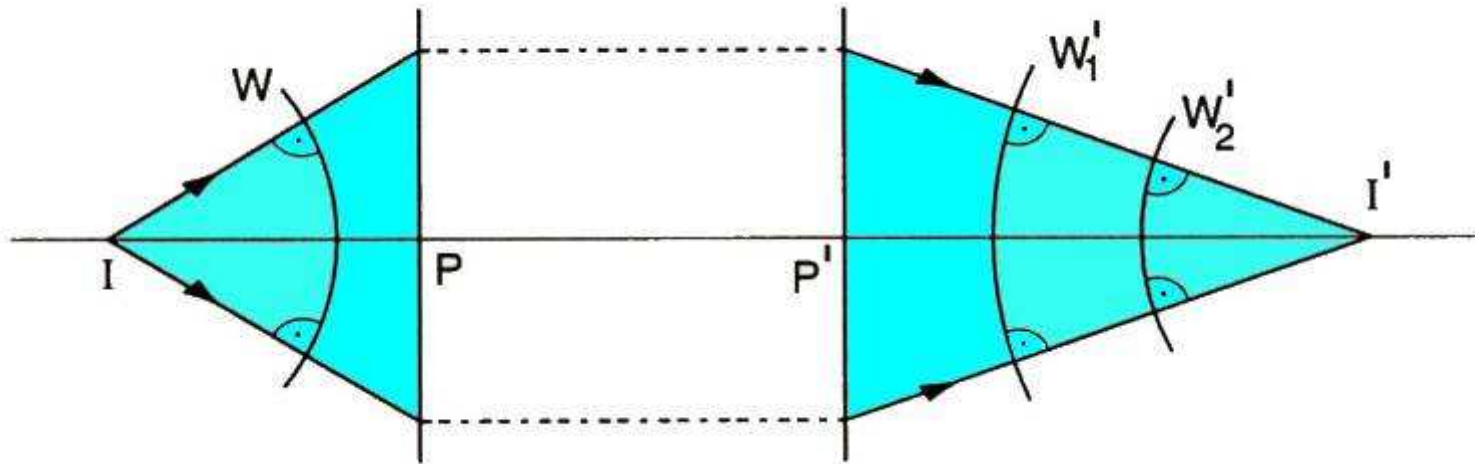
Il sistema ottico ideale



Il sistema ottico *ideale* (che sta tra P e P') riproduce l'oggetto sorgente (I a sinistra) senza distorsioni sul piano focale (immagine I' a destra), anche se di solito la inverte e la rimpicciolisce.

In quasi tutte le applicazioni astronomiche si assume che il mezzo in cui si propaga la luce sia il *vuoto* (cioè l'indice di rifrazione vale $n = n' = 1$ da entrambi i lati del sistema ottico; dentro alla lente invece sarà $n'' > 1$). Inoltre, l'oggetto è a distanza praticamente *infinita* (vero anche per la Luna).

Descrizione come fronte d'onda

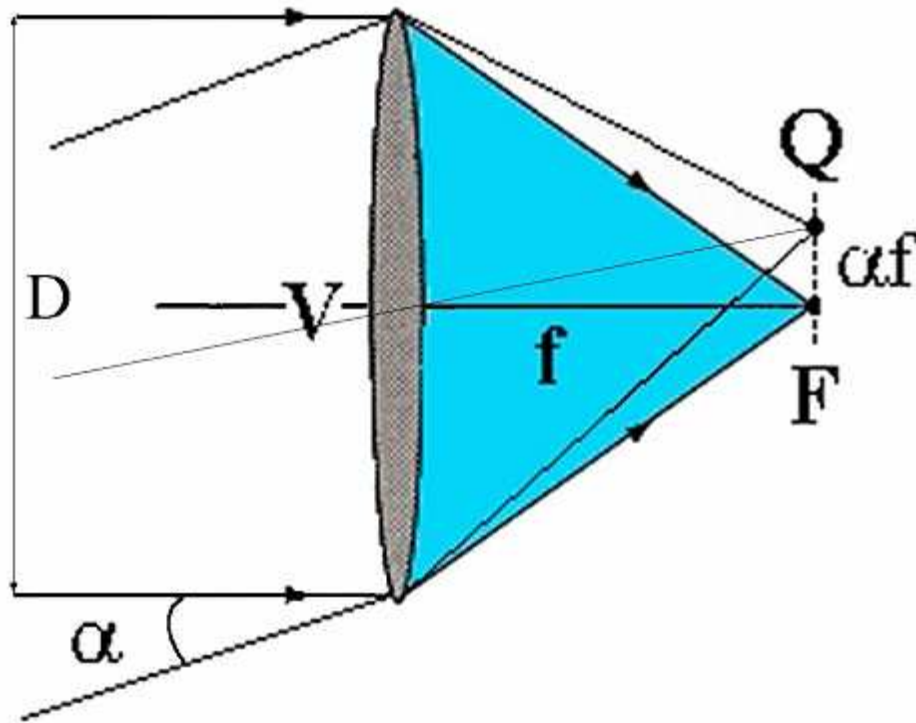


Un altro modo di descrivere la propagazione della luce è in termini di fronte d'onda (**geometrico per ora**), senza **ancora utilizzare l'ottica fisica (ondulatoria)**.

L'onda sferica **W** incidente dal punto **I** è trasformata dal sistema ottico ideale tra P e P' in un'onda pure sferica **W'** focalizzata in **I'**.

Telescopio come lente sottile

Un semplice modello di *telescopio come lente sottile* sarà spesso sufficiente per i presenti scopi.



La lente sia caratterizzata dai seguenti parametri:

$D = 2R$ = diametro (ad es. in m)

V = vertice

f = lunghezza focale (ad es. in m)

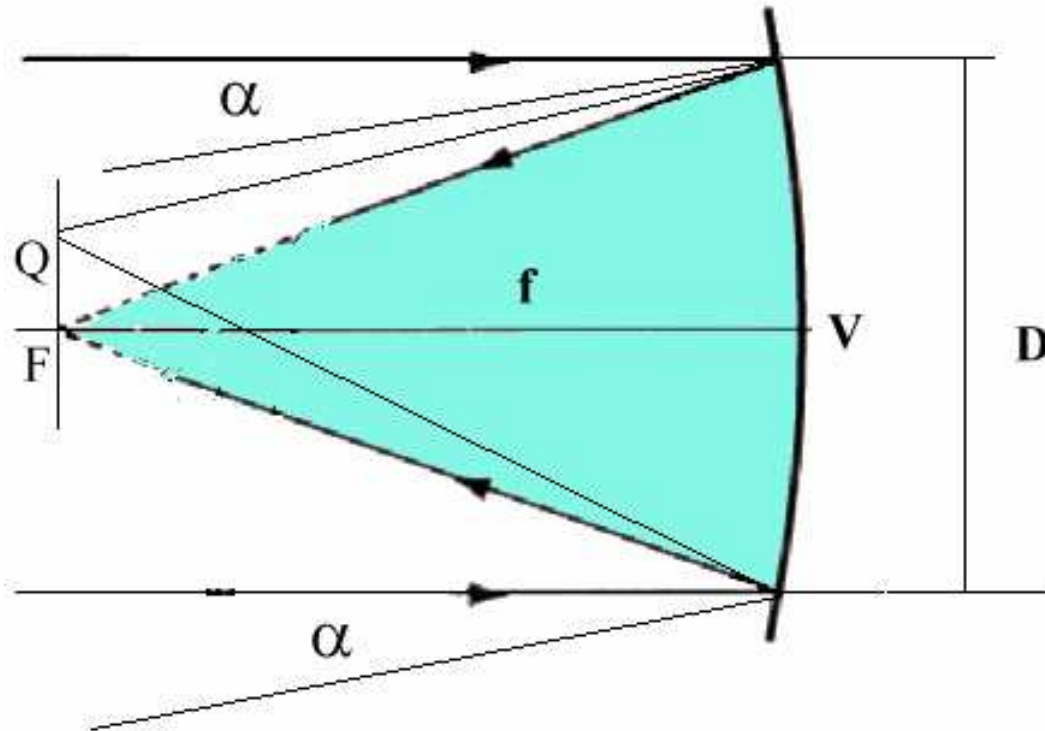
F = fuoco stella in asse

Q = fuoco stella fuori asse di α (radianti, $\alpha \ll 1$)

αf = distanza immagine di Q da F (ad es. in mm)

FQ = piano focale

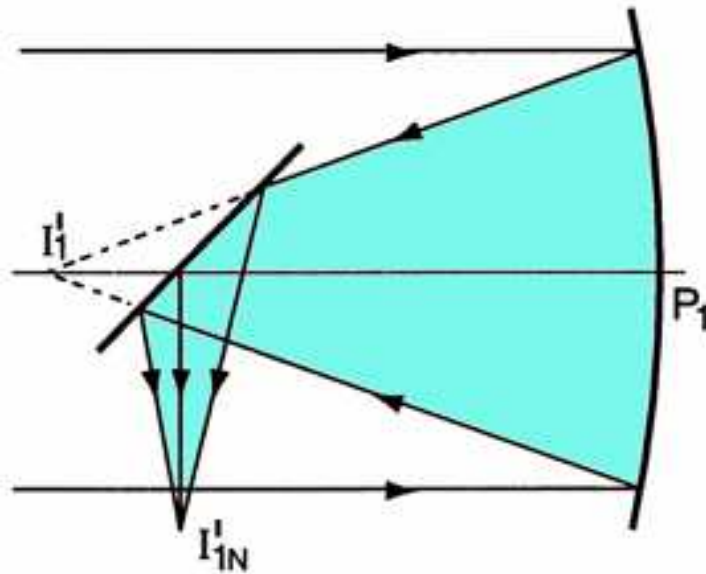
Specchio equivalente



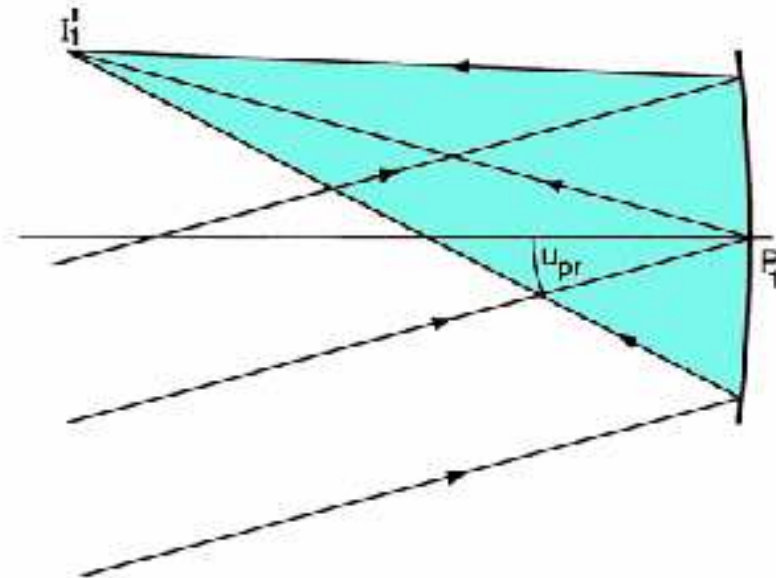
Tuttavia i grandi telescopi non sono a lenti (le dimensioni massime di una lente astronomica sono intorno a 1 m) ma **a due o tre specchi**.

I telescopi a lenti sono detti *rifrattori*, quelli a specchi *riflettori*.

Un solo specchio, primo fuoco



Newton form



Herschel form

Da uno specchio parabolico, la luce va al primo fuoco I'_1 (dove si può mettere l'osservatore a spese di una ostruzione centrale, ad es. al 5m del Palomar). Su un telescopio più piccolo (ad es. il 122cm di Asiago), seguendo l'esempio di Newton si può aggiungere uno specchio a 45°, che non introduce aberrazioni ma che polarizza la luce. Herschel invece preferì una soluzione *fuori-asse* (che non ha ostruzione centrale), e che pure è impiegata in Astronomia.

Il primo fuoco del 5m Palomar



- Prima dell'avvento di camere televisive e rivelatori a stato solido, gli astronomi passavano le notti nella gabbia al primo fuoco.
- Oggi, al primo fuoco di molti grandi telescopi (ad es. LBT) ci sono camere a grande campo (fino a 1°) che però richiedono un correttore di aberrazioni, o spettrografi a multifibre ottiche.

Tipi di Ottica dei telescopi

Dunque abbiamo due grandi famiglie di telescopi:

- Rifrattori (o anche diottrici, cioè a lenti), limitati in dimensioni a $\approx 1\text{m}$, e affetti da **cromatismo**
- Riflettori (o anche catottrici, cioè a specchi): **tutti i grandi telescopi sono riflettori, ed è su questi che concentreremo la nostra attenzione.**

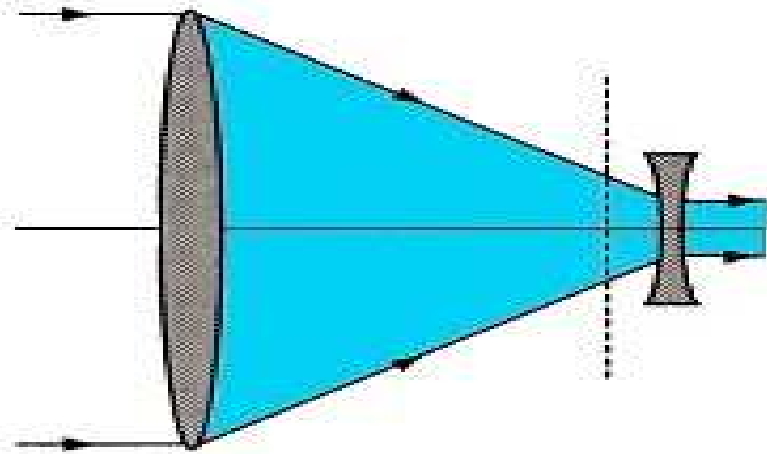
Le lenti sono comunque utili, da un lato per schematizzare e visualizzare i vari concetti ottici, dall'altro perchè si impiegano anche all'interno dei grandi telescopi, ad esempio dentro agli spettrografi.

La teoria al primo ordine di Gauss (1841)

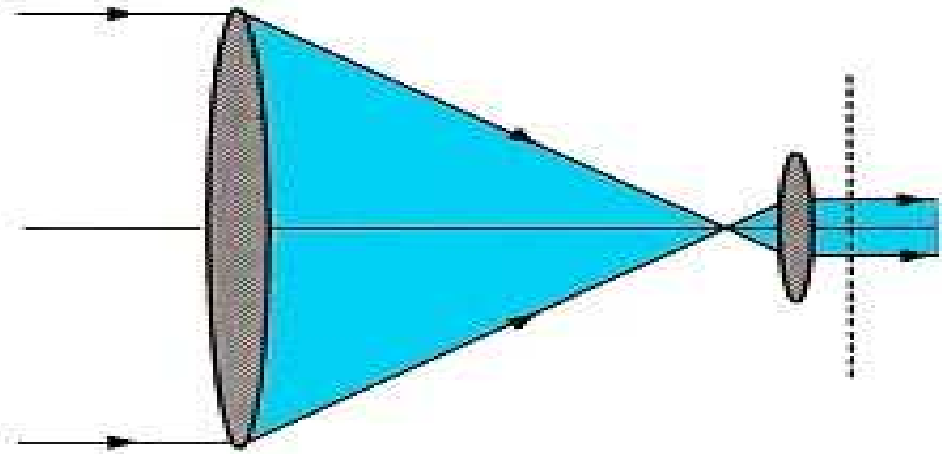
- Le superficie ottiche sono superficie di rivoluzione di II grado: $z = c \cdot y^2$
- La legge di Snell è lineare: $n \cdot \sin \theta = n' \cdot \sin \theta' \Rightarrow n \cdot \theta = n' \cdot \theta'$
- Data una lente (o uno specchio concavo) che siano parte di una sfera di apertura D e vertice V , i raggi provenienti dall'infinito (cioè da qualunque corpo celeste) e paralleli all'asse ottico* convergono nel fuoco F , $FV = f = \frac{1}{2}r$ (r = raggio di curvatura della sfera)
- Raggi paralleli provenienti dalla direzione α ($\alpha < \epsilon$) convergono nel punto Q , $QF = f \cdot \tan \alpha \approx f \cdot \alpha$ (mm); QF è il *piano focale*
- Il rapporto $f/D = f/$ è la cosiddetta apertura *numerica*, o **numero $f/$** , dello specchio. Alcuni valori di $f/$: da 10 a 5 (molti telescopi del passato), 3 (5m Palomar), 2.2 (NTT, TNG), 1.7 (VLT), 1.14 (LBT, il caso estremo). Incidentalmente, molti radiotelescopi hanno $f/ < 1$.

* *Una superficie sferica non ha propriamente un 'asse', intendiamo qui l'asse di rivoluzione della calotta sferica che costituisce l'obiettivo.*

Telescopii + oculari

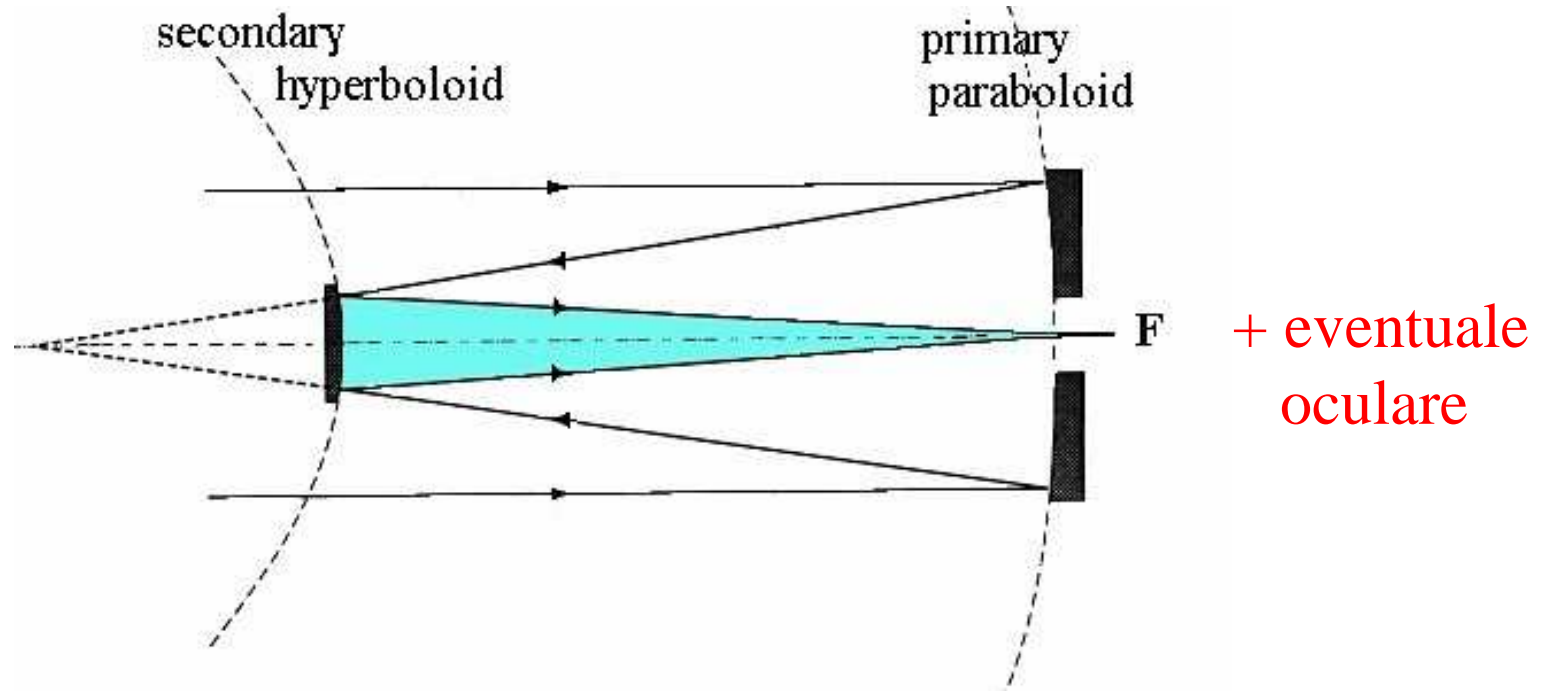


Galileo-type refractor

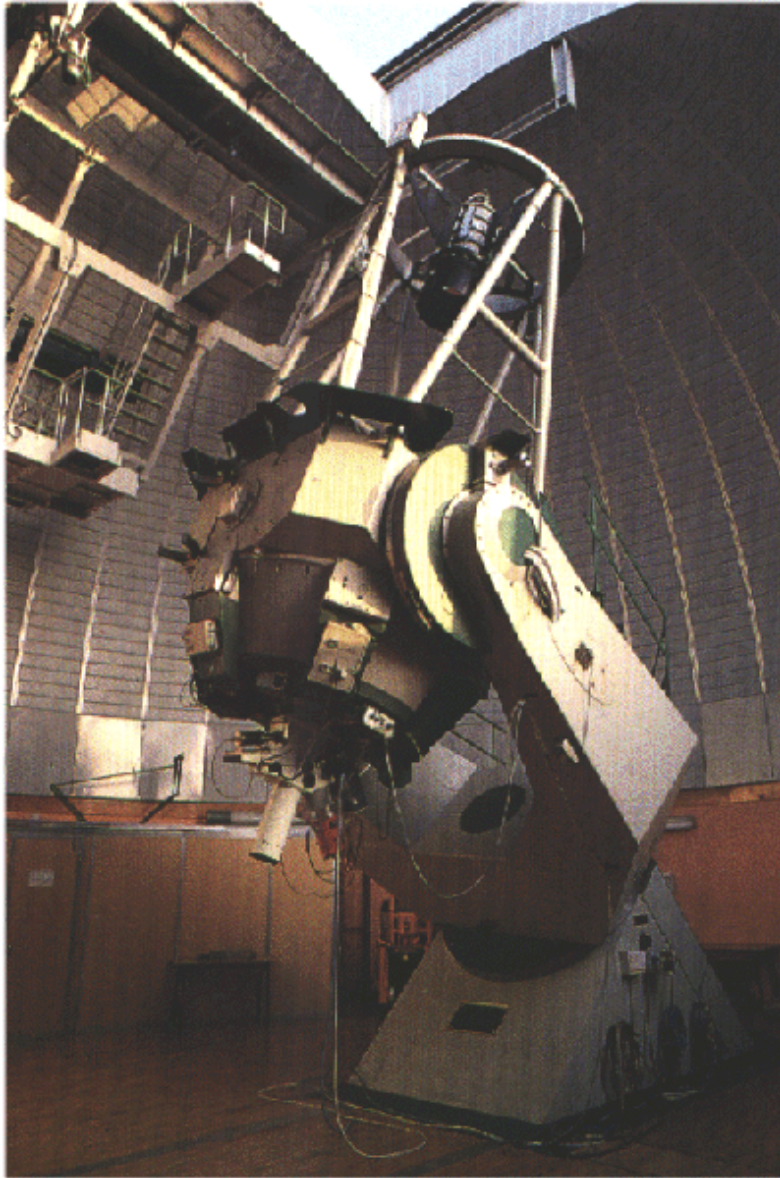


Kepler-type refractor

Lo schema Cassegrain



Lo schema classico Cassegrain di telescopio focale a due specchi. Il fuoco esce sul retro del primario.



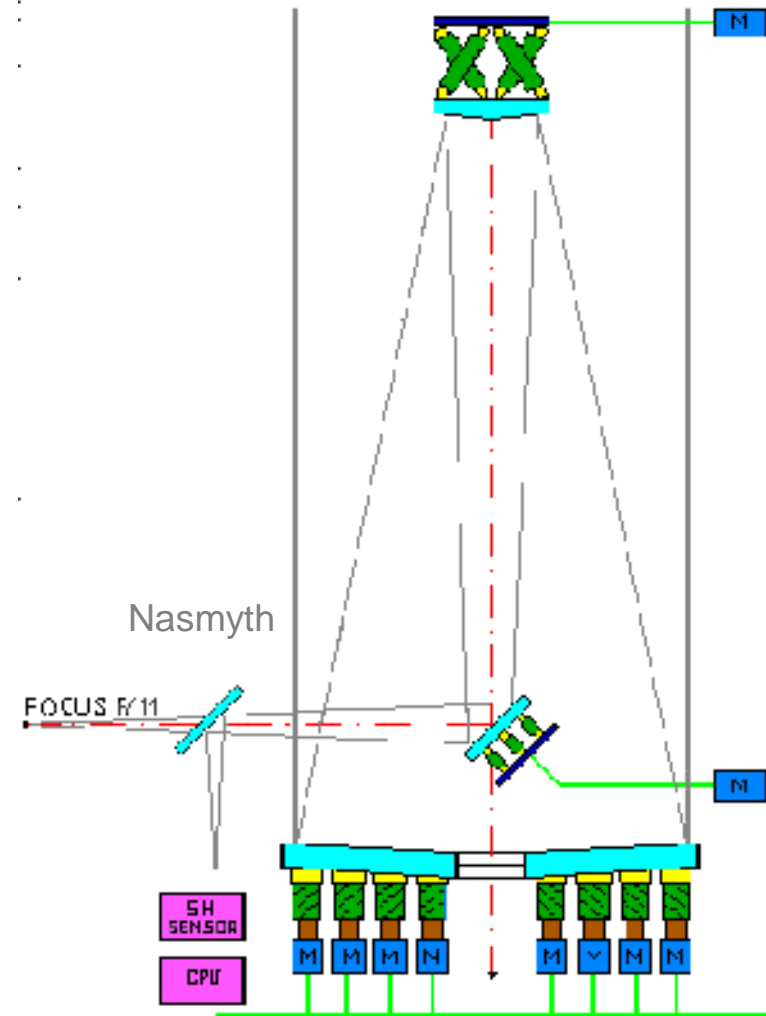
Esempio: Il 182-cm a Cima Ekar

Inaugurato nel 1973 e dedicato a Copernico, è il maggior telescopio sul suolo nazionale.

Oltre al fuoco Cassegrain $f/9$, è accessibile un fuoco Nasmyth.

La variante Nasmyth (1845) della configurazione Cassegrain

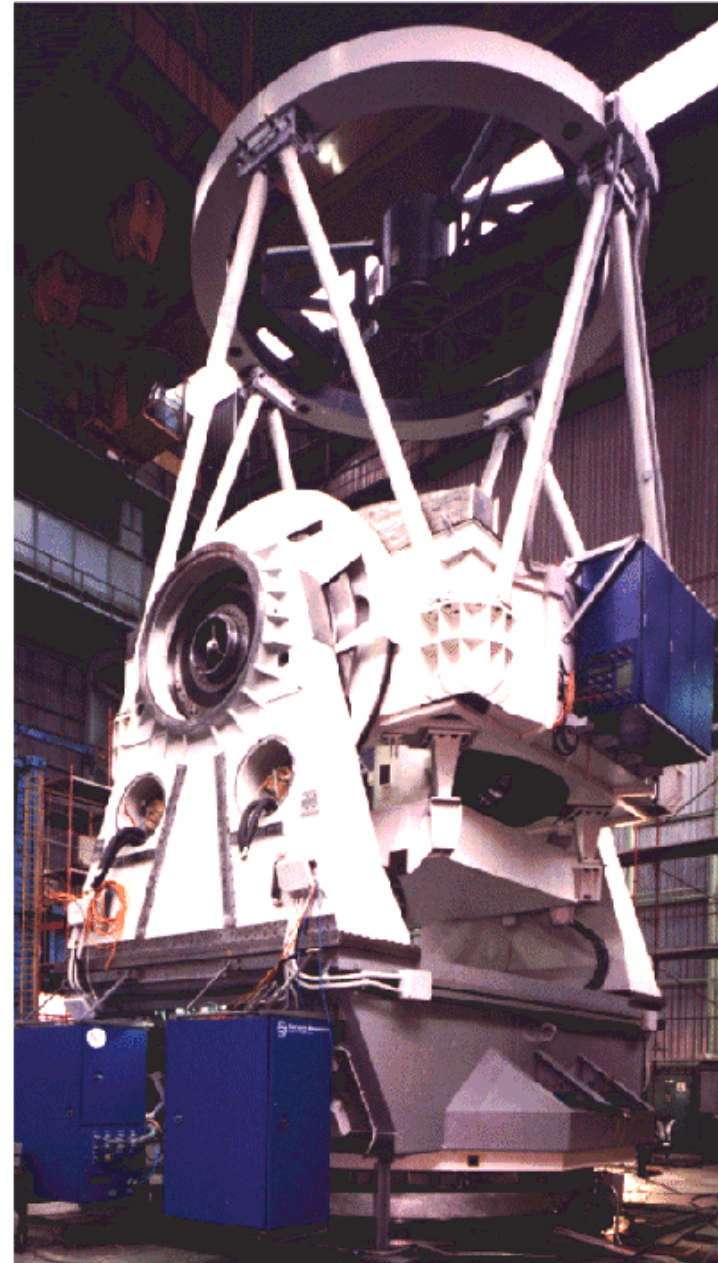
- La variante *Nasmyth* si ottiene ponendo un terzo specchio piano prima del fuoco Cassegrain, alla intersezione dell'asse ottico con quello di elevazione; il fuoco uscirà sopra al primario sul fianco del tubo. Lo specchio piano non cambia il numero $f/$, e non introduce ulteriori aberrazioni (anche se la luce è polarizzata).
- La stessa variante si può utilizzare per l'ottica Ritchey-Chrétien che vedremo tra poco.



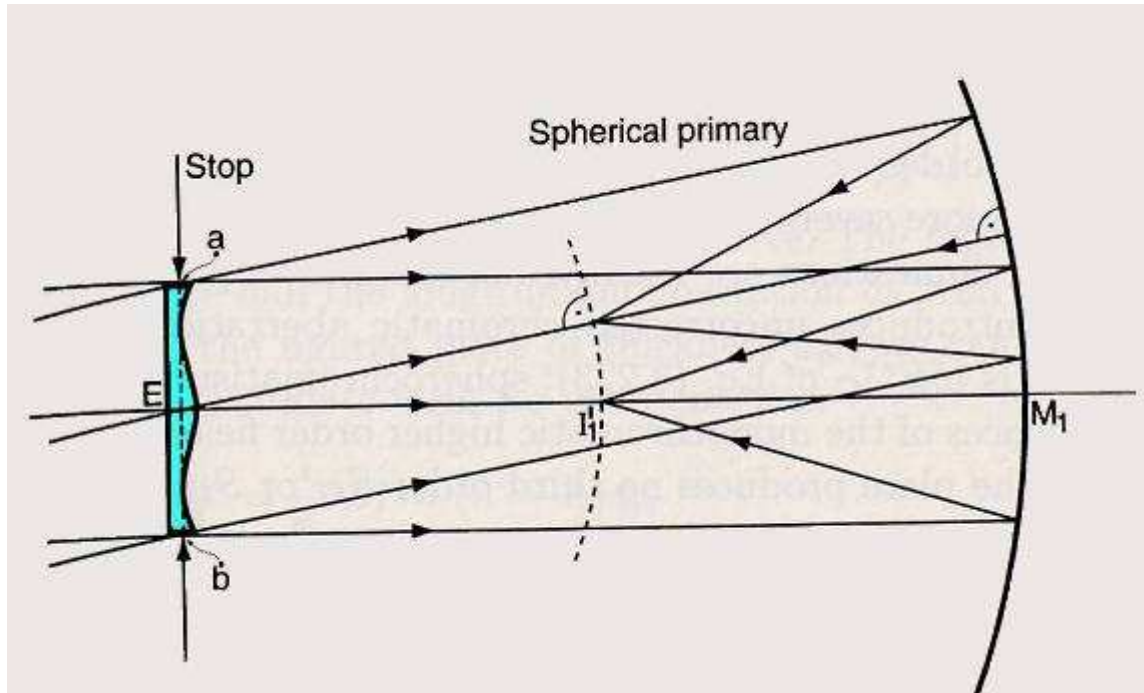
L'ESO NTT e il TNG hanno solo fuochi Nasmyth

Il TNG in officina (1995). Non c'è spazio per un fuoco Cassegrain. Si nota la montatura Alt-Az, i cui vantaggi sono: flessioni controllate, struttura più leggera, cupola più piccola.

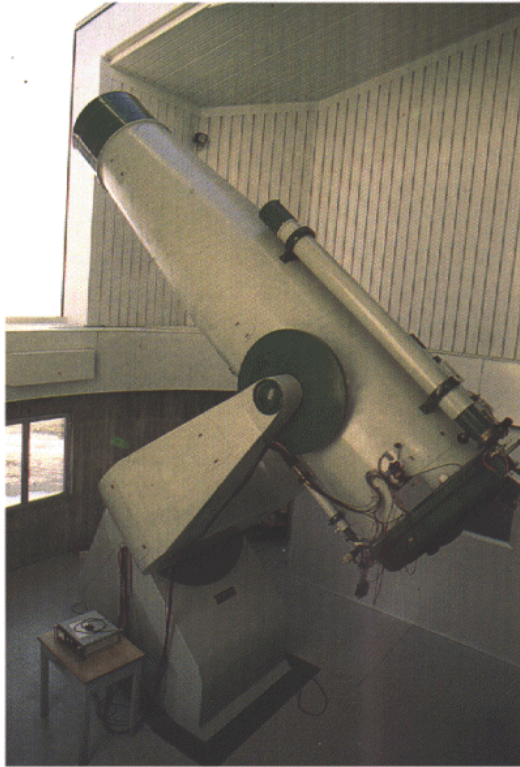
Svantaggi: 3 assi (rotazione di campo) con velocità variabile; piccola zona cieca allo Zenith; polarizzazione strumentale variabile.



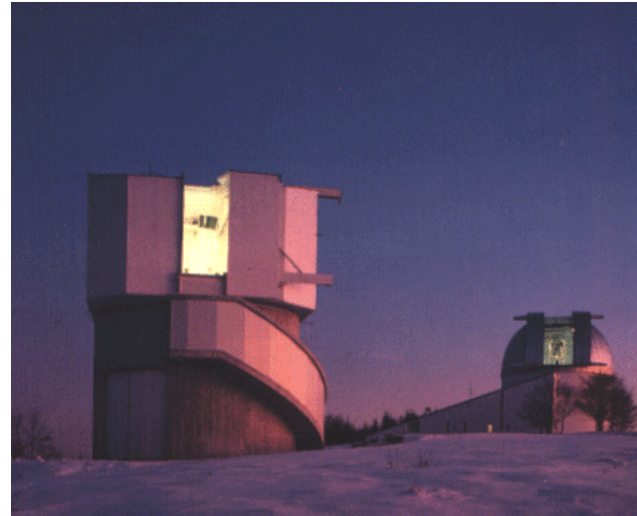
Il grande campo: il telescopio Schmidt



Un modo di minimizzare le aberrazioni su un grande campo fu trovato da B. Schmidt (1932) inserendo una lastra correttiva al centro di curvatura di uno **specchio sferico**. La lastra rifratrice ha una particolare forma (superficie del 4 grado), e la combinazione può minimizzare le 3 aberrazioni su una superficie curva *convessa verso il primario* (il suo raggio di curvatura essendo metà di quello dello specchio primario). Il campo di vista corretto raggiunge ≈ 0.1 radianti, l'apertura numerica $f/$ è di solito 2.5 o 3, il cromatismo è accettabile. Tuttavia il tubo del telescopio è abbastanza lungo, e lo specchio è nettamente più grande della apertura utile (lo stop di ingresso).



Lo Schmidt S67/92cm di Asiago - Cima Ekar



È il secondo Schmidt costruito a Asiago (1966), dopo quello più piccolo del 1956 (40/50 cm).

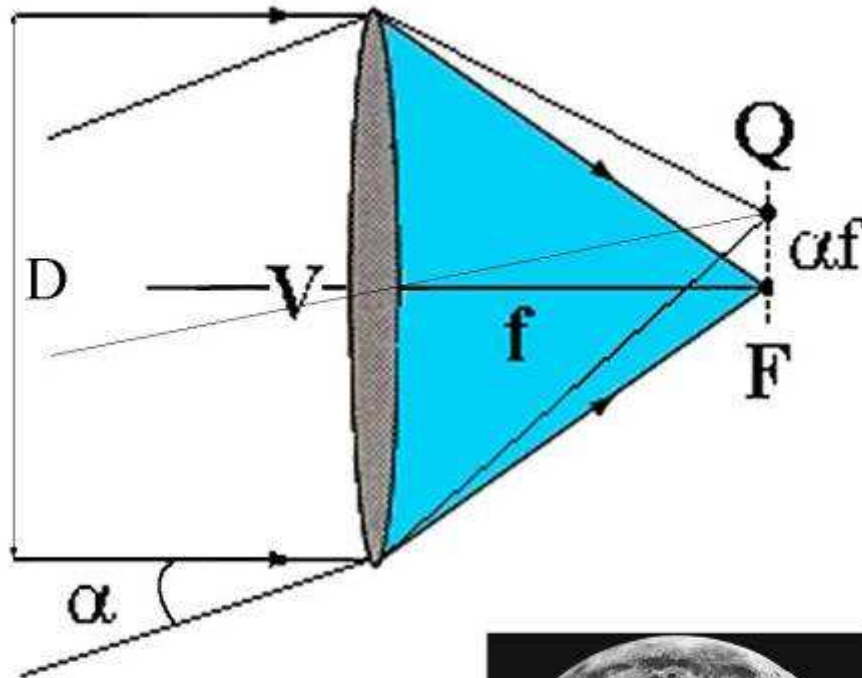
Telescopi Schmidt di dimensioni maggiori (fino a 120 cm di primario) sono al Palomar, a Tautenberg, a La Silla, in Australia, etc.

La difficoltà odierna con tutti gli Schmidt è la mancanza di rivelatori di grande area sensibile, una volta abbandonata l'emulsione fotografica. Si montano perciò grandi camere con mosaici di CCD ma su un campo più piccolo di quello originale.

La scala del telescopio

- Il parametro $s = 206264.8/f$ è la *scala angolare* del telescopio (arcsec/mm)
- *Non si confonda l'ingrandimento con la scala*; l'ingrandimento è il rapporto tra la focale del telescopio e quella dell'oculare, serve dunque per osservazioni visuali. E' facile avere ingrandimenti di 1000 o oltre, ma in pratica la turbolenza atmosferica e la qualità delle ottiche limitano i valori utili a 200, o 300.
- Il parametro s va confrontato con le dimensioni dell'elemento di immagine (ad es. le dimensioni del pixel del CCD in micrometri) sul piano focale del telescopio, per ottenere la *scala spaziale* dello strumento. Ad es, se la focale f fornisce $s = 10''/\text{mm}$ e il CCD ha pixel di lato $10\mu\text{m}$, avremo scala spaziale di $0''.1/\text{px}$ (la risoluzione effettiva causata dalle sole dimensioni finite del pixel sarà circa di $0''.2$, in virtù del teorema del *campionamento di Shannon*).

Esempio con la Luna



$$2\alpha(\text{Luna}) = 32'$$



f = focale (mm)

D = diametro lente o specchio

f/D = numero f , $f/$

Ogni punto della superficie lunare è una sorgente all'infinito, distante $0 \leq \theta \leq \alpha$ dal centro.

Si ricordi che:

$$1 \text{ radiante} = 180^\circ / \pi \approx 57.3^\circ = 206264.8''$$

Nella teoria al primo ordine
gli angoli vogliono molto piccoli !

Le aberrazioni geometriche - 1

La teoria di Gauss al I ordine fissa solo i parametri principali del sistema ottico e la **posizione** dell'immagine, ma non è adeguata a descrivere la **qualità** dell'immagine stessa. I parametri cruciali sono la distanza **h** del raggio dal vertice **V** e il suo angolo con l'asse ottico. **Solo se $h \ll$** raggio di curvatura (raggi parassiali), e **se** gli angoli **α** sono piccoli, la teoria gaussiana è sufficiente. In generale, l'immagine conterrà **aberrazioni geometriche**: un punto sorgente produrrà in prossimità del piano focale non un punto immagine, ma una volume tridimensionale involupato da una superficie chiamata **caustica**.

Ad esempio, uno specchio **sferico** non fornisce una immagine puntiforme di un punto all'infinito, ma una caustica, perchè il fuoco dei raggi parassiali dista dal vertice dello specchio più del fuoco dei raggi marginali. Il meglio che si possa fare è di mettersi su un piano intermedio tra i due fuochi, cioè sul piano di **minima confusione**. Il diametro angolare del cerchio di minima confusione per aberrazione sferica è **$128(f/)^3$** radianti (dunque 1" per un $f/12$).

Le aberrazioni geometriche - 2

Un sistema ottico di specchi o di lenti sarà dunque in generale affetto da vari tipi di aberrazioni geometriche, che vengono dette: **aberrazione sferica, curvatura di campo, coma, astigmatismo, distorsione**, e che vedremo tra breve.

Le lenti hanno una aberrazione in più rispetto all'equivalente a specchi, cioè il **cromatismo**, che però può essere minimizzato con una opportuna combinazione di vetri a diverso indice di rifrazione (doppietti, tripletti, etc.).

Un eccellente rifrattore costruito da Fraunhofer per G.W. Struve



Con questo telescopio rifrattore, all'epoca il più grande al mondo e con ottica molto ben corretta, Struve a Dorpat (oggi Tartu, Estonia) misurò la parallasse trigonometrica di Vega (1838).

Le aberrazioni geometriche - 3

La generica sezione di una superficie a simmetria di rivoluzione attorno all'asse ottico z è: $z = cy^2 + a_1 y^4 + a_2 y^6 + \dots$

Se la distanza h del raggio dall'asse non è piccola (tali raggi si dicono marginali), bisogna mantenere le potenze di **y superiori alla seconda**.

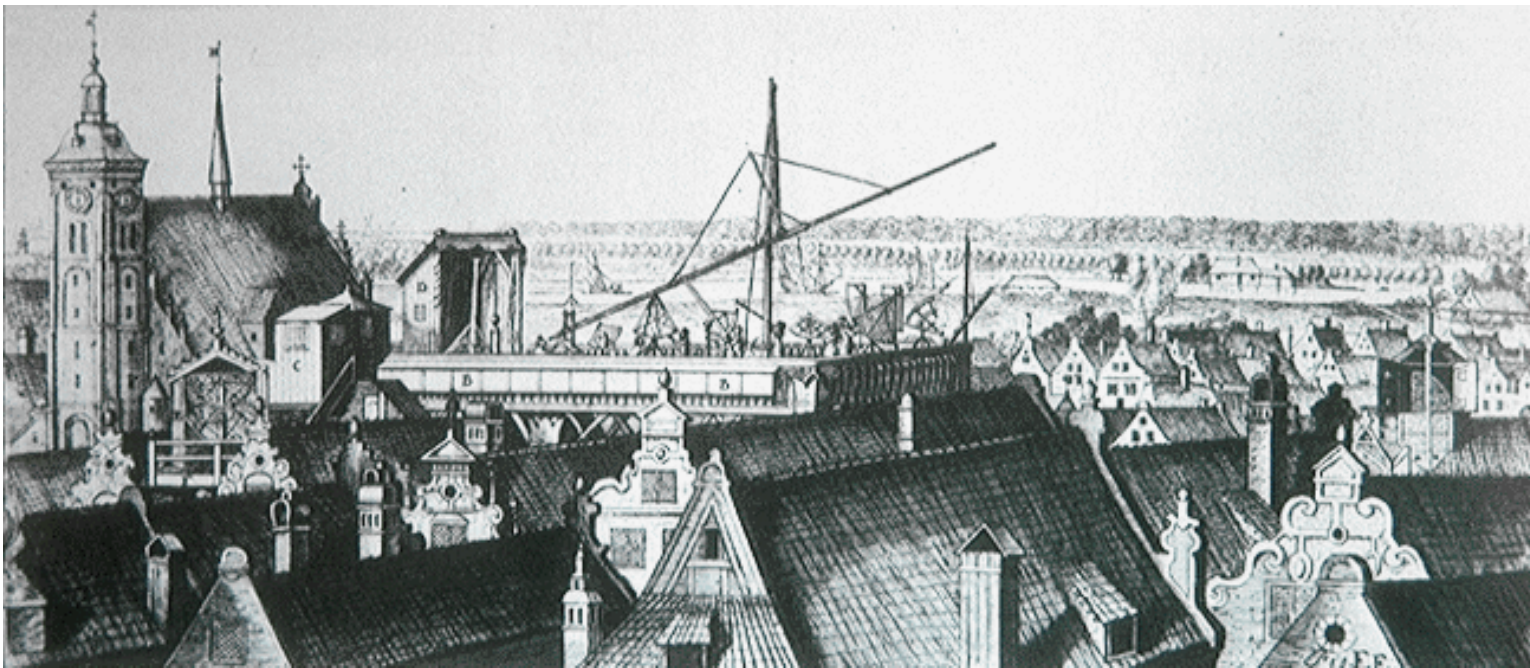
Si consideri poi un generico angolo θ tra l'asse ottico e un raggio di luce; l'espansione in serie di Taylor del $\sin \theta$ nella legge di Snell conterrà termini in $\theta, \theta^3, \theta^5, \dots$;

A seconda della potenza cui si lavora, si ha la teoria al III ordine, al V ordine, e così via. Nei telescopi astronomici il III ordine è di solito adeguato (ma questa semplificazione non è più sufficiente per la strumentazione ausiliaria, ad es. per gli spettrografi).

Siccome $\theta = \theta(h, \alpha)$, si avranno termini in h^3 (**aberrazione sferica**), $h^2 \alpha$ (**coma**), $h \alpha^2$ (**astigmatismo**), α^3 (**distorsione**).

Dipendenza delle aberrazioni dalla apertura numerica $f/$

L'importanza delle aberrazioni cresce con il diminuire di $f/$ (con $f/^{-3}$ per l'aberrazione sferica, $f/^{-2}$ per il coma, $f/^{-1}$ per l'astigmatismo). Per tale motivo nel passato si costruivano telescopi lunghissimi.



Telescopio di Hevelius sui tetti di Danzig, seconda metà del 1600

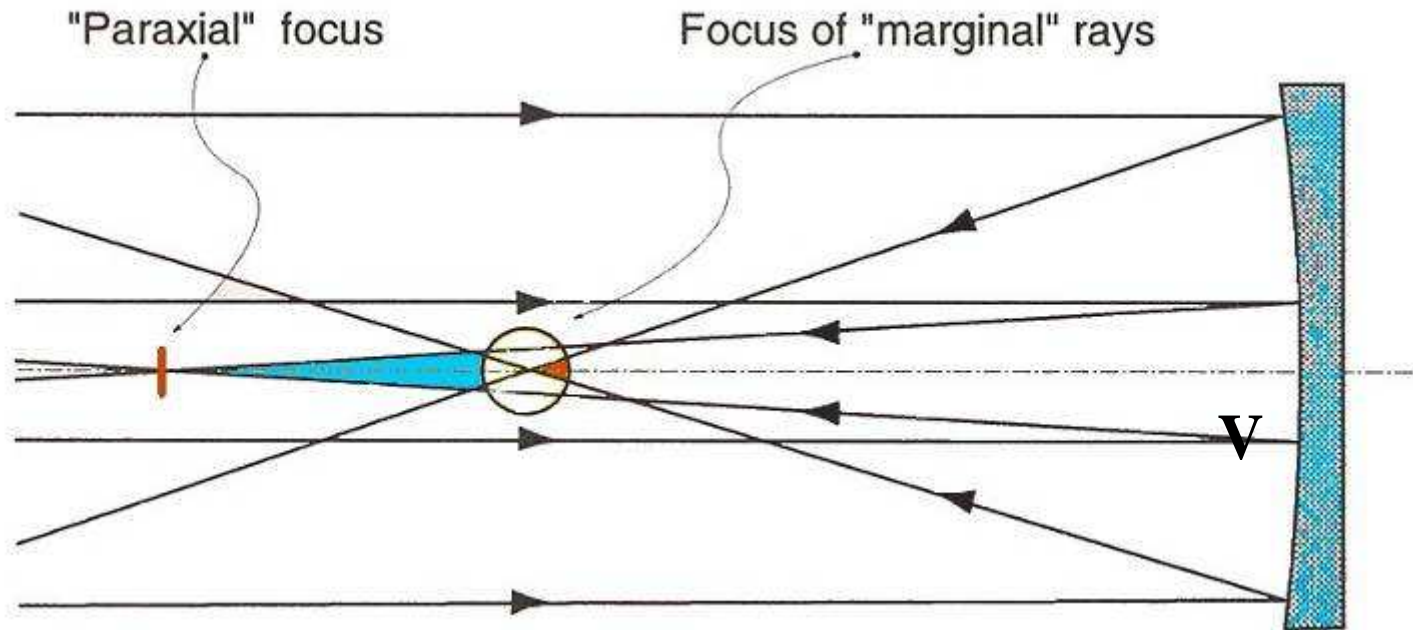
Le somme di Seidel

■ L'ammontare delle aberrazioni è matematicamente espresso dalle **somme di Seidel** $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$, che si possono minimizzare con una conveniente scelta della **forma delle superficie** degli specchi, o con una attenta scelta degli **indici di rifrazione delle lenti** (cioè dei materiali con cui vengono fatte).

■ Ad es., è ben noto che un **paraboloide è privo di aberrazione sferica in asse**, ma appena fuori asse apparirà il coma (la lunghezza angolare del coma tangenziale è $3\alpha/16(f/l)^2$ radianti, ad es. 1" a 13' per un f/12). L'astigmatismo produce un cerchio di minima confusione il cui diametro angolare vale $\alpha^2/2(f/l)$ radianti (ad es. 1" a 37' per un f/12).

Dunque la forma paraboloidale fu (e rimane) la soluzione naturale per lo specchio primario di molti telescopi.

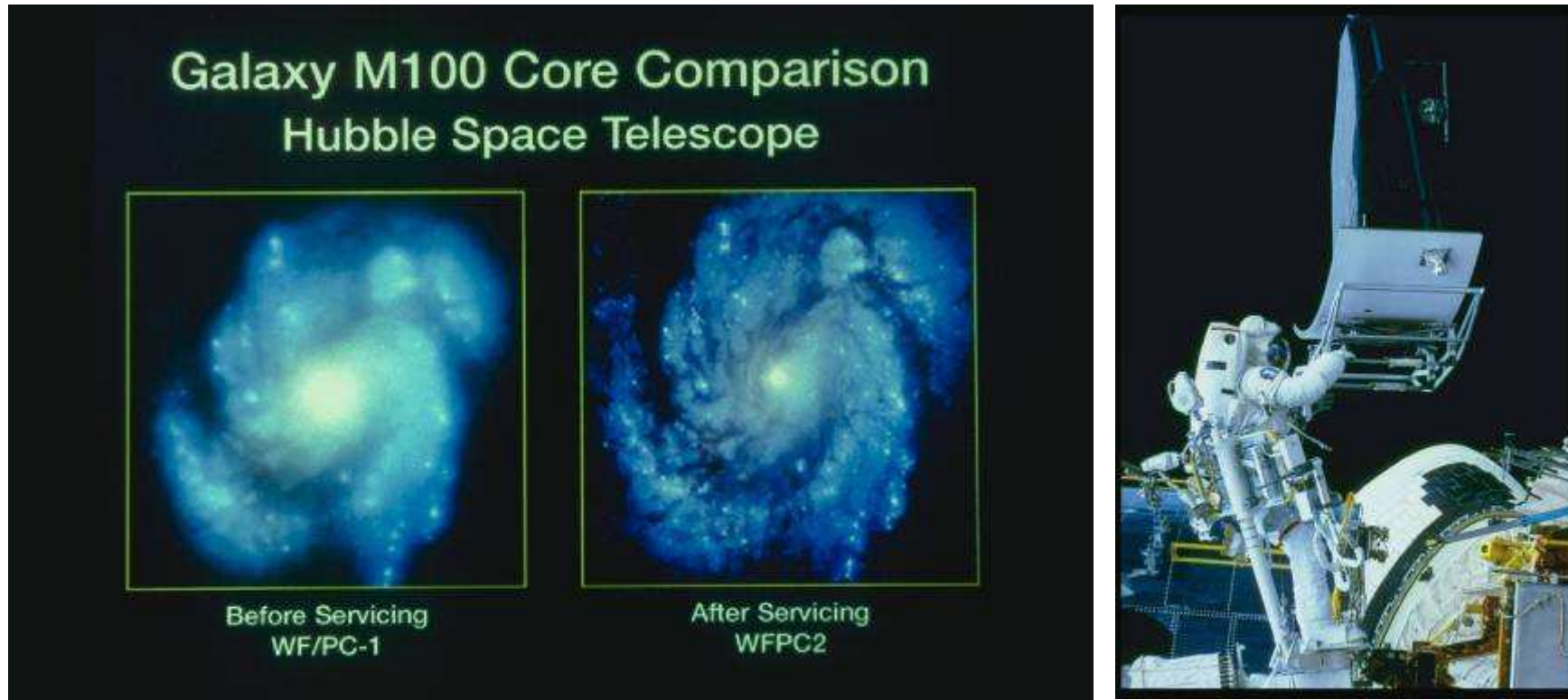
Aberrazione sferica



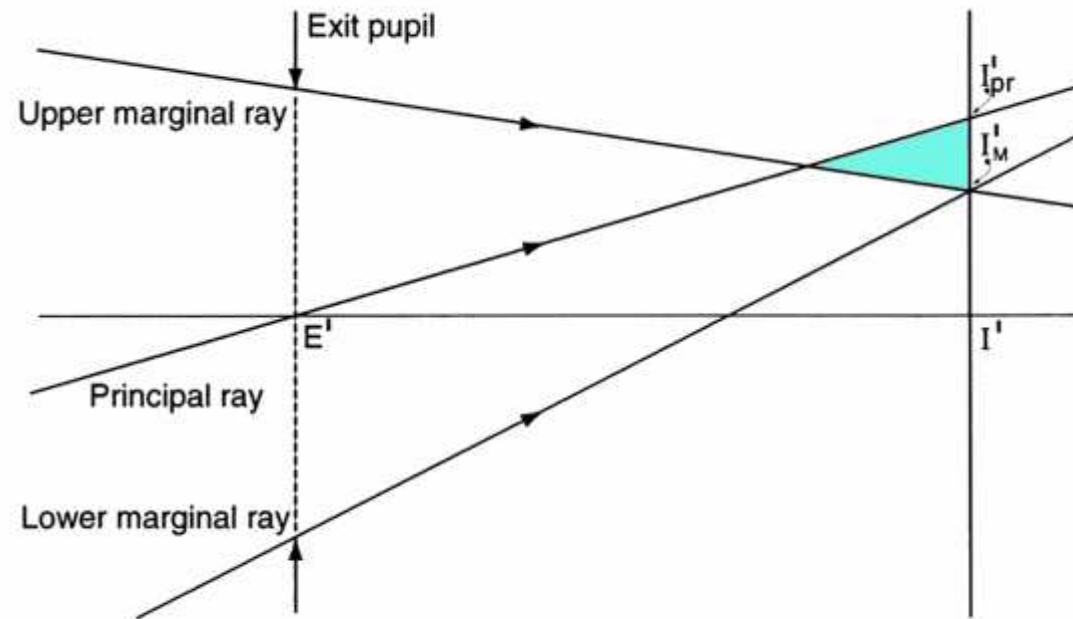
Se lo specchio è sferico, i raggi parassiali convergono in un fuoco più distante dal vertice **V** di quelli marginali.

L'aberrazione sferica è presente anche in specchi non proprio sferici, come quelli di forma Ritchey- Chretien (vedi dopo). Molti grandi telescopi (es. NTT) ne sono affetti, perchè è aberrazione difficile da scoprire in fase di lavorazione. Si può però correggere con *l'ottica attiva*.

HST - L'aberrazione sferica del primario

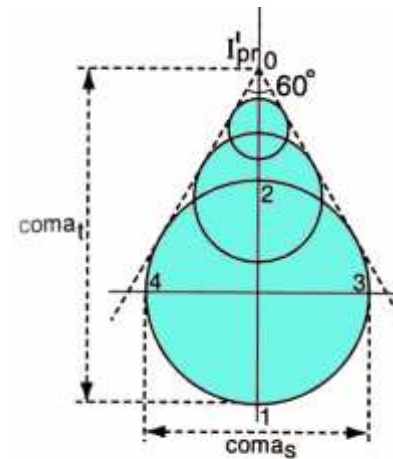


L'HST lavora solo in configurazione RC, a due specchi (si veda dopo). Tuttavia lo specchio primario era affetto da severa aberrazione sferica. Quando lo si scoprì, venne piazzato un correttore (COSTAR) dopo il fuoco RC, grazie alla accessibilità dell'orbita bassa. Gli strumenti di seconda e terza generazione hanno la correzione al loro interno.

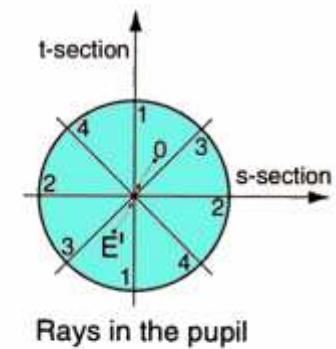


Third order coma: lateral aberration form

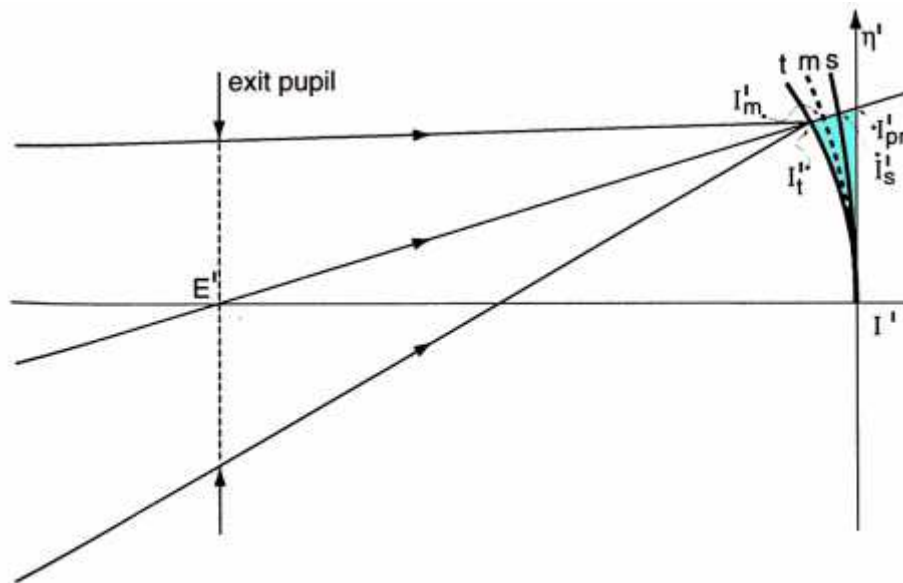
Coma del III ordine



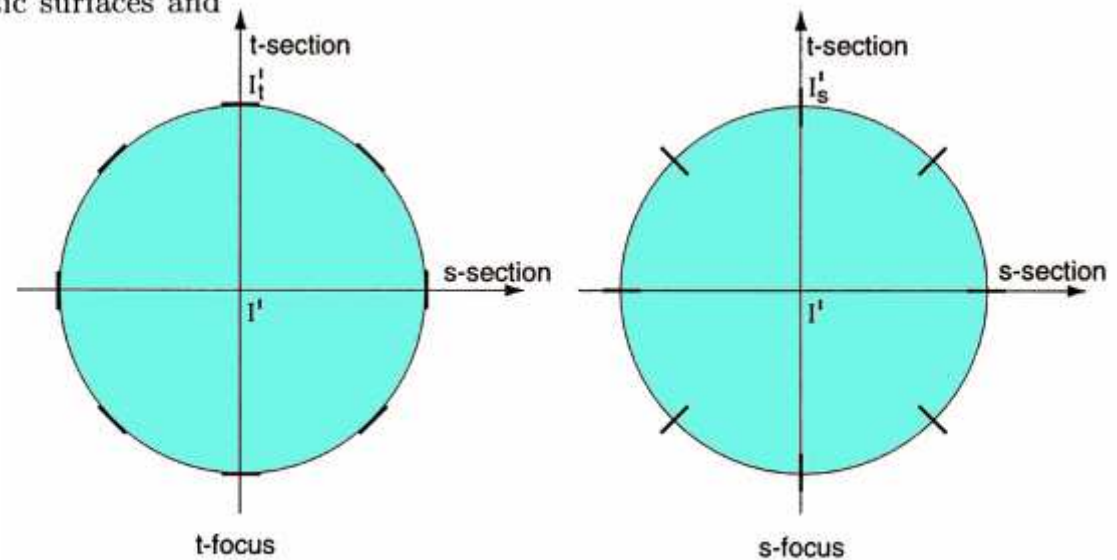
Third order coma: the "coma patch"



Astigmatismo del III ordine

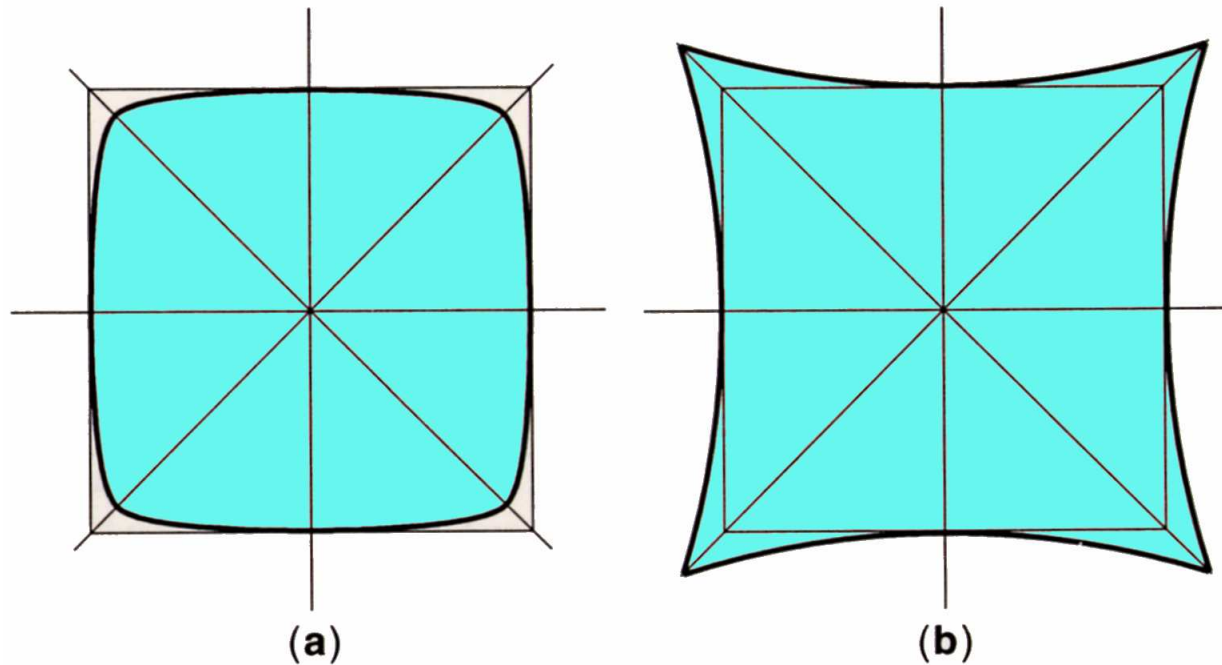


Third order astigmatism: astigmatic surfaces and lines



Tangential and radial astigmatic lines at the t -focus and s -focus respectively

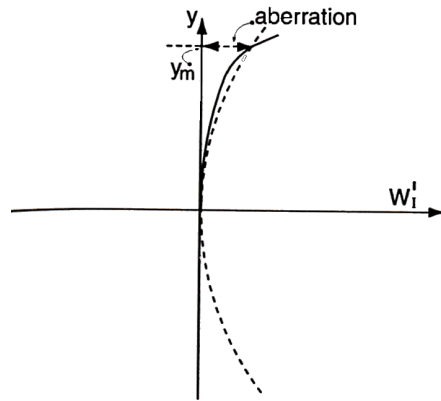
Distorsione



Distortion: (a) barrel, (b) pincushion

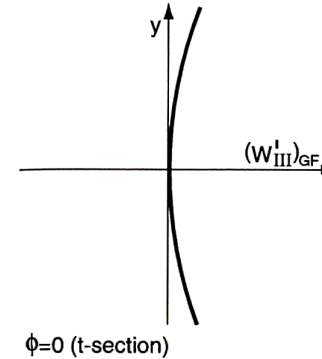
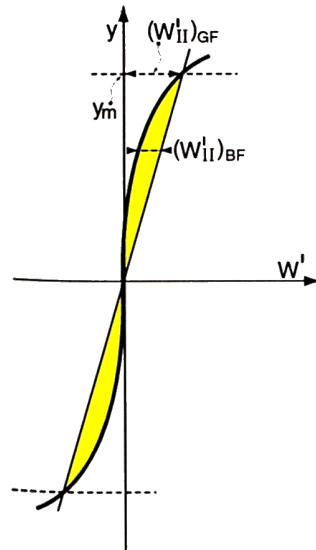
La distorsione introduce una mutua dipendenza tra le coordinate lineari. Su telescopi a 1 o 2 specchi di solito si può trascurare, ma non così in sistemi più complicati (ad es. gli spettrografi).

Aberrazioni come distorsioni del fronte d'onda

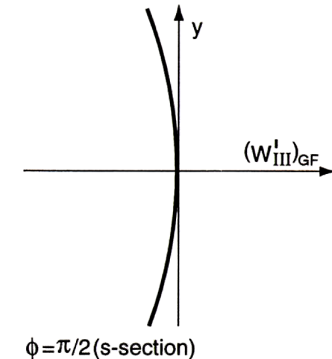


$$(W'_I)_{GF} = \frac{1}{8} \left(\frac{y}{y_m} \right)^4 S_I$$

$$(\overline{W}'_{II})_{BF} = 2(W'_{II})_{BF} = \frac{1}{3} S_{II}$$



$\phi=0$ (t-section)



$\phi=\pi/2$ (s-section)

Third order astigmatism: wavefront aberration reversal in the t- and s-sections due to the $\cos 2\phi$ term

$$(\overline{W}'_{III})_{GF} = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_m} \right)^2 S_{III}$$

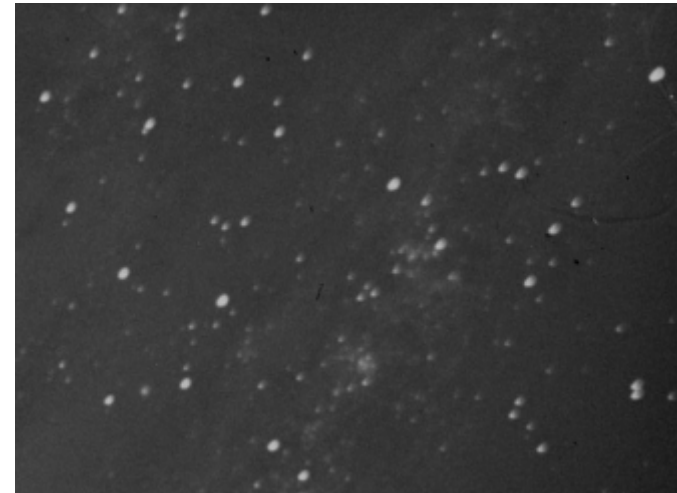
Un modo equivalente per descrivere le aberrazioni è in termini di deviazioni del fronte d'onda reale da quello ideale sferico.

Fuori fuoco e fuori centro

- Benchè non facciano parte delle aberrazioni geometriche propriamente dette, tuttavia all'atto pratico è molto importante eliminare gli errori di fuocamento e di centraggio.
- All'inizio della notte, e periodicamente durante le successive osservazioni l'astronomo deve ricontrollare (come minimo) il fuocamento.
- Se poi il telescopio è dotato di ottica attiva, vanno controllati anche gli errori di centraggio, e più in generale la qualità dell'immagine (forma del fronte d'onda).

Il coma del 122-cm di Asiago

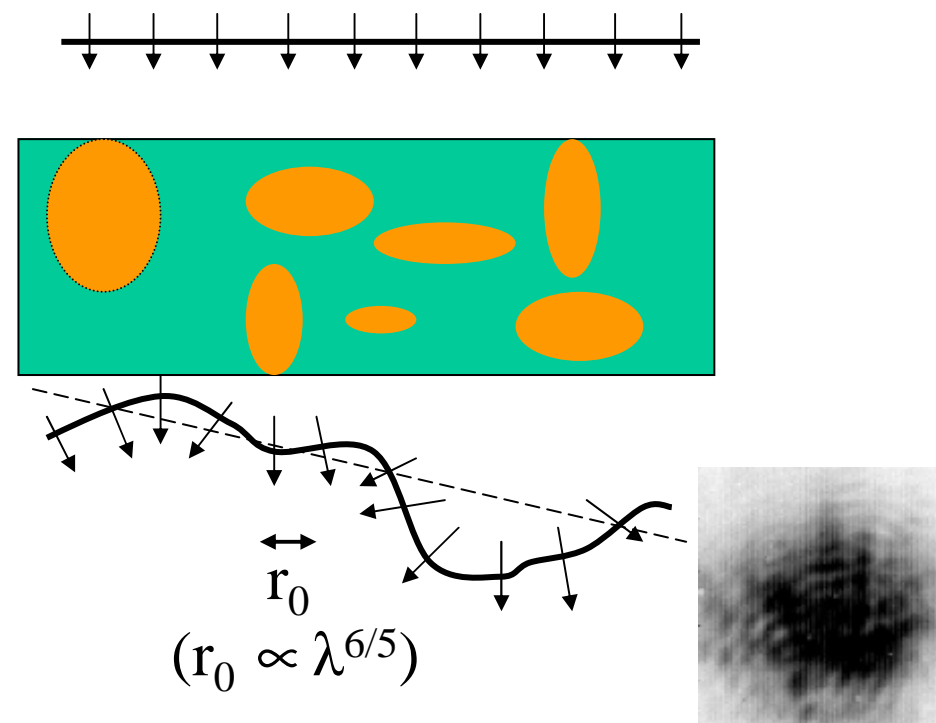
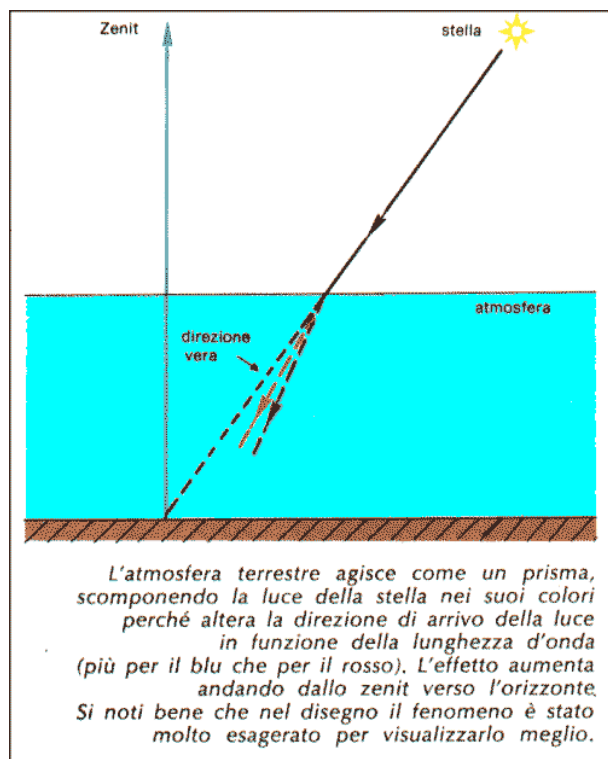
Come si è detto, la prima aberrazione al primo fuoco di un parabolico è il coma.



Esercizio: Sopra, un dettaglio della galassia M 31 ritagliato dall'immagine di sinistra (al newtoniano del 122cm di Asiago, f/5, che mostra chiaramente l'aberrazione di coma) è stato arbitrariamente ingrandito, ruotato e 'specchiato' rispetto all'originale. Determinare le operazioni effettuate e situare il dettaglio al suo posto.

I limiti posti dall'atmosfera terrestre:

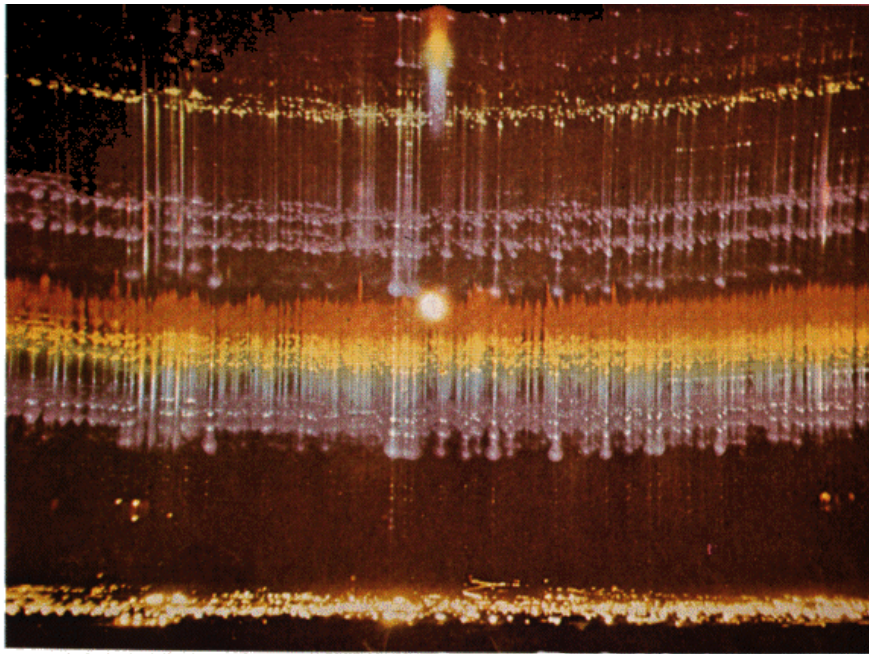
1 - il seeing



A sinistra la rifrazione 'statica'. A destra, la propagazione in un mezzo (aria) con bolle di diverso indice di rifrazione trasforma l'onda piana in una fortemente distorta. Il parametro r_0 si dice di 'Fried', e nel visibile per un buon sito vale 10 cm. La forma della stella è confusa e varia rapidamente.

Un secondo limite: 2

- le dannosissime luci artificiali

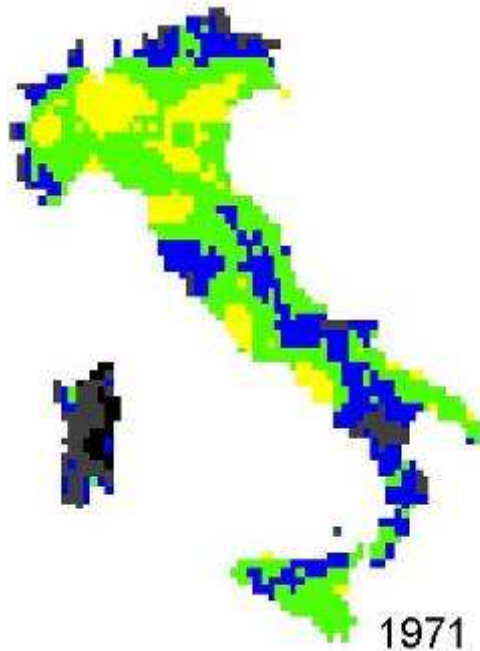


Questa foto, ottenuta con una tecnica speciale, dimostra la nocività delle luci cittadine per l'astronomia. Le luci delle lampade stradali, diffuse dall'atmosfera, sono molto più intense della Luna piena, che si vede al centro della foto.

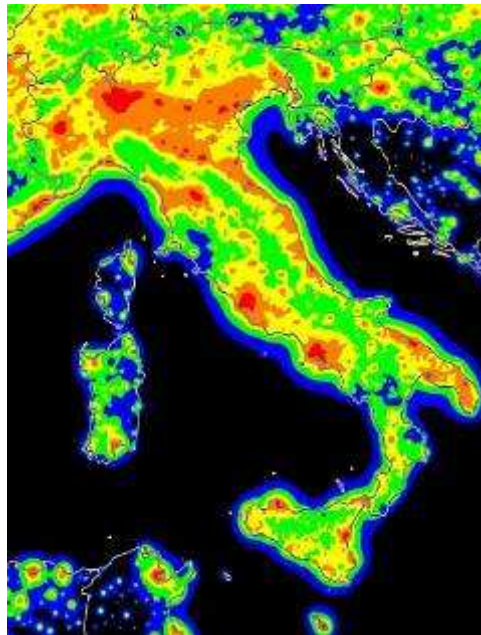


La situazione delle luci artificiali in Italia

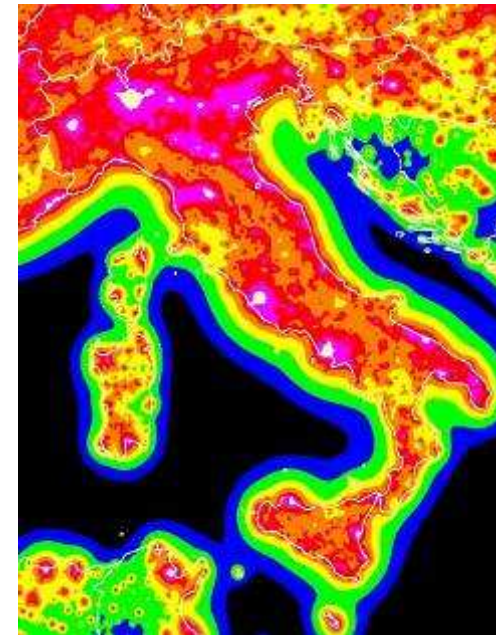
1971



1998



2025

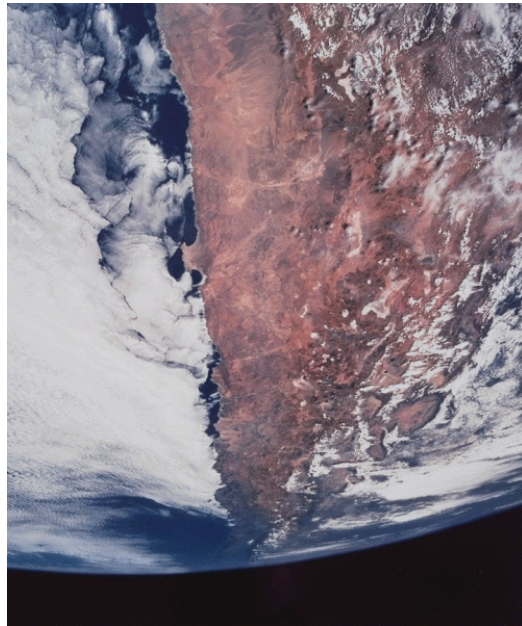


La situazione è disastrosa, si deve fare qualcosa! Non soffrono solo gli astronomi, ma tutta la gente, la flora e la fauna.

Rimedi ai problemi atmosferici?

1. Cercare i siti migliori e più bui a terra
2. Usare l'ottica adattiva
3. Andare nello spazio

I migliori siti terrestri: le Ande Cilene



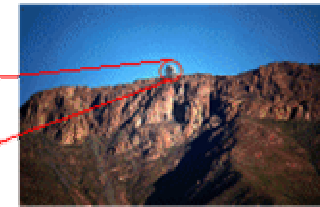
South America



Chile



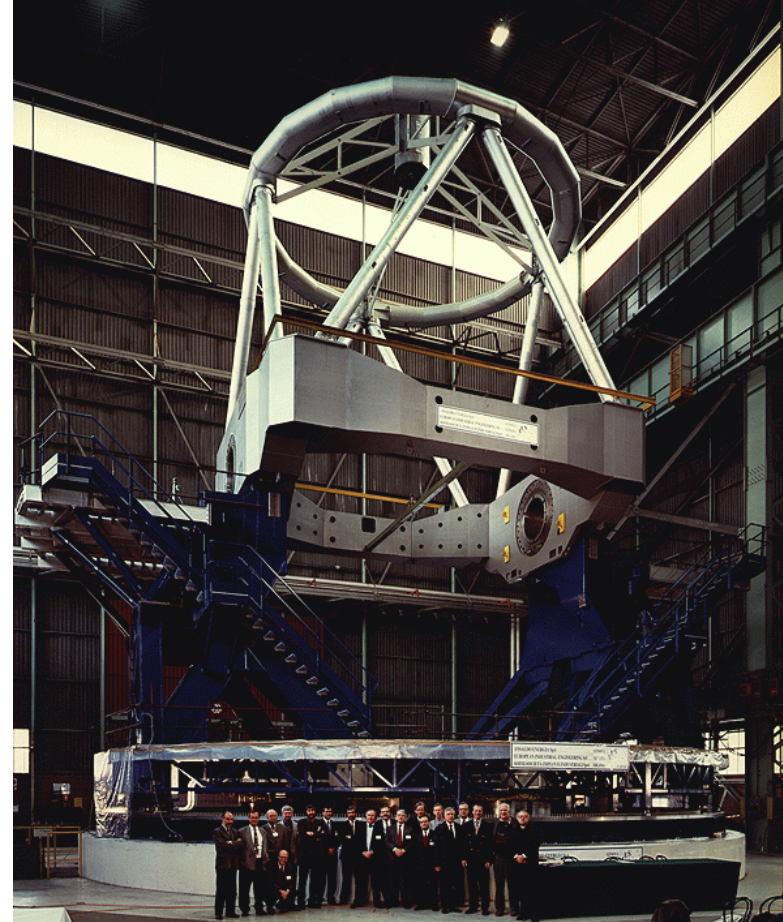
Region de Coquimbo



Summit of Cerro Pachon -
The Gemini South
Observatory

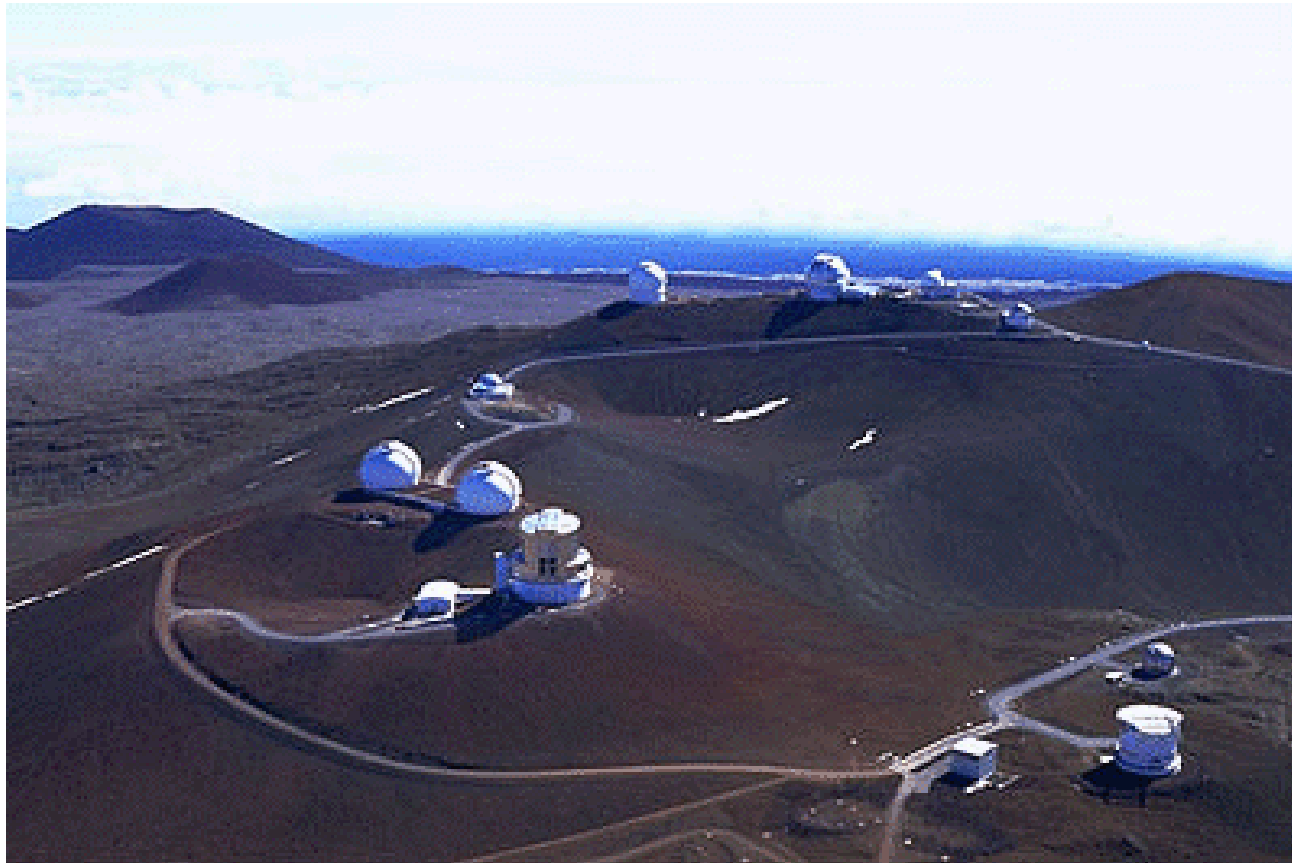
Nella parte più a Nord, il Paranal, con il VLT (ESO); poi sotto La Silla (ESO), Cerro Tololo e Cerro Pachon (USA+altre nazioni)

I 4 VLT ESO da 8.2m



L'ottica dei 4 VLT è RC, con primario $f/1.7$, Cassegrain (e Nasmyth) $f/$ e Coudé $f/$.

I migliori siti terrestri: Mauna Kea



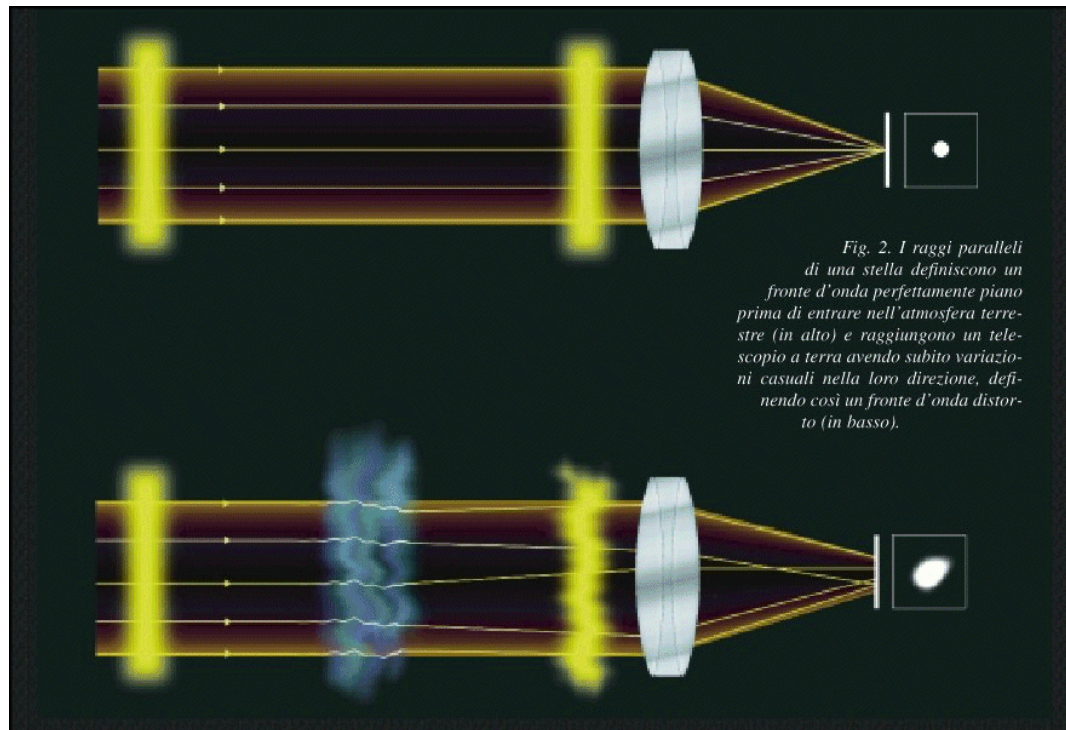
A 4200 m di quota ospita alcune tra le maggiori installazioni, tra cui i due Keck, Gemini Nord, Subaru, CFHT, UK, UKIRT, ...

I migliori siti terrestri: le Isole Canarie



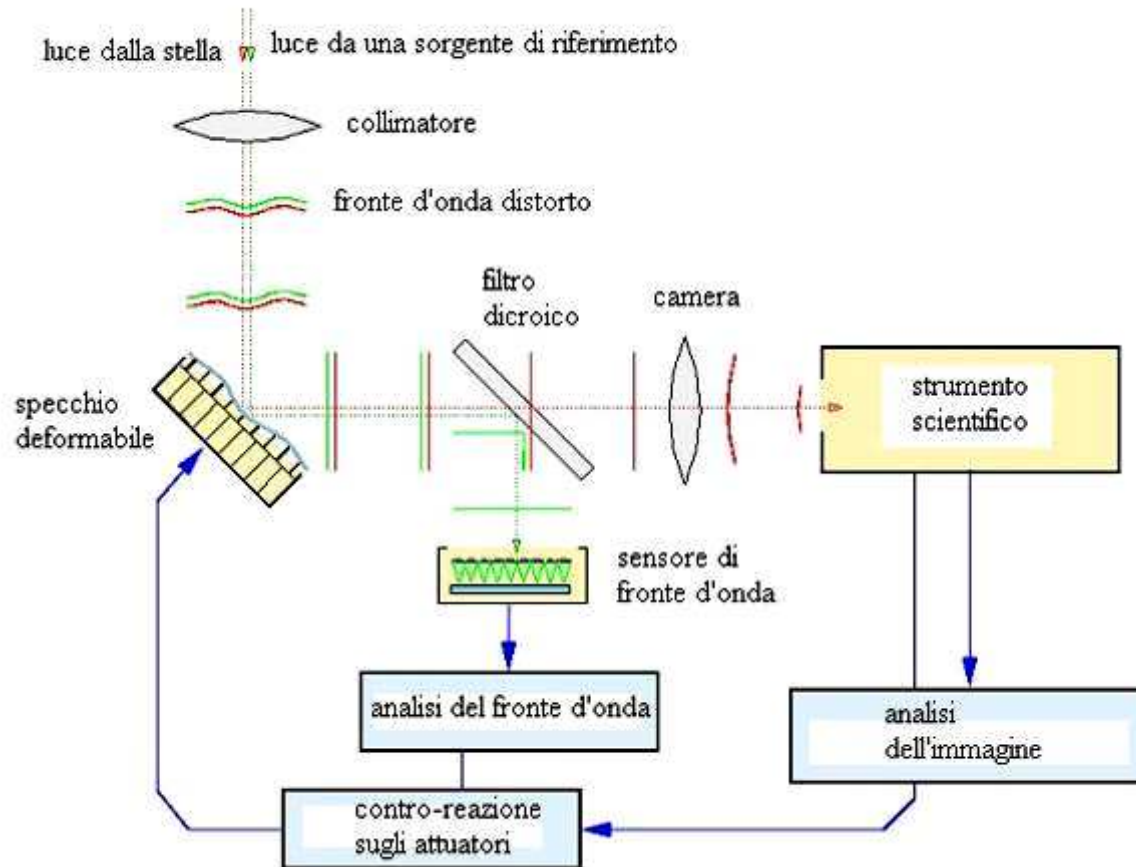
A La Palma (Roque de los Muchachos) installazioni prevalentemente notturne, tra cui il 4.2 WHT inglese, il 3.5 m TNG italiano, il 2.5m NOT, e il futuro GranTeCan di 10m. A Tenerife, installazioni prevalentemente solari (tra cui il Themis cui partecipa l'Italia).

Un altro rimedio agli effetti del *seeing*: l'ottica adattiva



Si può introdurre un dispositivo ottico che corregga le distorsioni del fronte d'onda, che avvengono con scale di tempi dal millisecondo fino a qualche secondo. E' necessario però un opportuno riferimento di fase (stella naturale o artificiale).

Ottica Adattiva - 1



Il centro della Via Lattea con l'AdOpt del Keck

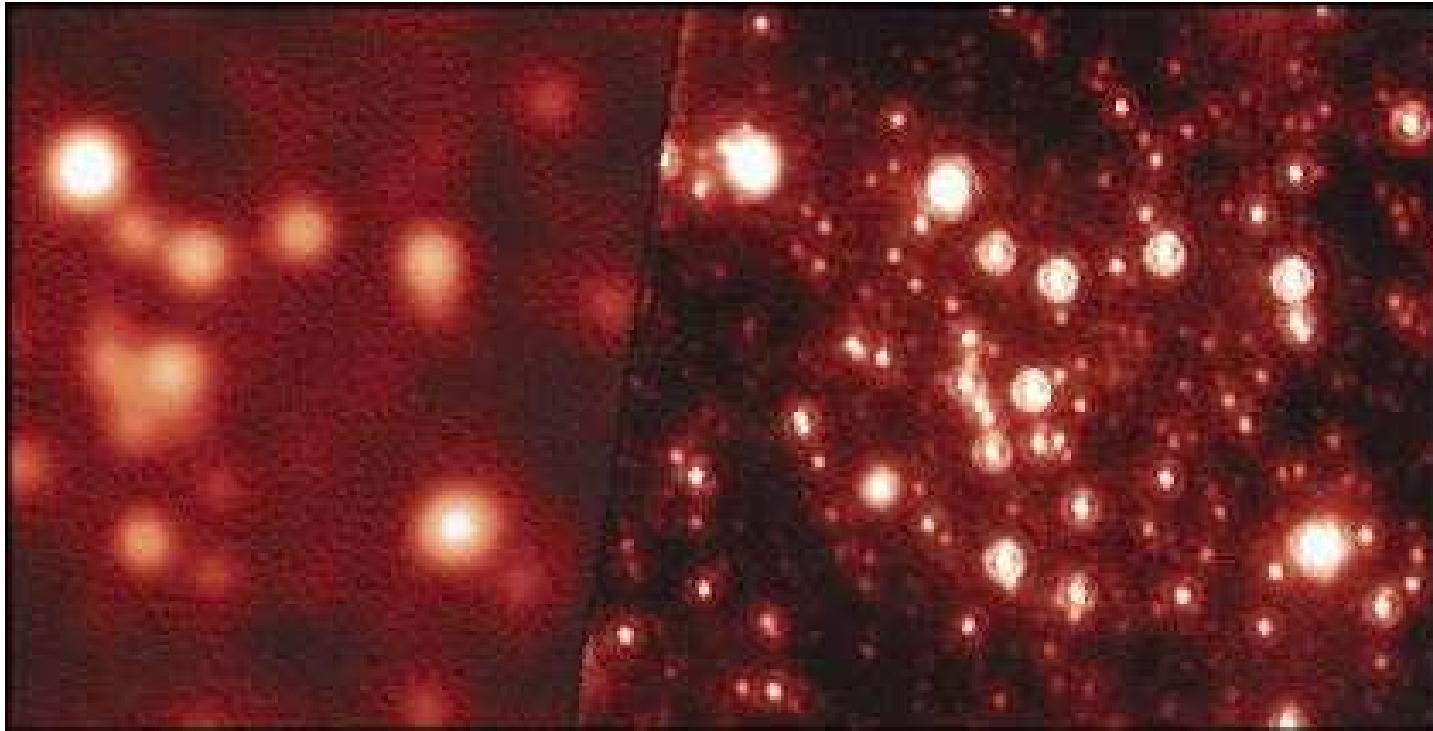


Immagine normale

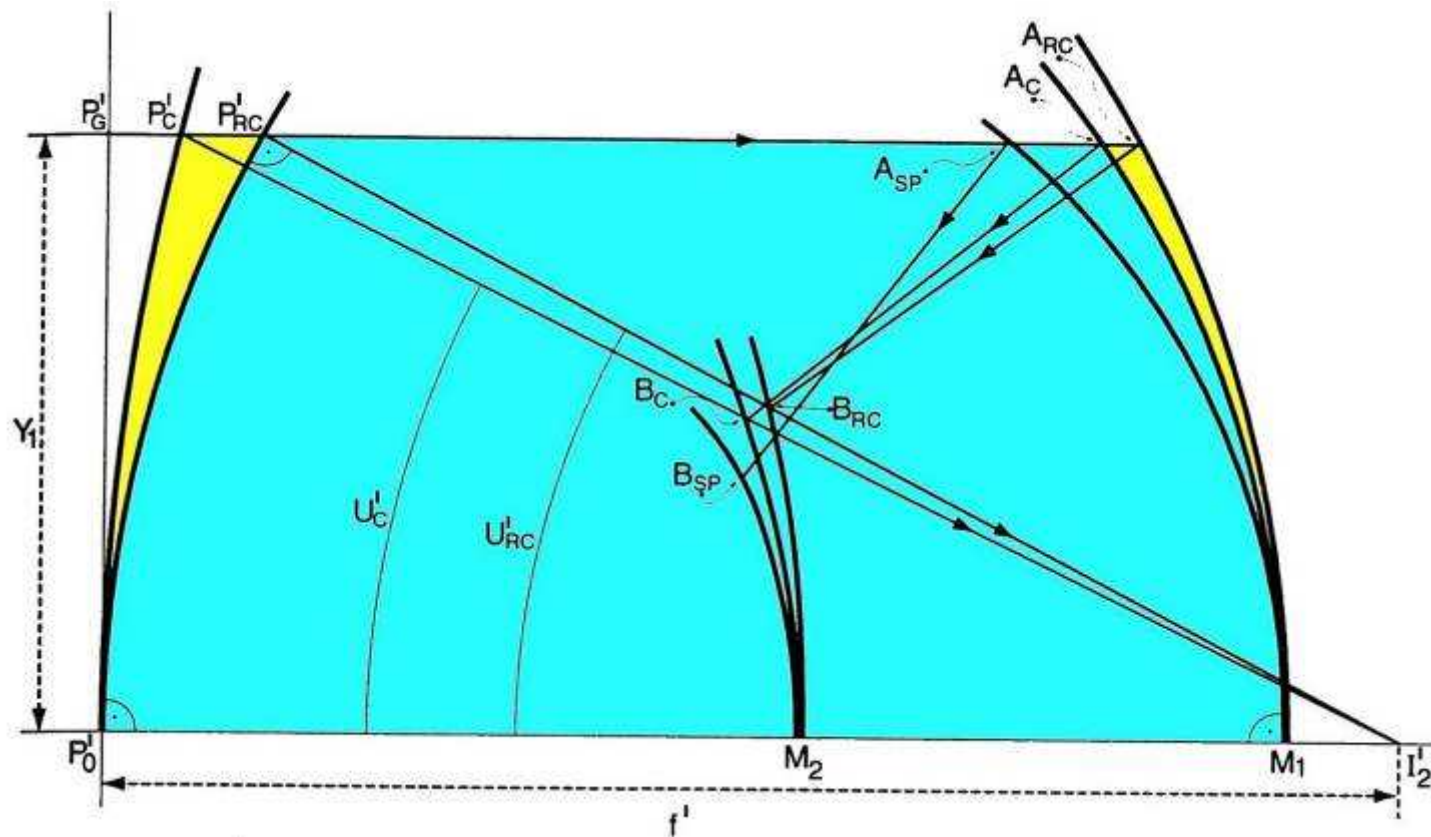
**Immagine corretta dal seeing
con l'Ottica Adattiva**

Oltre la soluzione Cassegrain: la configurazione **Ritchey-Chrétien**

Per minimizzare le aberrazioni della configurazione Cassegrain, molti telescopi hanno adottato una soluzione ottica già suggerita da Ritchey e Chrétien nel 1920:

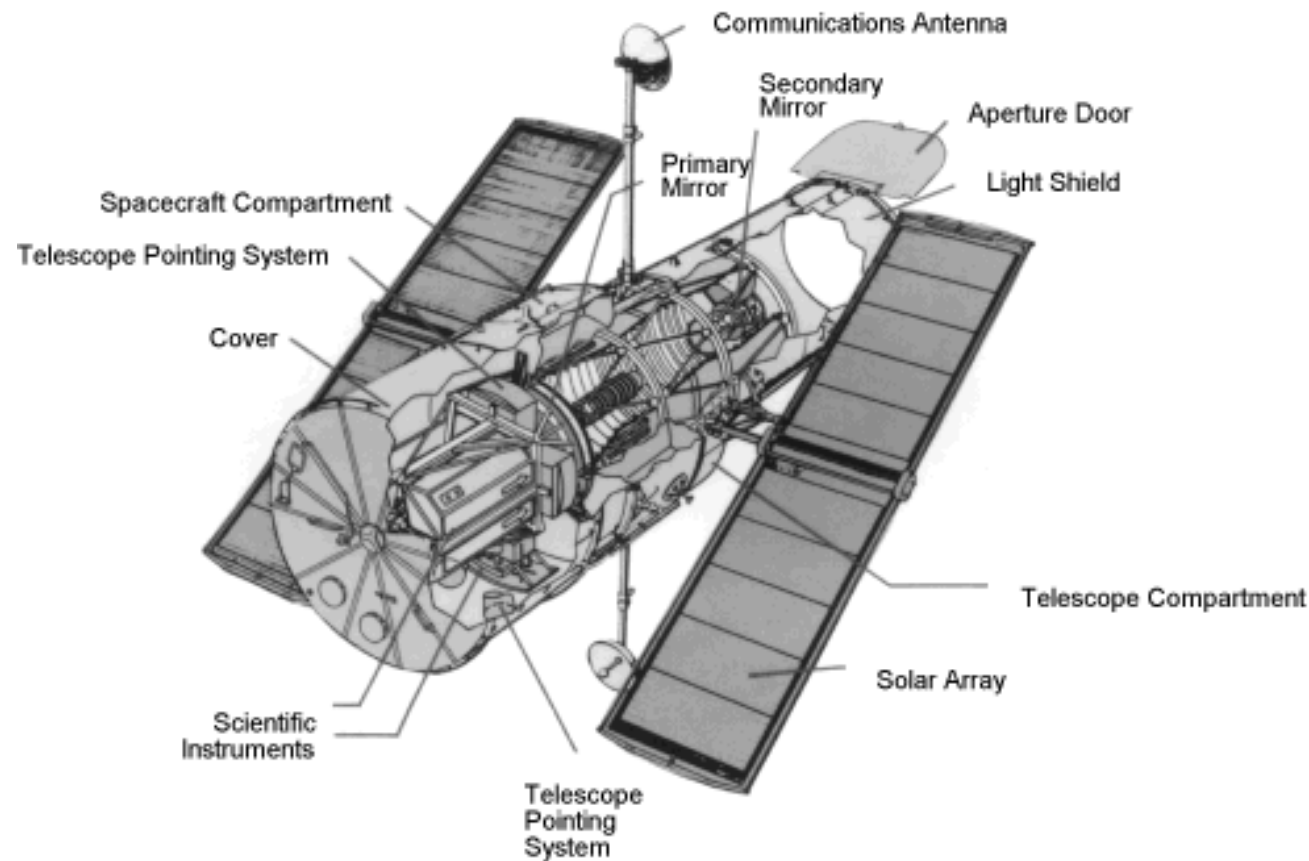
- le eccentricità e_1 , e_2 dei due specchi sono parametri liberi
- la forma paraboloidale del primario viene modificata aprendo la superficie verso un iperboloide
- la combinazione di due superficie iperboliche produce un fuoco **Ritchey -Chrétien** privo di aberrazione sferica, coma e astigmatismo su un buon campo di vista, anche se la superficie focale diviene concava verso la luce incidente (si può mettere un a lente spianatrice di campo, facendo però attenzione al cromatismo)
- si penalizza ovviamente anche il primo fuoco, che richiederà un opportuno correttore di aberrazione sferica.

La soluzione Ritchey-Chrétien



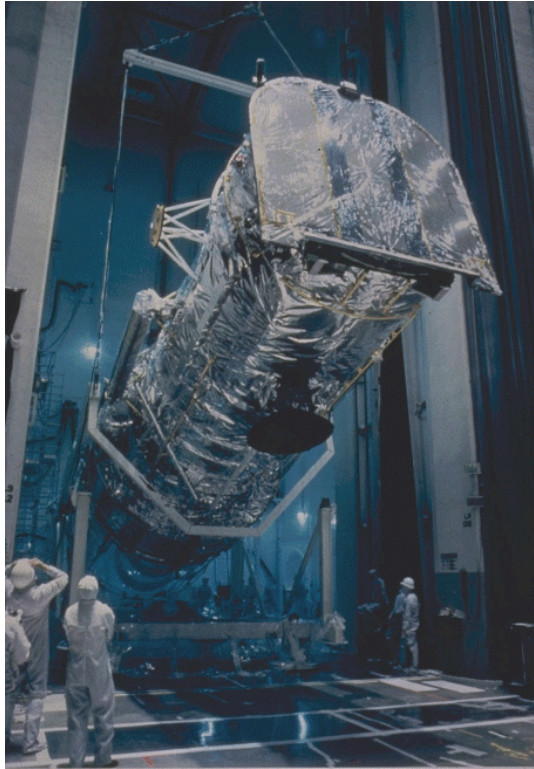
La figura mostra il confronto tra Ritchey Chrétien e Cassegrain. Il vantaggio di un grande campo di vista corretto si raggiunge a spese di una più difficile lavorazione asferica del primario, della grande **aberrazione sferica** del primo fuoco e di un più difficile allineamento meccanico.

L'Hubble Space Telescope (HST)



Lo specchio
primario ha
diametro 2.4m,
la soluzione
ottica è un R-C
f/13. Il grande
vantaggio di
HST **non è
dunque il
diametro, ma il
fatto di essere
fuori
atmosfera.**

l'Hubble Space Telescope - 2



- HST ha il vantaggio di volare in orbita bassa e di poter essere riportato periodicamente dagli astronauti dello Shuttle alle prestazioni migliori.
- Tuttavia i costi di costruzione e operazione sono **almeno 100 volte** quelli di un simile telescopio terrestre!

Alcune splendide immagini di HST



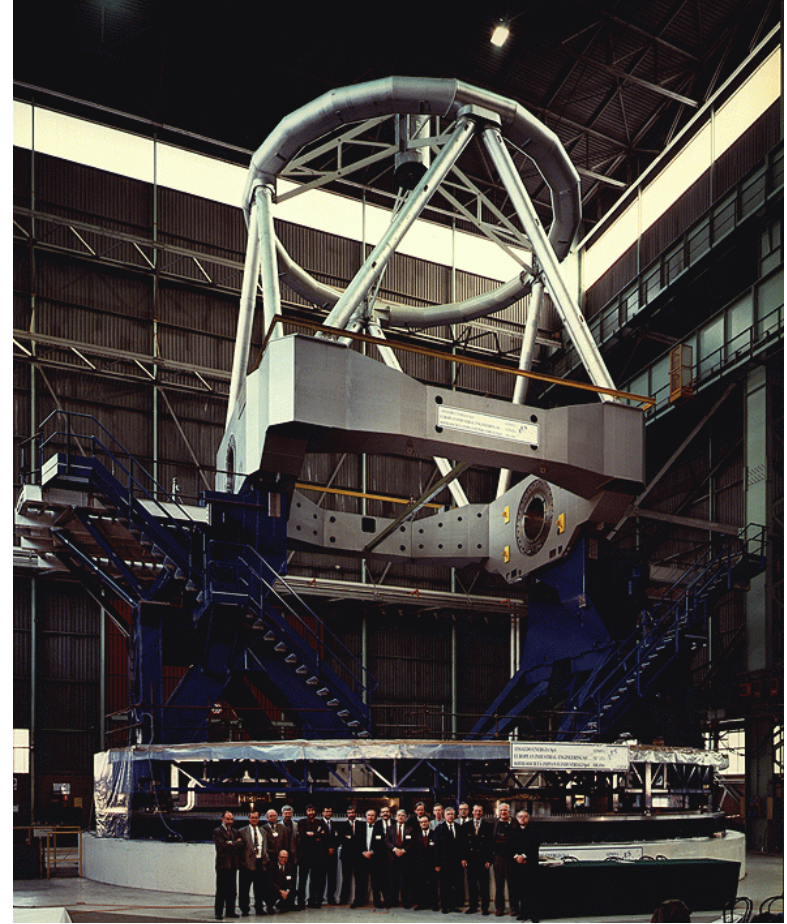
La nebulosa in Aquila



Il profondissimo campo di galassie

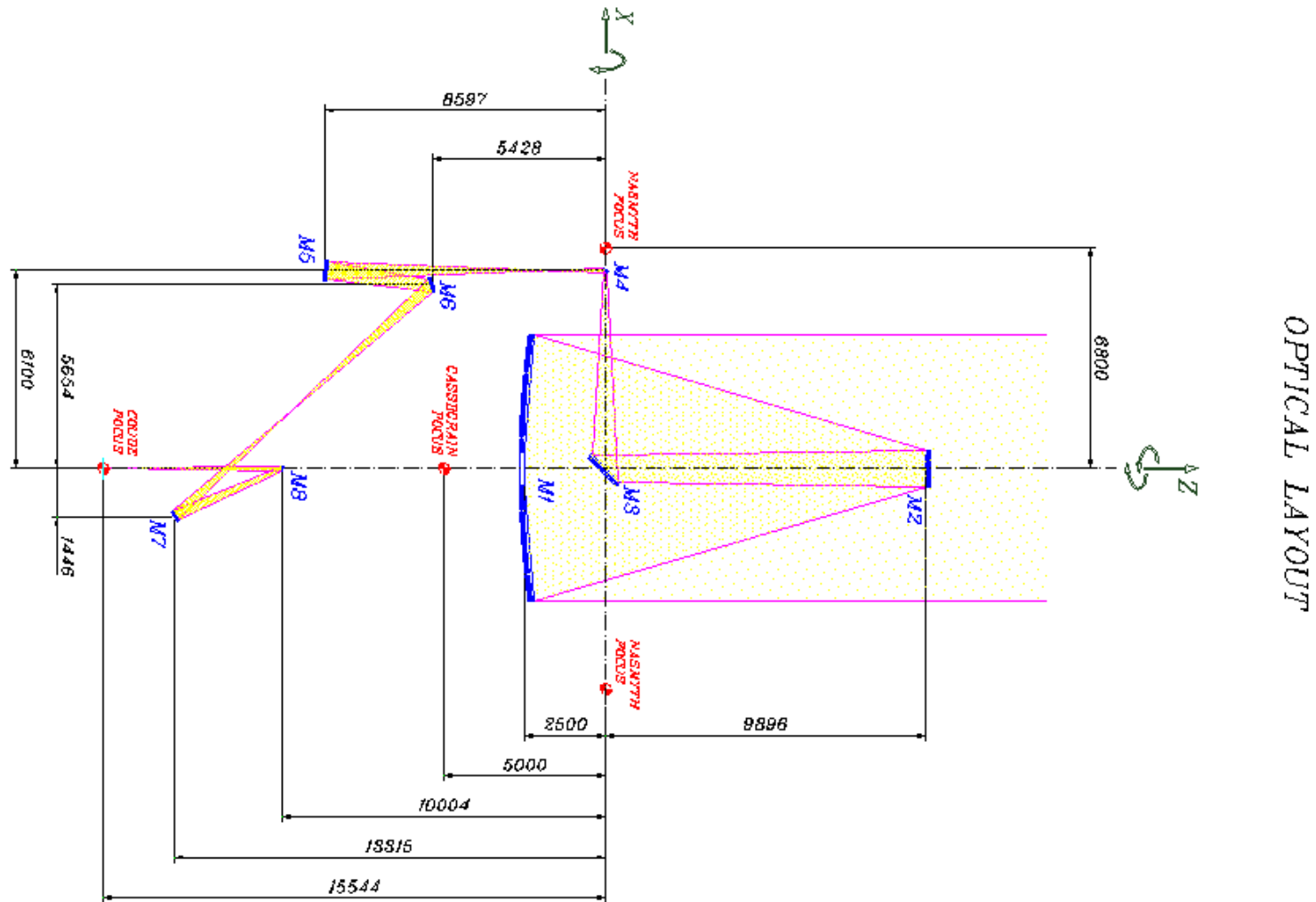
HST è il **paradigma di qualità** per ogni telescopio terrestre.
Possiamo porre il valore di confronto a ***0.1 secondi d'arco nel visibile.***

I 4 VLT ESO da 8.2m

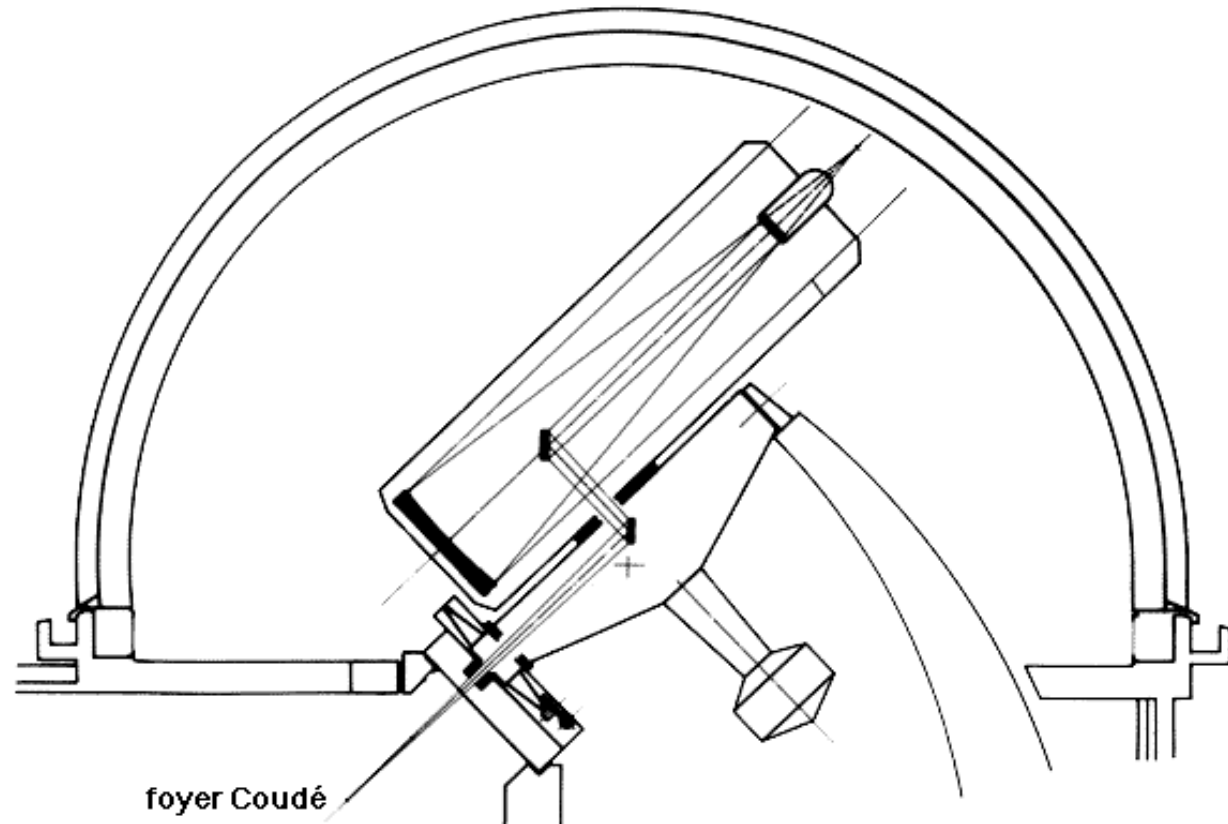


L'ottica dei 4 VLT è RC, con primario $f/1.7$, Cassegrain (e Nasmyth) $f/$ e Coudé $f/$.

Lo schema ottico dei VLT



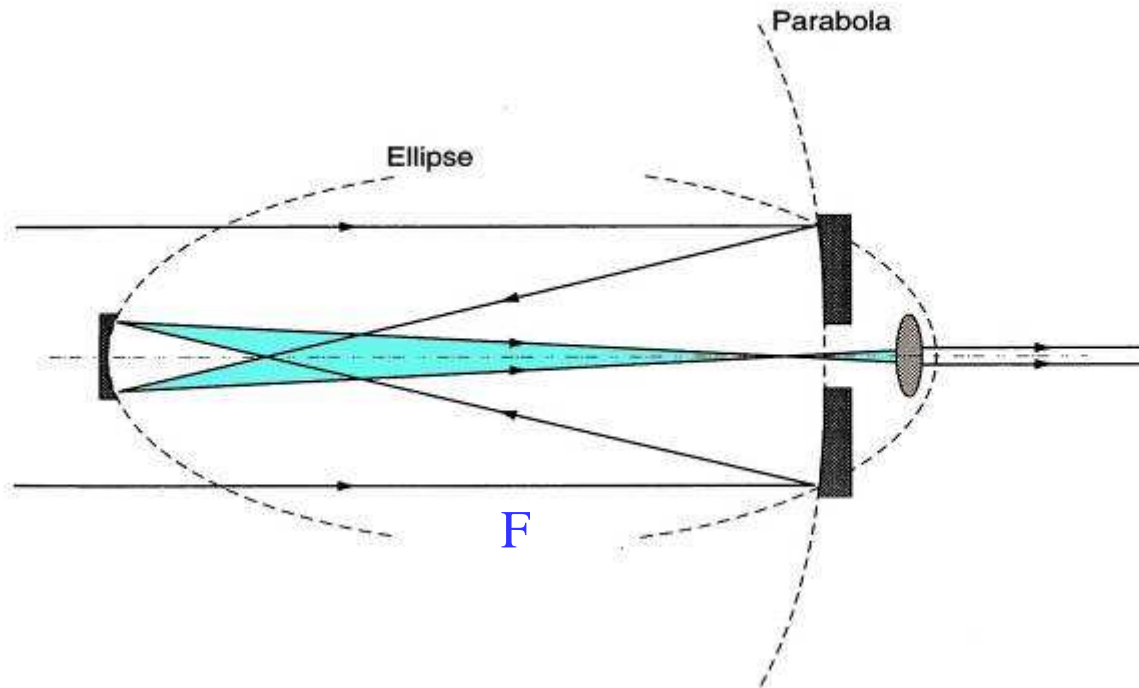
Il fuoco Coudé



Talvolta il secondario ha focale estremamente lunga (ad es. da $f/30$ a $f/100$), cosicché la luce viene portata da varie riflessioni a una sala distante. La figura mostra il 1.5m a Haute Provence. Questa è la variante *Coudé*.

Non nascono aberrazioni aggiuntive ma il fascio è fortemente polarizzato.

Il telescopio Gregory (1663)



Un'altra possibilità di una configurazione a due specchi fu trovata da Gregory. Il secondario ha sezione di *ellisse convessa* e viene messo **dopo** il fuoco F. L'immagine è dritta.

Il Large Binocular Telescope usa questa configurazione, e lo stesso fanno molti radiotelescopi.

Per quanto riguarda LBT, la configurazione fu scelta per ottimizzare l'ottica adattiva: infatti il punto coniugato al finito si trova a circa 100m sopra al telescopio, cioè dove c'è una forte componente del seeing atmosferico (vedi dopo).

Il Large Binocular Telescope



LBT ha fuochi primari $f/1.4$, Gregoriano $f/15$ e combinato $f/15$ interferenziale (vedi dopo).

La cupola di LBT



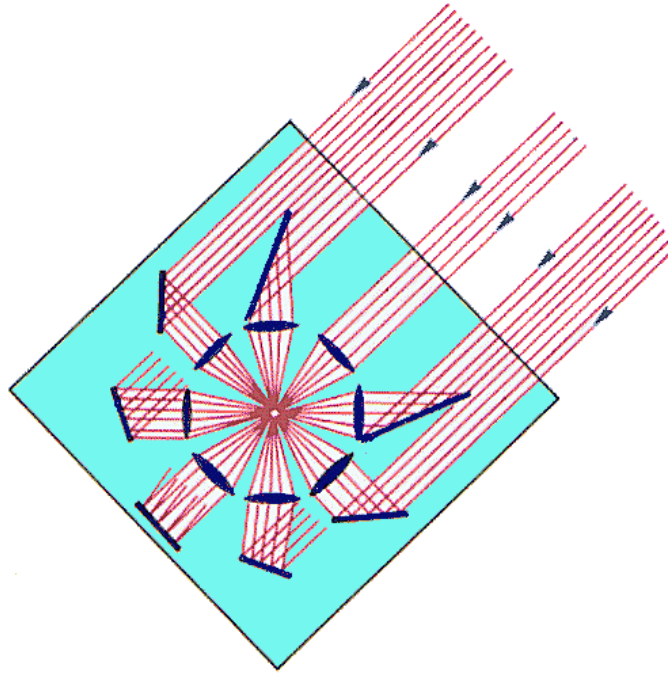
A Mt. Graham (Arizona, 3200 m slm)

Il trasporto degli specchi del VLT

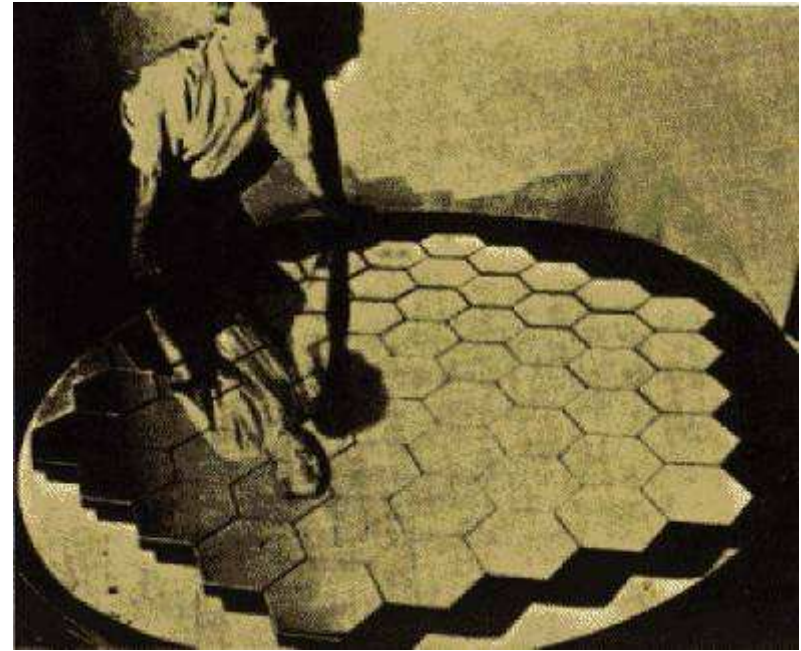


- Gli specchi di 8.2 m dell'ESO VLT sono i più sottili mai prodotti, appena 18 cm!
- trasportarli senza romperli è molto difficile!
- Si capisce anche che in pratica è impossibile costruire e trasportare specchi più grandi di circa 8 m.
- ***Come si può progredire verso aperture ancora maggiori?***

Grandi specchi come sintesi



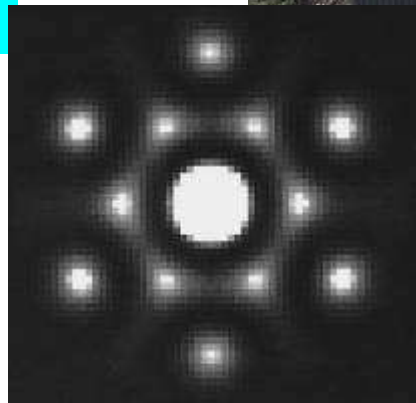
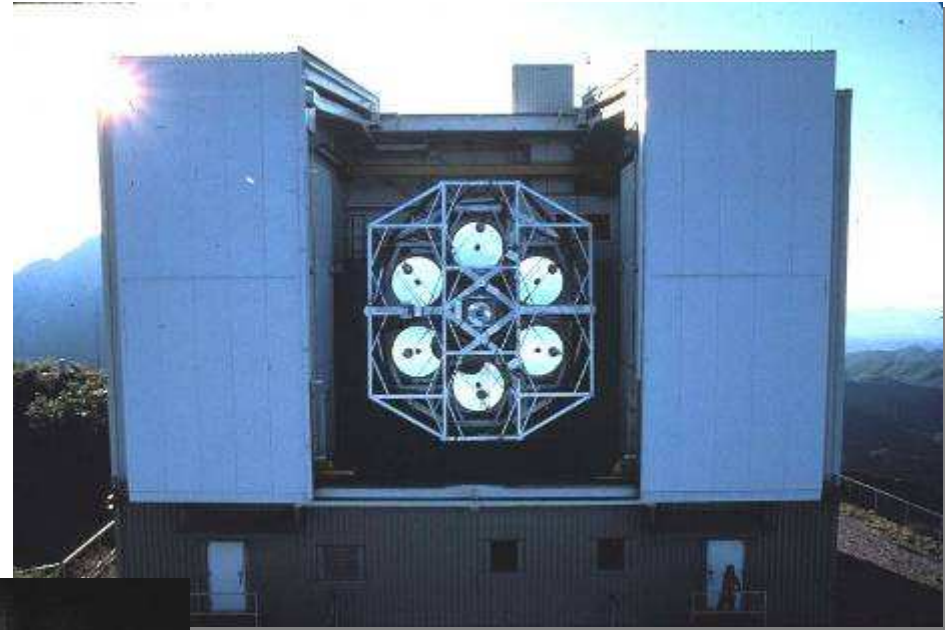
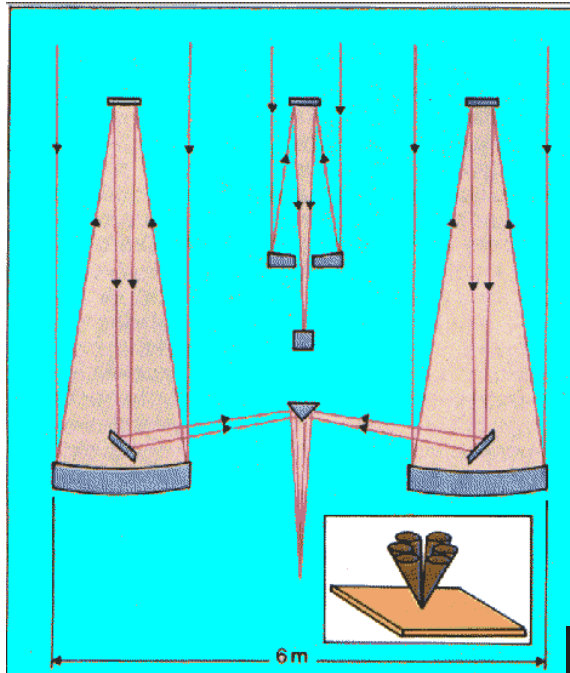
Lomonosoff, 1741



Guido Horn D'Arturo, 1950

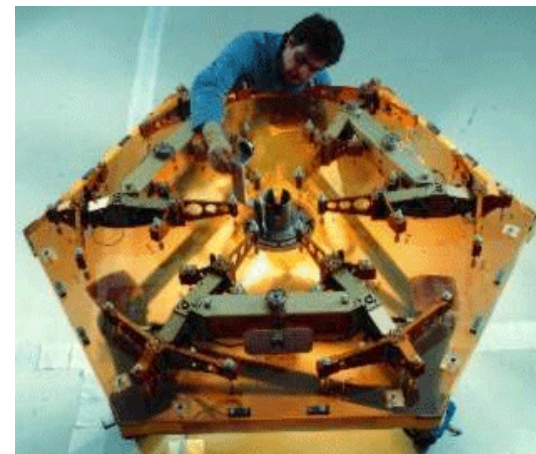
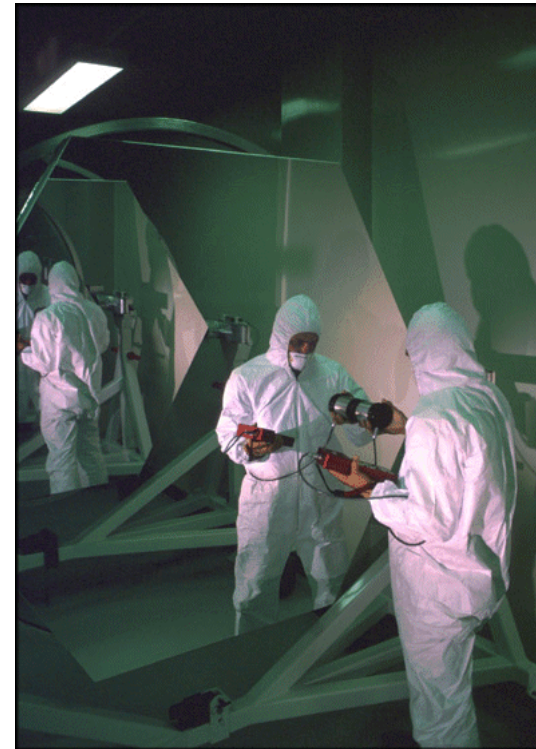
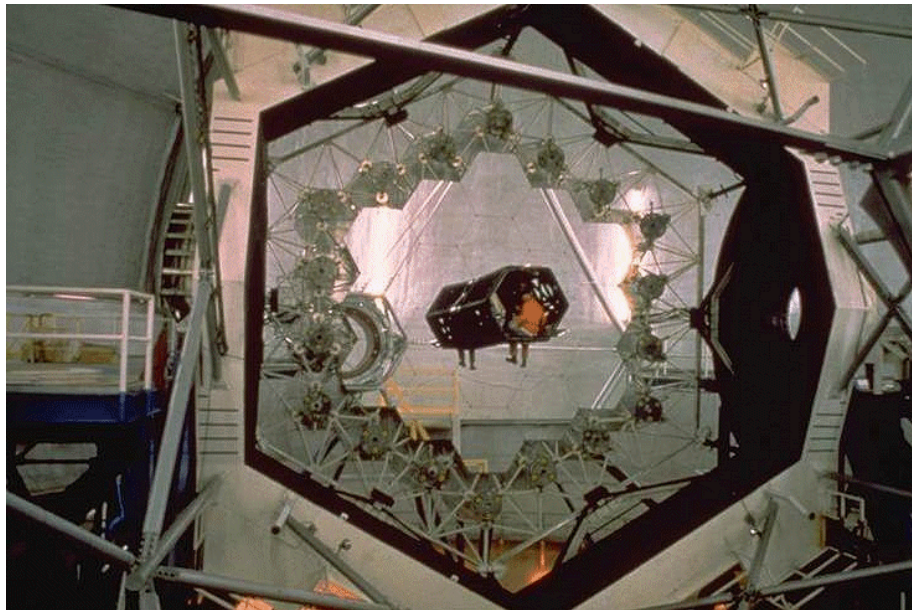
Un grande specchio può essere sintetizzato usandone molti piccoli, purché la fase dell'onda sia tenuta controllata su tutta l'apertura.

L'importanza storica del Multiple Mirror Telescope (Arizona)

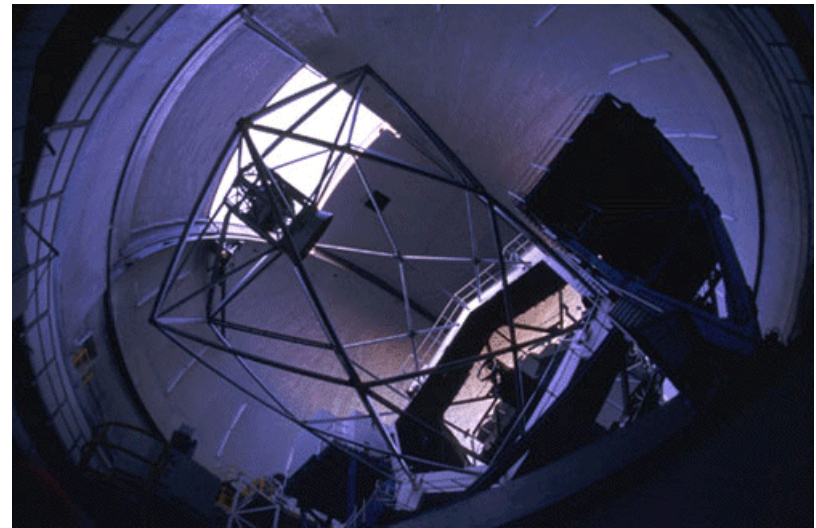


La configurazione originale del MMT: sei specchi di 1.8m. Si noti la complicata figura di diffrazione.

I due telescopi Keck delle Università di California. 36 segmenti, ciascuno di 180 cm.



I due telescopi Keck a Mauna Kea

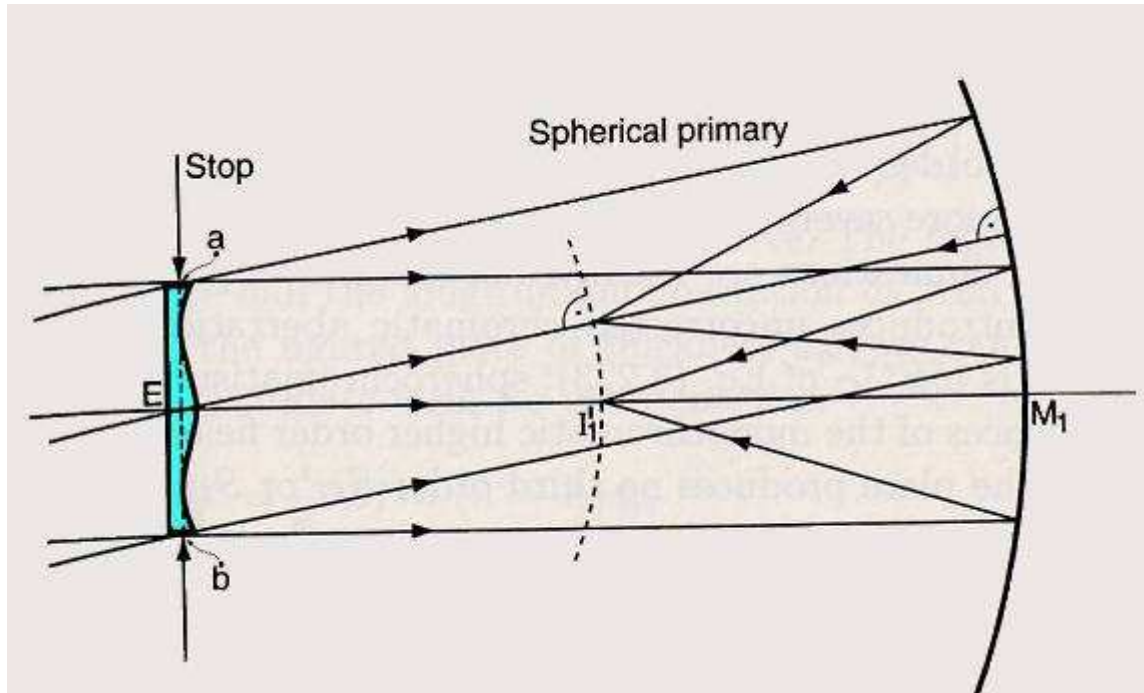


PAUSA

Alcune immagini con i Keck



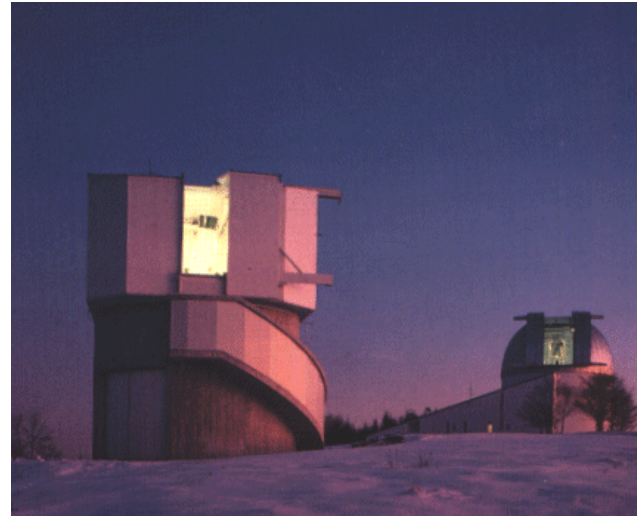
Il grande campo: il telescopio Schmidt



Un modo di minimizzare le aberrazioni su un grande campo fu trovato da B. Schmidt (1932) inserendo una lastra correttiva al centro di curvatura di uno **specchio sferico**. La lastra rifratrice ha una particolare forma (superficie del 4 grado), e la combinazione può minimizzare le 3 aberrazioni su una superficie curva *convessa verso il primario* (il suo raggio di curvatura essendo metà di quello dello specchio primario). Il campo di vista corretto raggiunge ≈ 0.1 radianti, l'apertura numerica $f/$ è di solito 2.5 o 3, il cromatismo è accettabile. Tuttavia il tubo del telescopio è abbastanza lungo, e lo specchio è nettamente più grande della apertura utile (lo stop di ingresso).



Lo Schmidt S67/92cm di Asiago - Cima Ekar

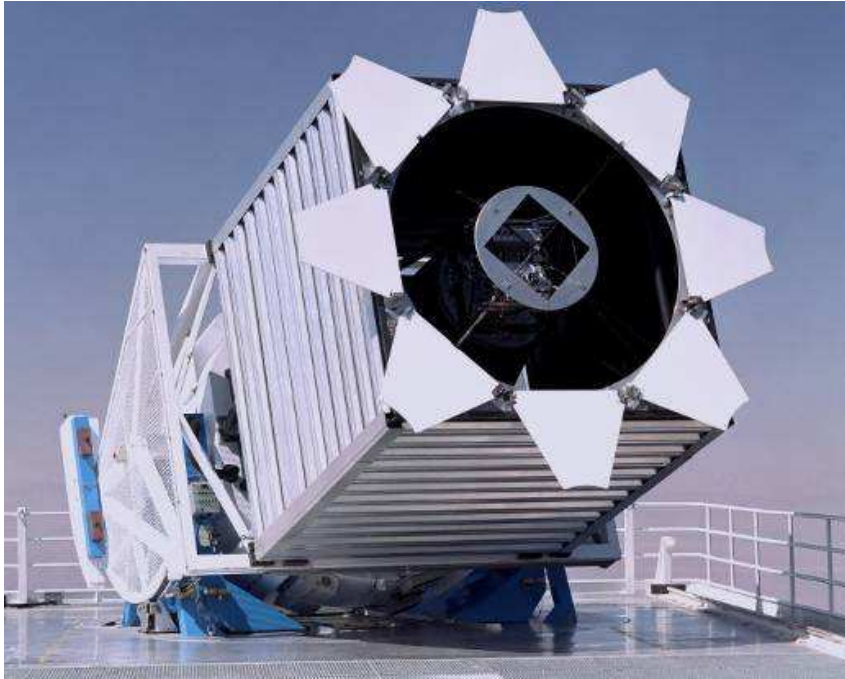


È il secondo Schmidt costruito a Asiago (1966), dopo quello più piccolo del 1956 (40/50 cm).

Telescopi Schmidt di dimensioni maggiori (fino a 120 cm di primario) sono al Palomar, a Tautenberg, a La Silla, in Australia, etc.

La difficoltà odierna con tutti gli Schmidt è la mancanza di rivelatori di grande area sensibile, una volta abbandonata l'emulsione fotografica. Si montano perciò grandi camere con mosaici di CCD ma su un campo più piccolo di quello originale.

Lo SLOAN Telescope

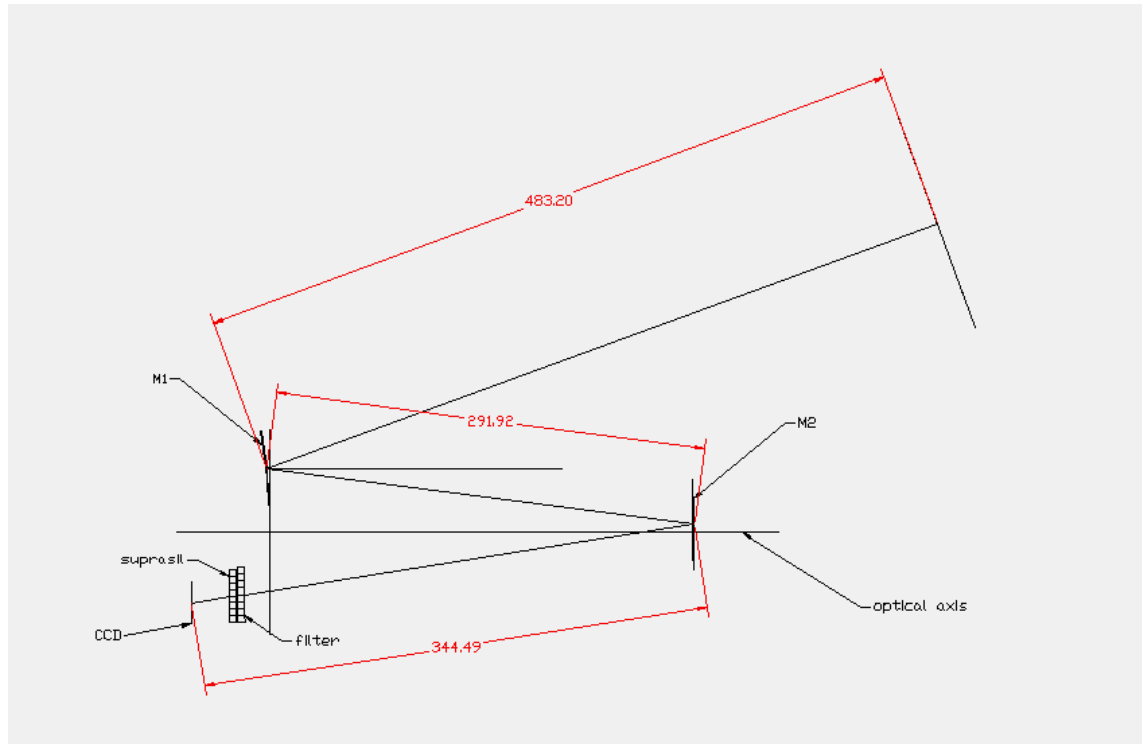


La peculiare forma del telescopio di 2.5m della SLOAN Digital Sky Survey (SDSS) a Apache Point (New Mexico). Il campo di vista è di 3x3 gradi quadrati. Il telescopio si muove solo in elevazione, e opera nel cosiddetto 'modi a scansione'.

La camera CCD di SDSS è tra le più complesse sinora costruite. Ci sono 6 colonne ciascuna con 5 filtri di colore. Ciascuna notte di osservazione produce una impressionante quantità di dati (15 Terabytes).



La WAC/ROSETTA



La Wide Angle Camera fa parte del sistema di imaging detto OSIRIS a bordo di Rosetta. Ha apertura $f/5$, e un larghissimo campo di vista di 12×12 gradi quadrati, realizzata con due soli specchi convessi fortemente asferici e fuori asse. Il secondario coincide con lo stop di apertura del telescopio (che invece di solito è sul primario).

I primi fuochi come grande campo

Vari primi fuochi sono stati equipaggiati con correttori di campo per avere un discreto campo corretto (da 0.5 a 1 grado) per immagini, oppure un gran numero di fibre ottiche per scopi spettroscopici su molti oggetti contemporaneamente.

Allo stesso modo sono stati trasformati i fuochi di vari telescopi Schmidt.

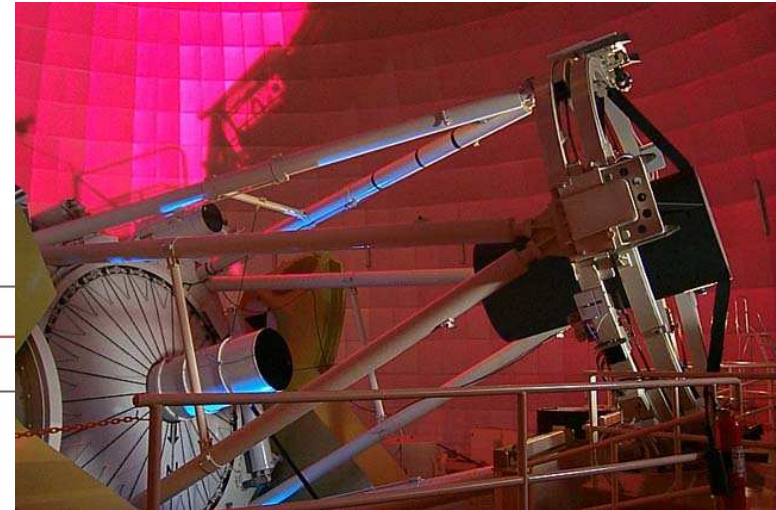
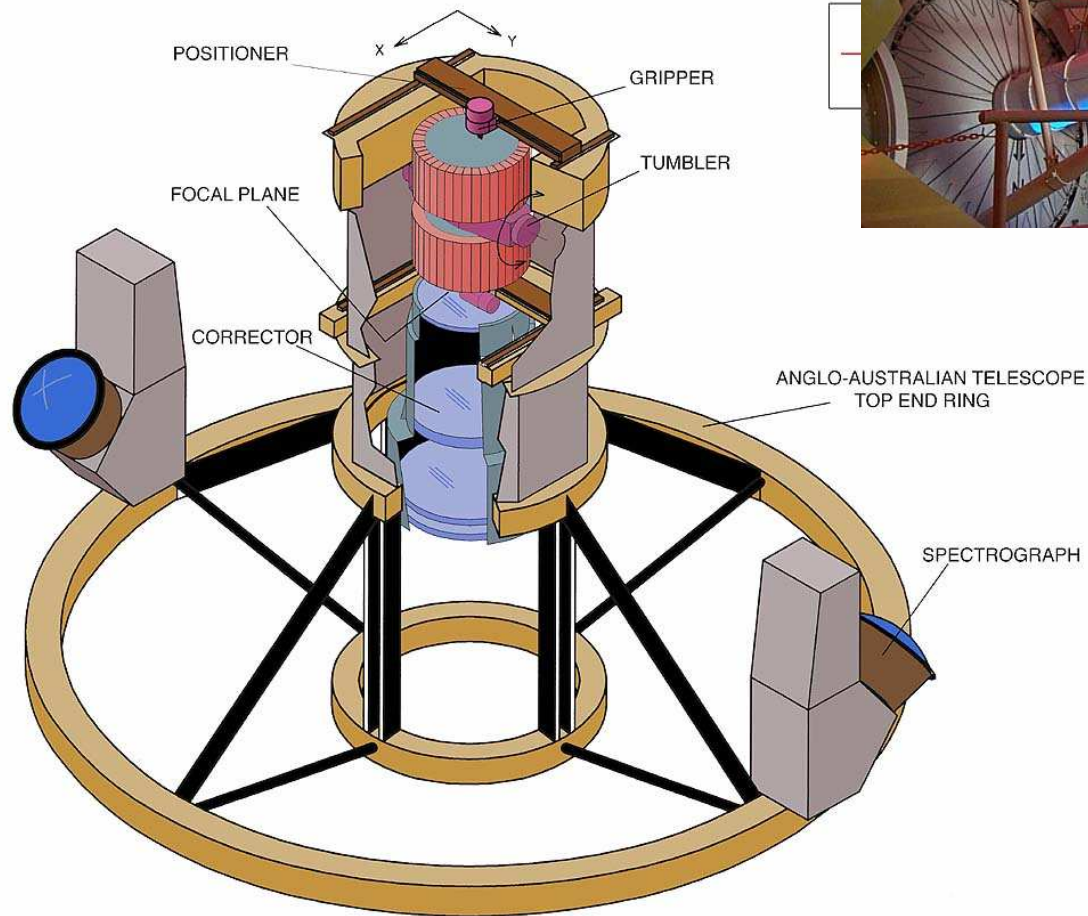
I primi fuochi di LBT

Entrambi i primi fuochi di LBT sono equipaggiati con correttori di campo che forniscono circa 0.5 gradi corretti, Un fuoco è dedicato al blu (già in funzione) e uno al rosso).



La prima lente ha diametro di circa 90 cm, ed è tra le più grandi costruite per scopi astronomici, rivaleggiando con gli obiettivi dei telescopi della fine del XIX secolo.

Il primo fuoco di AAT

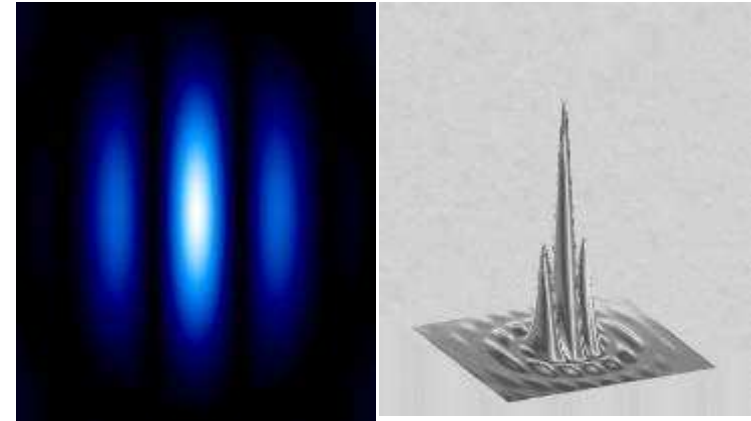
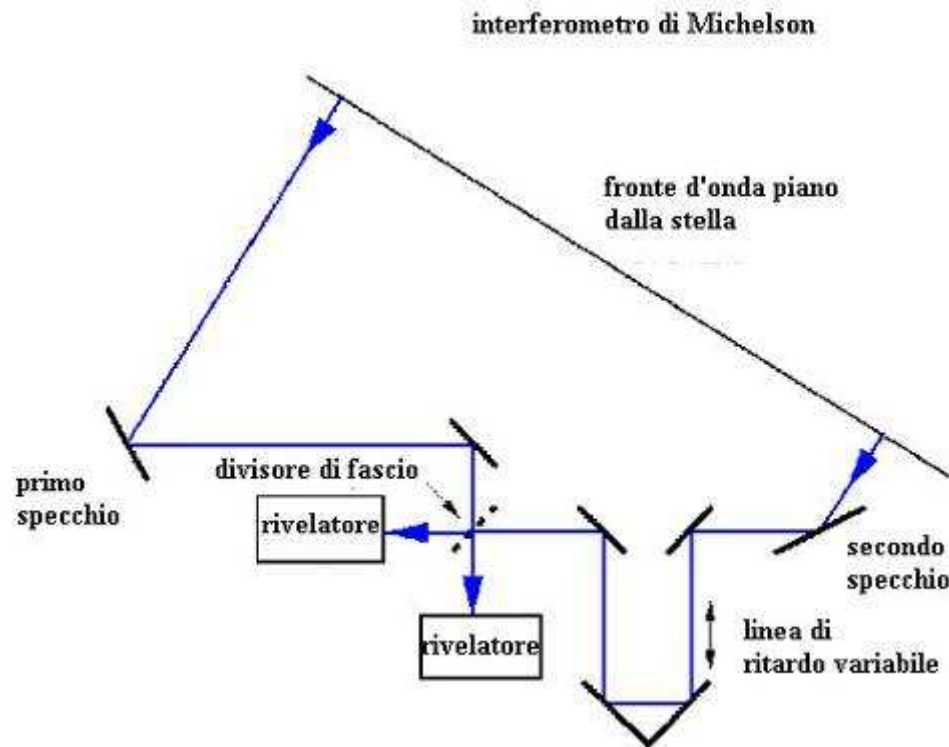


Un robot può
posizionare 400 fibre
sul campo di vista
(2x2 gradi quadrati)
per ottenere
contemporaneamente
lo spettro di 400
oggetti.

Confronto tra le varie configurazioni

- Uno specchio (primo fuoco, newtoniano): molto efficiente e veloce, serve un correttore di campo sia per il grande campo che per un primario RC, si adatta bene al $f/$ delle fibre ottiche data la luminosità si usa di prevalenza in notte di luna nuova.
- Due specchi mirrors (Cassegrain, Ritchey-Chrétien, Gregory, + specchio piano = Nasmyth): usato per la gran parte delle applicazioni sia per immagini che per spettroscopia, campo di vista modesto e corretto, può sostenere strumenti pesanti, serve un adattatore per fibre ottiche. Uso per tutte le condizioni di luna.
- Coudé: piccolo campo di vista, si usa per altissima risoluzione spettrale, o per interferometria, può sostenere strumenti molto grandi e pesanti, bassa efficienza per l'alto numero di riflessioni (almeno 4). Si usa bene in notti di luna piena o anche di giorno.
- Schmidt, grande campo di vista, veloce e efficiente, buon accoppiamento alle fibre ottiche, vuole luna nuova e siti bui, lieve cromatismo, abbisogna di rivelatori con gran numero di pixel e piccole dimensioni; si può usare anche per realizzare camere per spettrografi; esistono varianti per ottiche a grande campo (ad es. il disegno Maksutov).

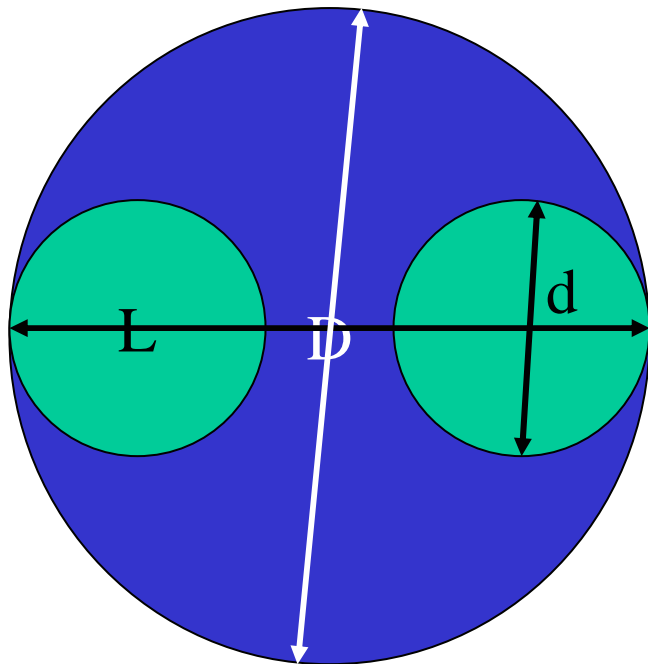
Cos'è un interferometro?



Vediamo qui il solo 'tipo Michelson', dal nome del grande ottico della fine del XIX secolo. Non c'è motivo per limitare il numero di specchi a 2, ne possiamo mettere tanti. Sul piano focale, una stella genera una serie di frange di interferenza. Dal punto di vista matematico, è necessario ricorrere al metodo delle *Trasformate di Fourier*.

Potere risolvante dell'interferometro

Nella formula vista all'inizio, $\Theta_{\min} = (PR)^{-1} = K \lambda/D$, adesso **D** non è più il diametro dello specchio, ma **la distanza** tra il primo e l'ultimo specchio, che può arrivare anche a 100 m!



Condizione necessaria è che i due specchi dell'interferometro siano

“**cofasati**” (cammino ottico uguale) entro una ***piccola frazione della lunghezza d'onda*** della luce.

Tuttavia, l'area di raccolta luce dell'interferometro non è la stessa del ‘telescopio pieno equivalente’, perché la sua area è molto più piccola. Inoltre, la risoluzione angolare è buona lungo la linea congiungente le due aperture, non in quella perpendicolare in cui rimane la stessa del singolo telescopio.



L'interferometro originale di Michelson a Mt Wilson

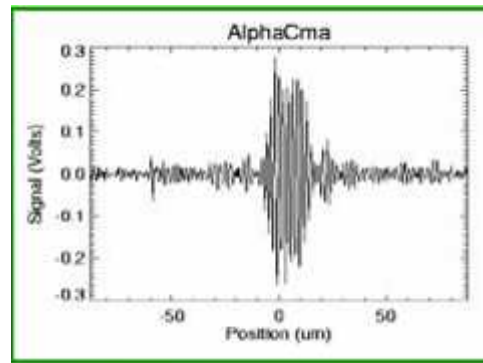
Michelson's Historic 20-ft Stellar Interferometer





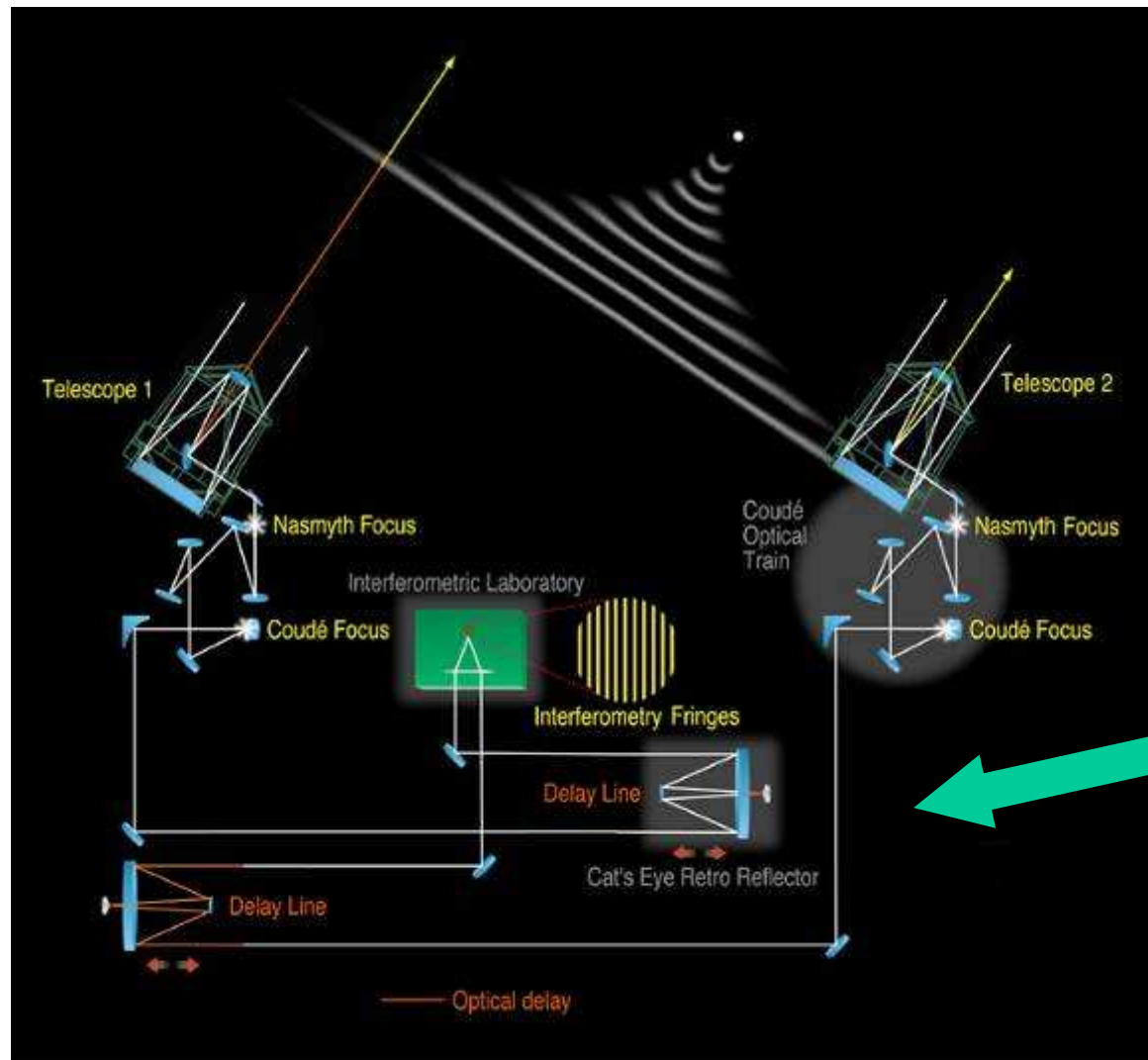
Il CHARA a Mt. Wilson

Tre linee di due telescopi ciascuna (W,E,S) con tunnel centrale (BSF).



Questo interferometro è sul Mt. Wilson in California, si chiama CHARA.

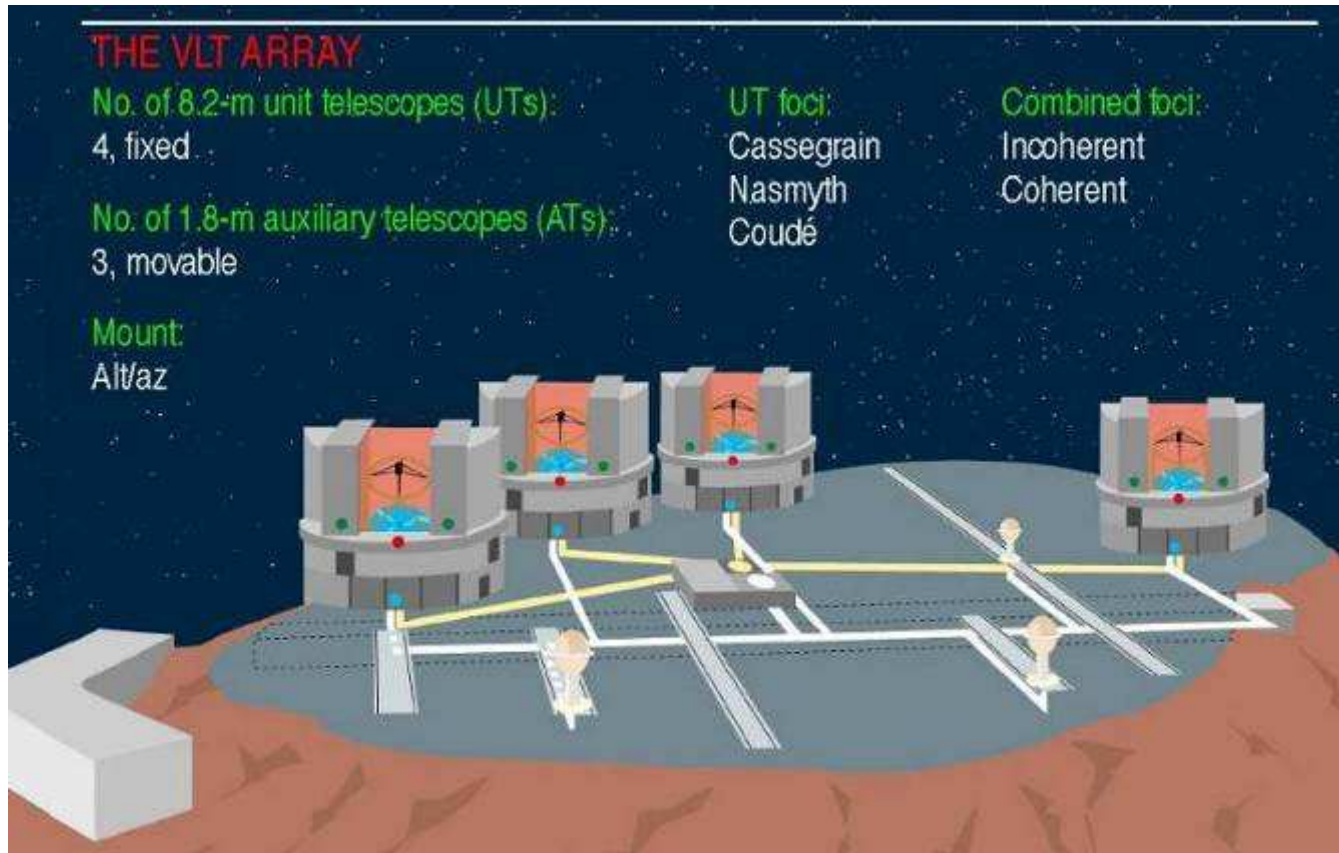
L'interferometro del VLT (VLTI) - 1



Dato il numero di riflessioni, si perde una gran quantità di luce.

Si notino le linee di ritardo variabile, in modo da mantenere la fase lungo i due cammini ottici.

L'interferometro del VLT (VLTI) - 2



La configurazione a trapezio dei 4 telescopi assicura una buona risoluzione angolare in due direzioni. Quattro telescopi ausiliari di 180cm aiutano a migliorare la copertura del piano di Fourier.

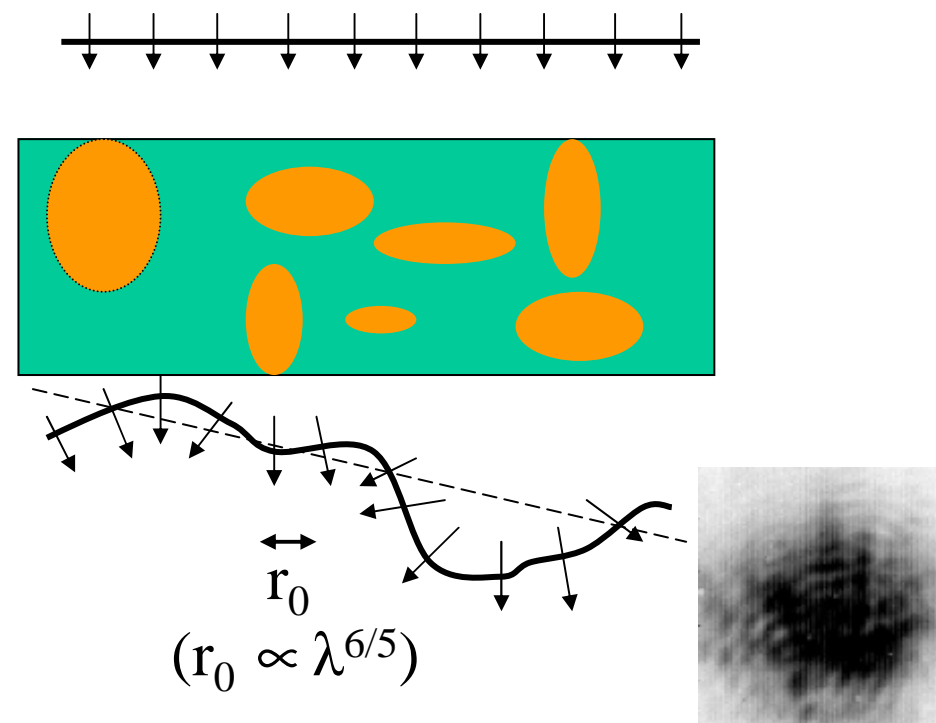
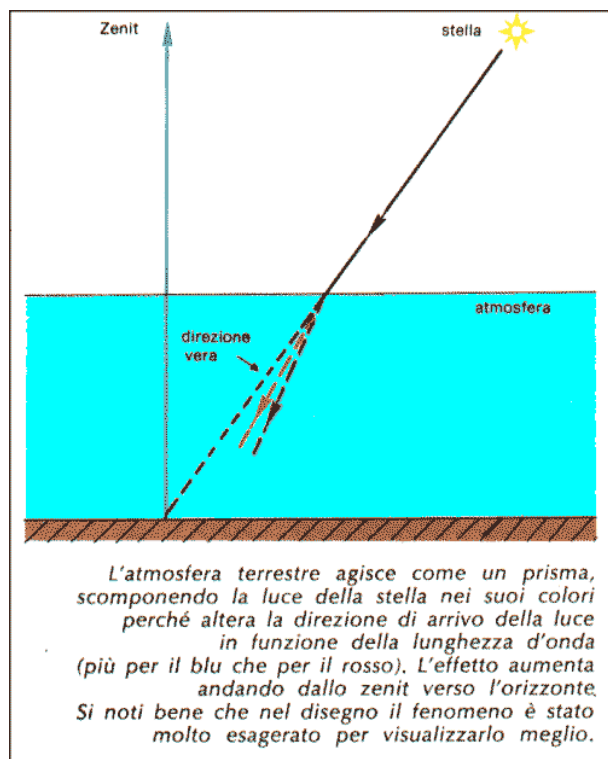
Il tunnel ottico per VLT



Per mantenere la fase, anche nel vicino IR, è necessaria grandissima complessità tecnologica. Ad es. tutto il tunnel è termostato a meglio di $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ed è predisposto anche per essere insensibile ai continui tremori sismici della zona.

I limiti posti dall'atmosfera terrestre:

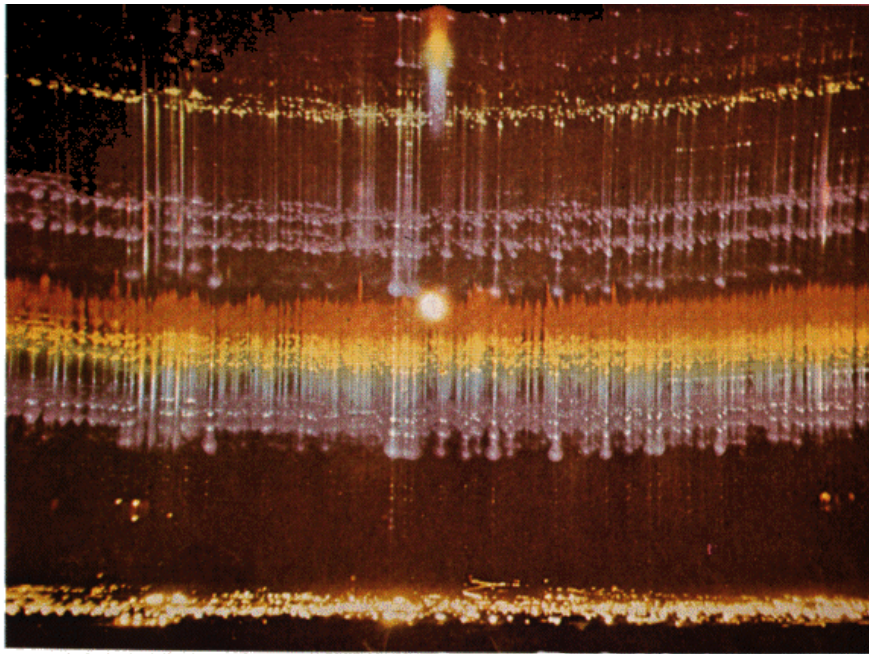
1 - il seeing



A sinistra la rifrazione 'statica'. A destra, la propagazione in un mezzo (aria) con bolle di diverso indice di rifrazione trasforma l'onda piana in una fortemente distorta. Il parametro r_0 si dice di 'Fried', e nel visibile per un buon sito vale 10 cm. La forma della stella è confusa e varia rapidamente.

Un secondo limite: 2

- le dannosissime luci artificiali

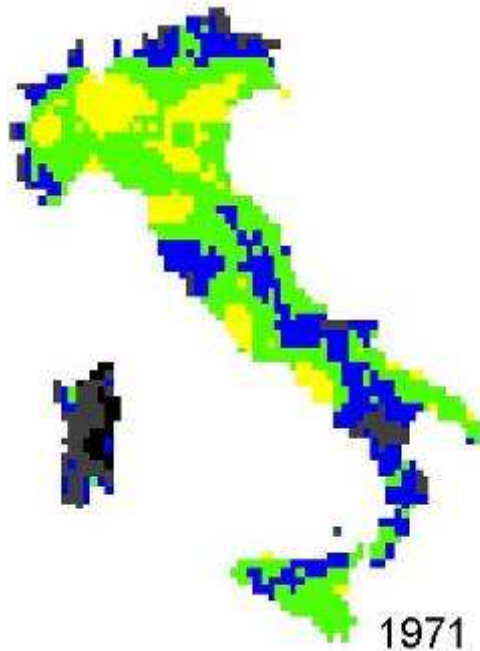


Questa foto, ottenuta con una tecnica speciale, dimostra la nocività delle luci cittadine per l'astronomia. Le luci delle lampade stradali, diffuse dall'atmosfera, sono molto più intense della Luna piena, che si vede al centro della foto.

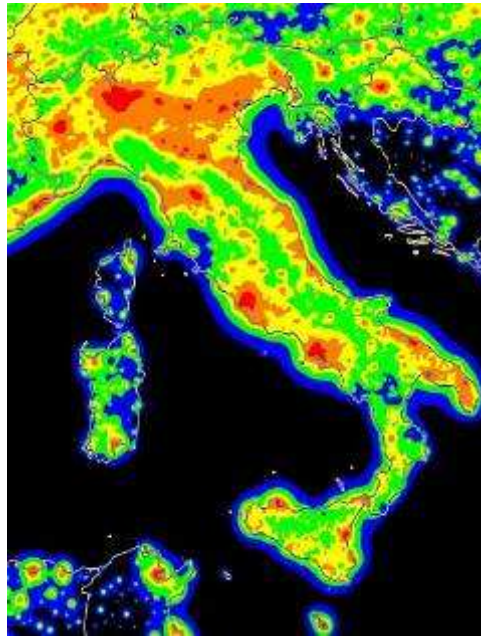


La situazione delle luci artificiali in Italia

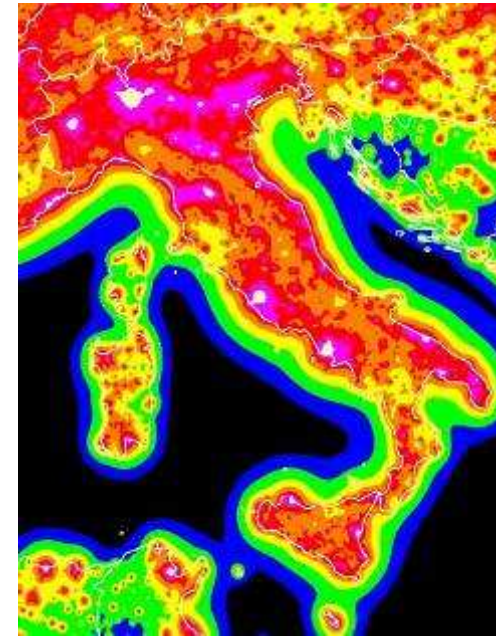
1971



1998



2025

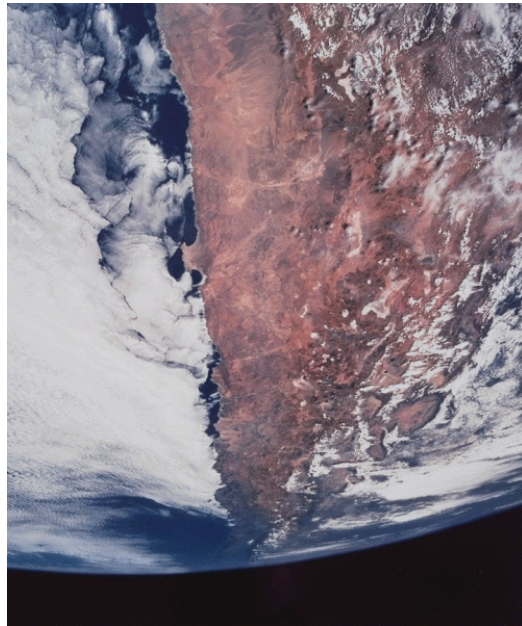


La situazione è disastrosa, si deve fare qualcosa! Non soffrono solo gli astronomi, ma tutta la gente, la flora e la fauna.

Rimedi ai problemi atmosferici?

1. Cercare i siti migliori e più bui a terra
2. Usare l'ottica adattiva
3. Andare nello spazio

I migliori siti terrestri: le Ande Cilene



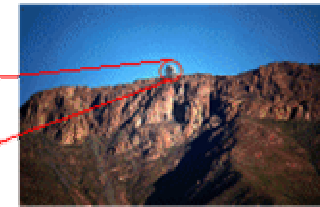
South America



Chile



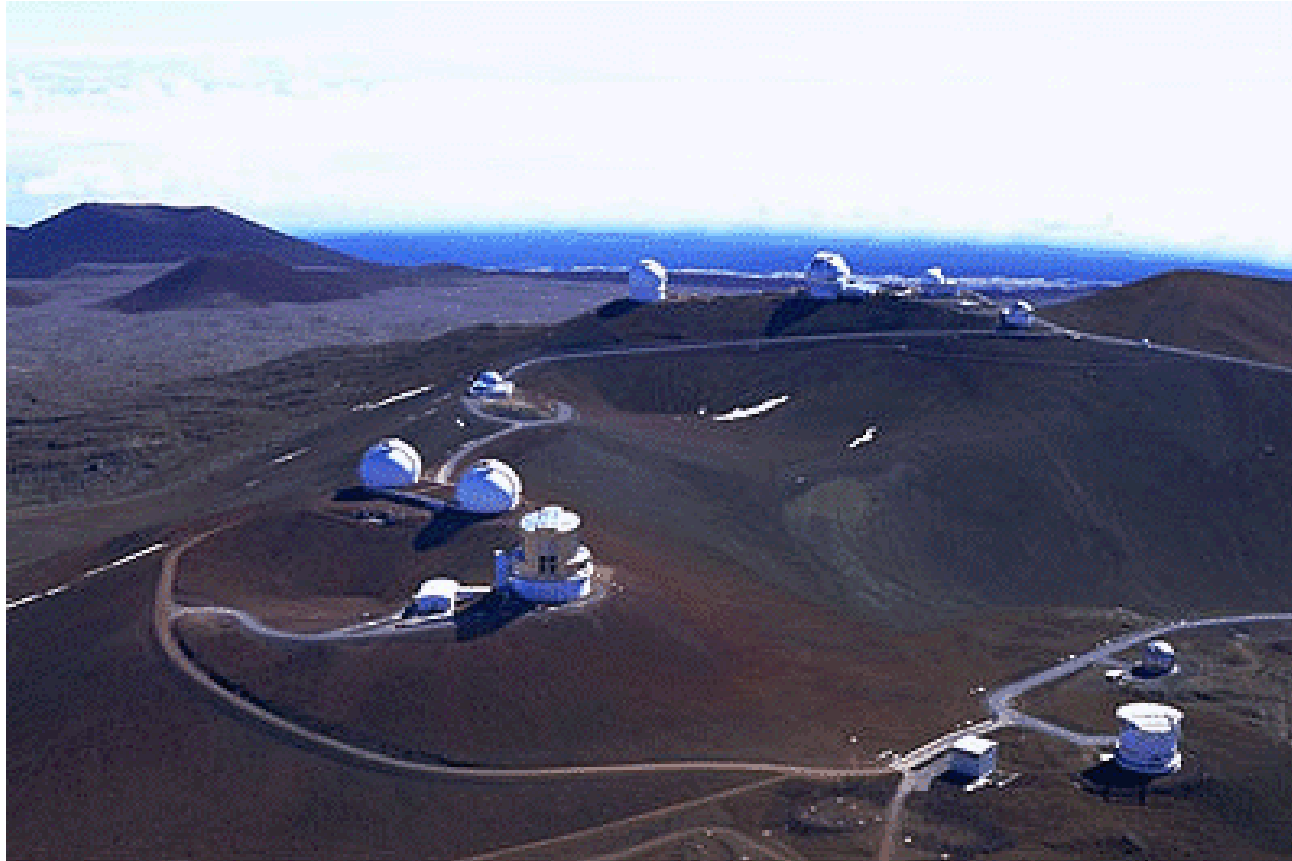
Region de Coquimbo



Summit of Cerro Pachon -
The Gemini South
Observatory

Nella parte più a Nord, il Paranal, con il VLT (ESO); poi sotto La Silla (ESO), Cerro Tololo e Cerro Pachon (USA+altre nazioni)

I migliori siti terrestri: Mauna Kea



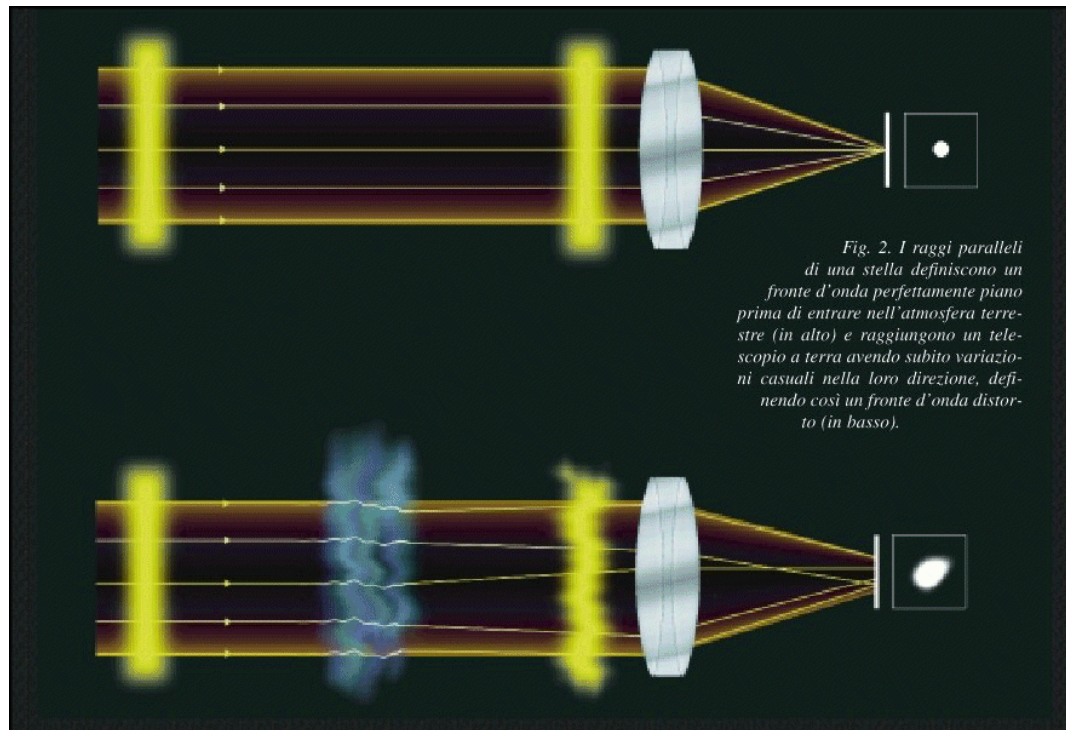
A 4200 m di quota ospita alcune tra le maggiori installazioni, tra cui i due Keck, Gemini Nord, Subaru, CFHT, UK, UKIRT, ...

I migliori siti terrestri: le Isole Canarie



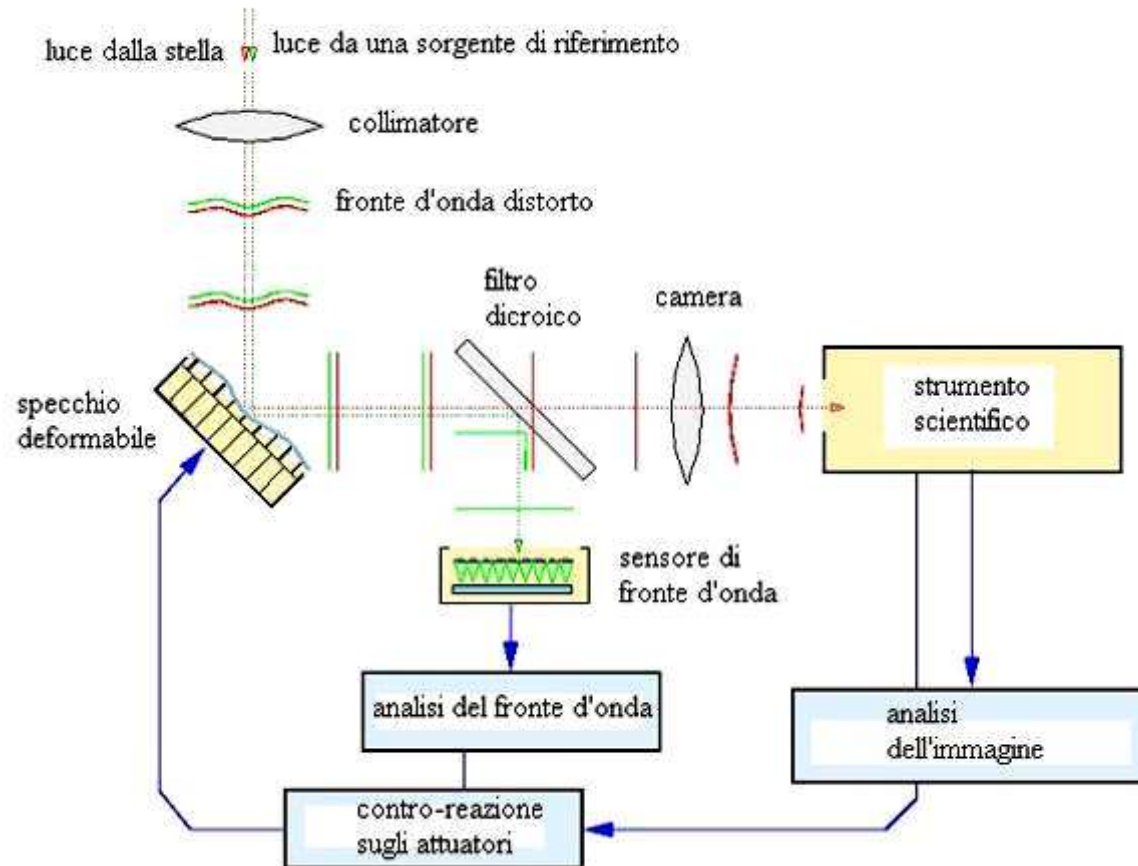
A La Palma (Roque de los Muchachos) installazioni prevalentemente notturne, tra cui il 4.2 WHT inglese, il 3.5 m TNG italiano, il 2.5m NOT, e il futuro GranTeCan di 10m. A Tenerife, installazioni prevalentemente solari (tra cui il Themis cui partecipa l'Italia).

Un altro rimedio agli effetti del *seeing*: l'ottica adattiva

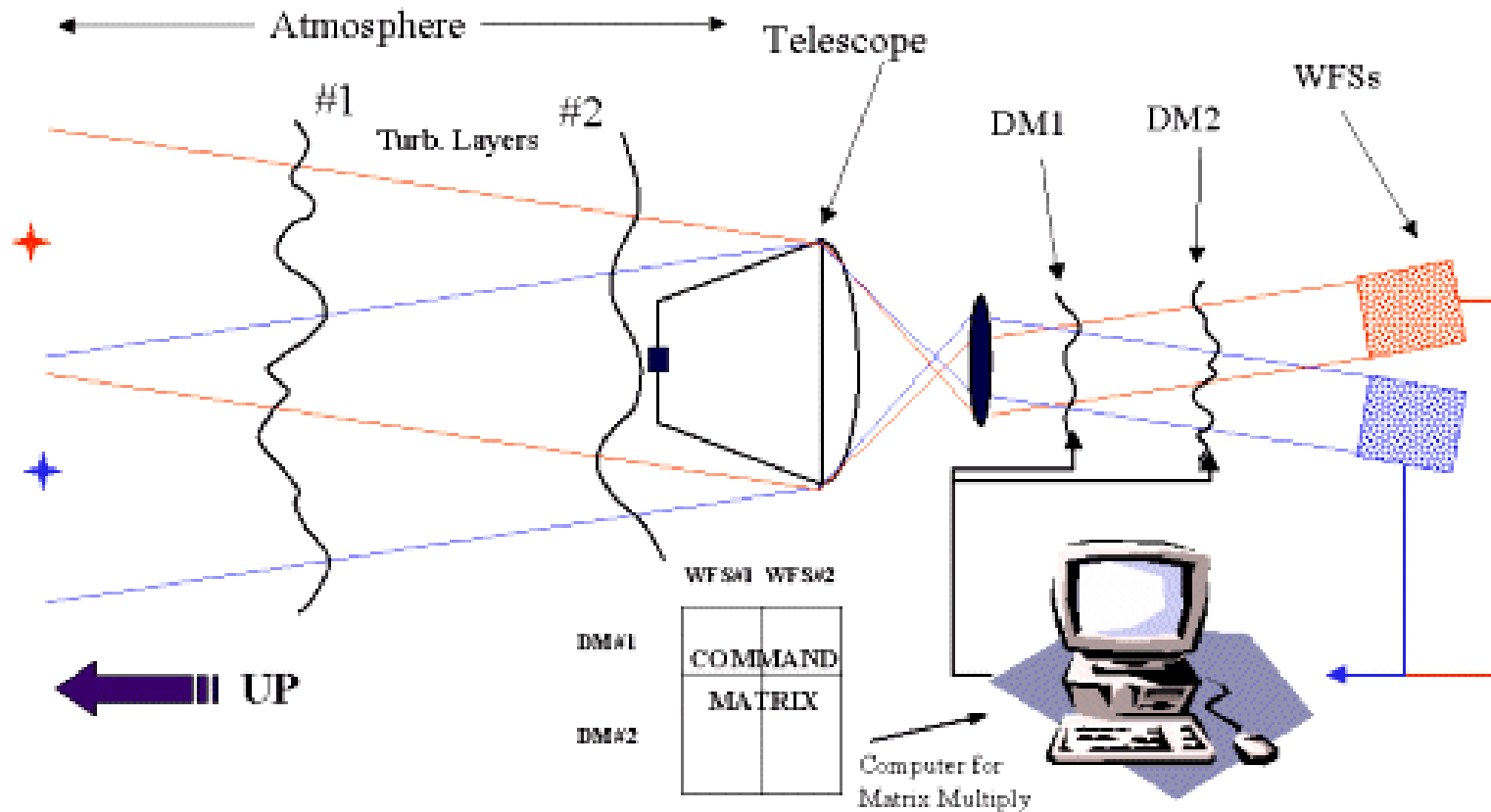


Si può introdurre un dispositivo ottico che corregga le distorsioni del fronte d'onda, che avvengono con scale di tempi dal millisecondo fino a qualche secondo. E' necessario però un opportuno riferimento di fase (stella naturale o artificiale).

Ottica Adattiva - 1

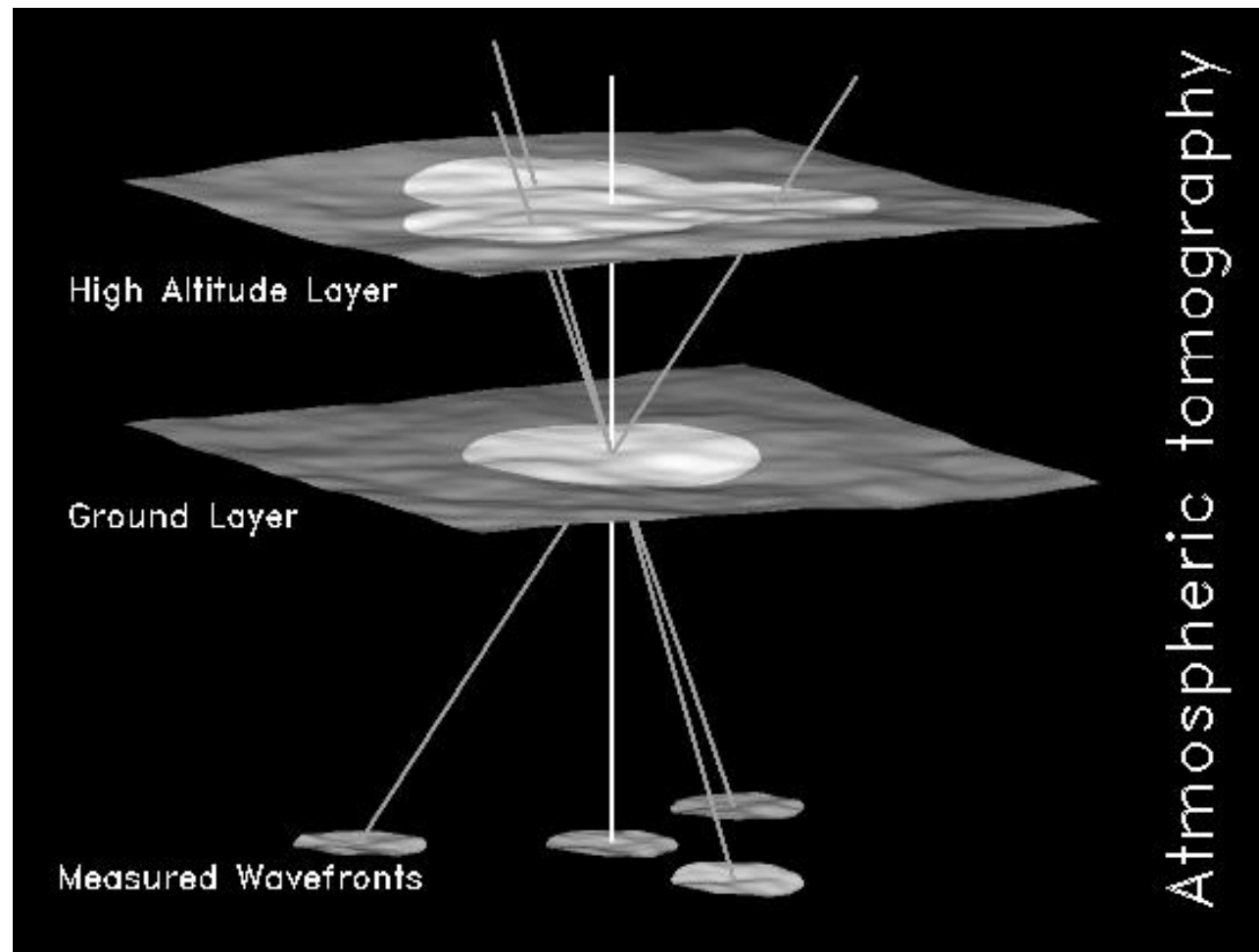


Ottica Adattiva - 2



In questo schema l'atmosfera terrestre è modellizzata con due strati. Si noti che due stelle vicine non hanno necessariamente la stessa distorsione, per cui la correzione si applica solo al cosiddetto 'campo isoplanatico'.

Atmosfera: simulazione con 2 strati



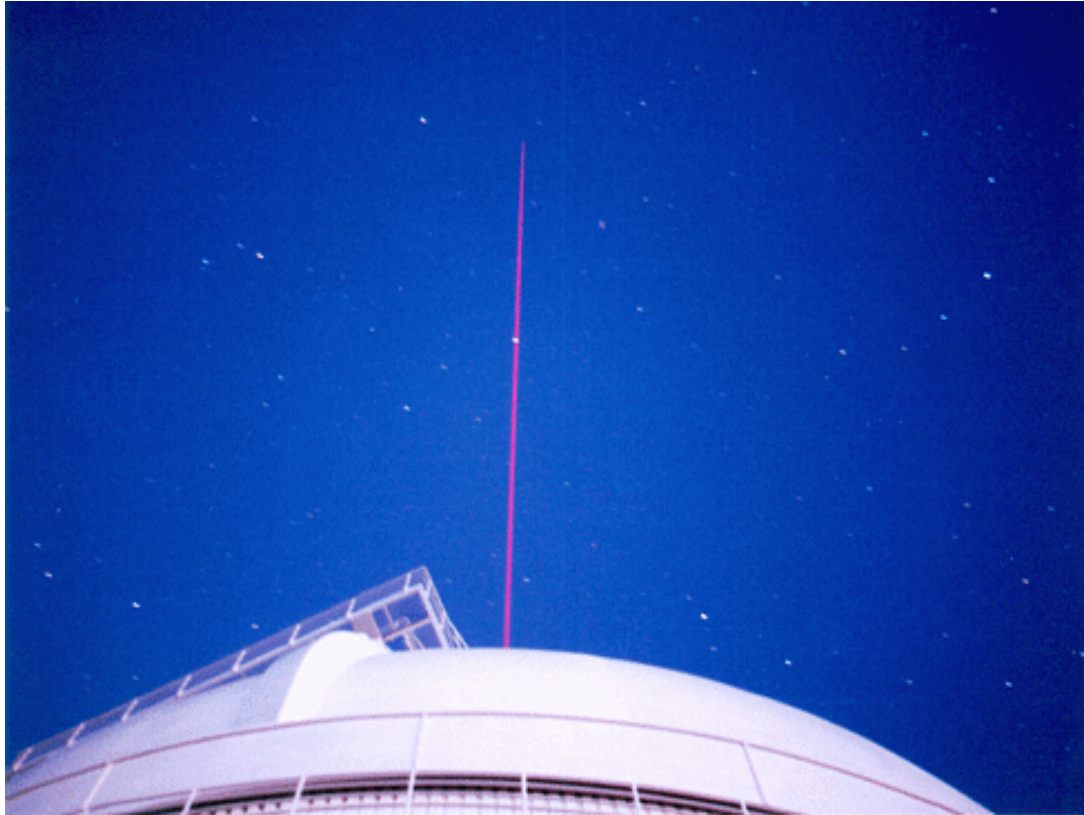
Da R. Ragazzoni et al., *Nature*

13/01/2009

C.Barbieri Astron I AA 2006-07

104

Un'onda di riferimento



Per avere una buona onda di riferimento ci vorrebbe una sorgente intensa, ma anche per i grandi telescopi non ci sono in cielo abbastanza stelle brillanti. Il problema è particolarmente severo alle alte latitudini galattiche, dove invece ci sarebbero anche le sorgenti più interessanti!

Una possibilità è di farsi una stella artificiale, illuminando con un adatto laser lo strato di Sodio presente a circa 90 km di quota. Il risultato è una brillante stella gialla, quasi monocromatica.

Funzionamento dell'Ottica Adattiva

QuickTime™ and a
Cinepak decompressor
are needed to see this picture.

La turbolenza dell'aria è apprezzabile su un esteso intervallo di frequenze, diciamo da 1 a 1000 Hz (tempi scala da 1 secondo a 0.001 secondi).

Il centro della Via Lattea con l'AdOpt del Keck

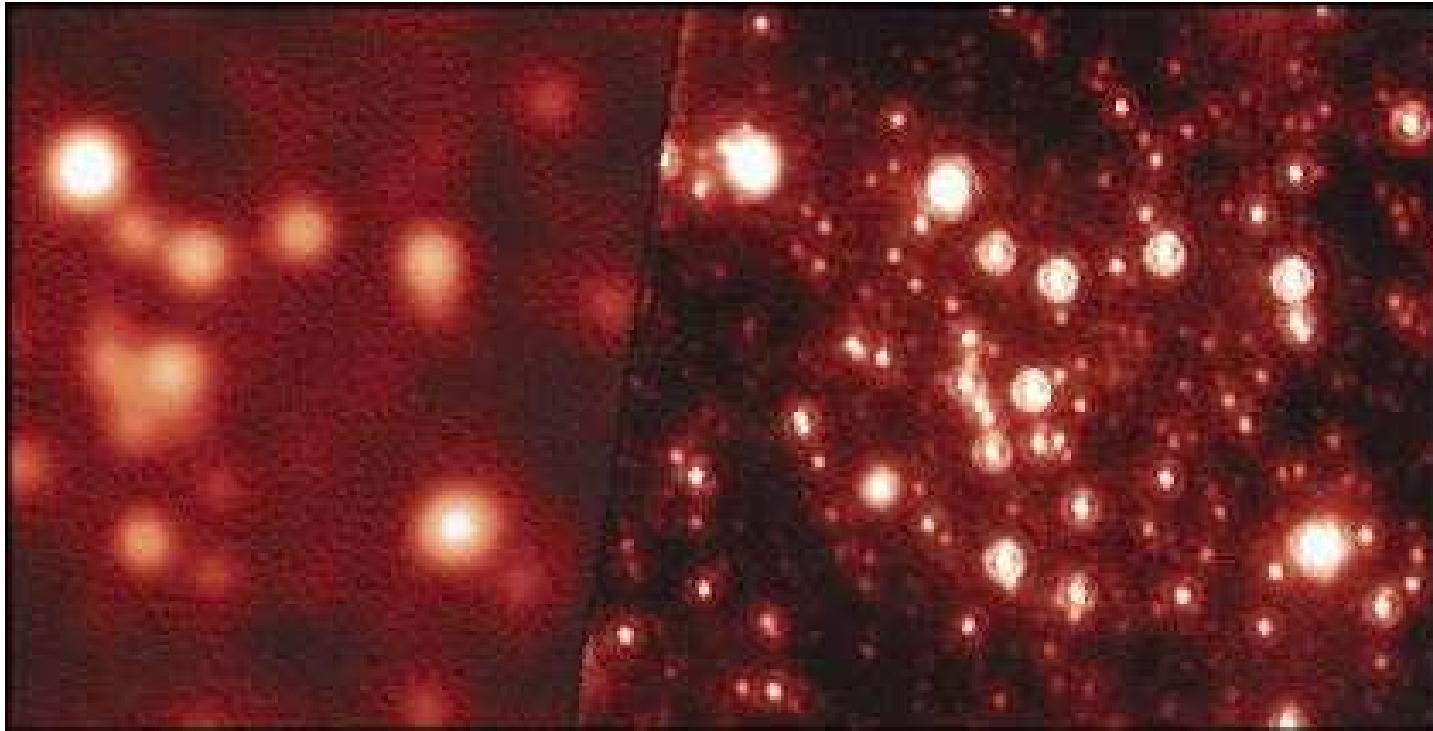


Immagine normale

**Immagine corretta dal seeing
con l'Ottica Adattiva**

Ottica adattiva con LBT

Come si è detto, LBT ha scelto una configurazione gregoriana per coniugare nel fuoco RC lo strato di atmosfera a circa 100 m di altezza. E' venuto naturale così rendere tutto lo specchio secondario adattivo, una impresa tecnologica formidabile!

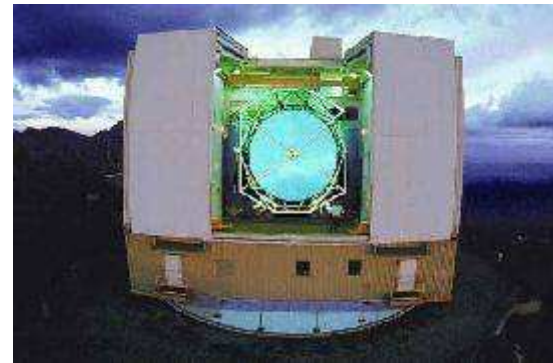
Se avrà successo si otterranno due importanti vantaggi:

- gli effetti della turbolenza atmosferica verranno automaticamente corretti a tutti i suoi otto fuochi
- si potranno ottenere immagini “co-fasate” con risoluzione angolare uguale a quella di diffrazione di un telescopio da 23 m (0,004 secondi d'arco nel visibile) e campo di vari minuti.

Una soluzione prototipale è già in funzione a MMT (Arizona).

Il secondario adattivo di MMT

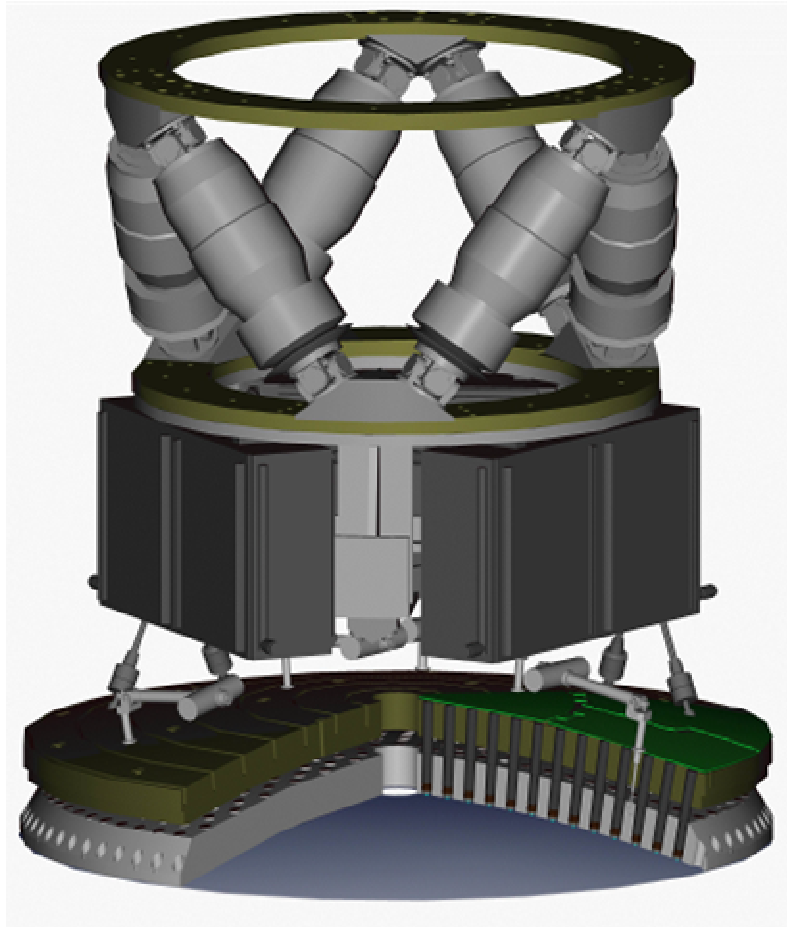
<http://www.mmtto.org/>



Sopra: Dal 2000, i 6 specchi di MMT sono stati rimpiazzati da uno specchio singolo di 6.5m.

A sinistra: Secondario adattivo di MMT (in funzione dal 2002):
336 attuatori deformano lo specchio
600 volte al secondo con accuratezza
del milionesimo di millimetro

Il secondario adattivo di LBT

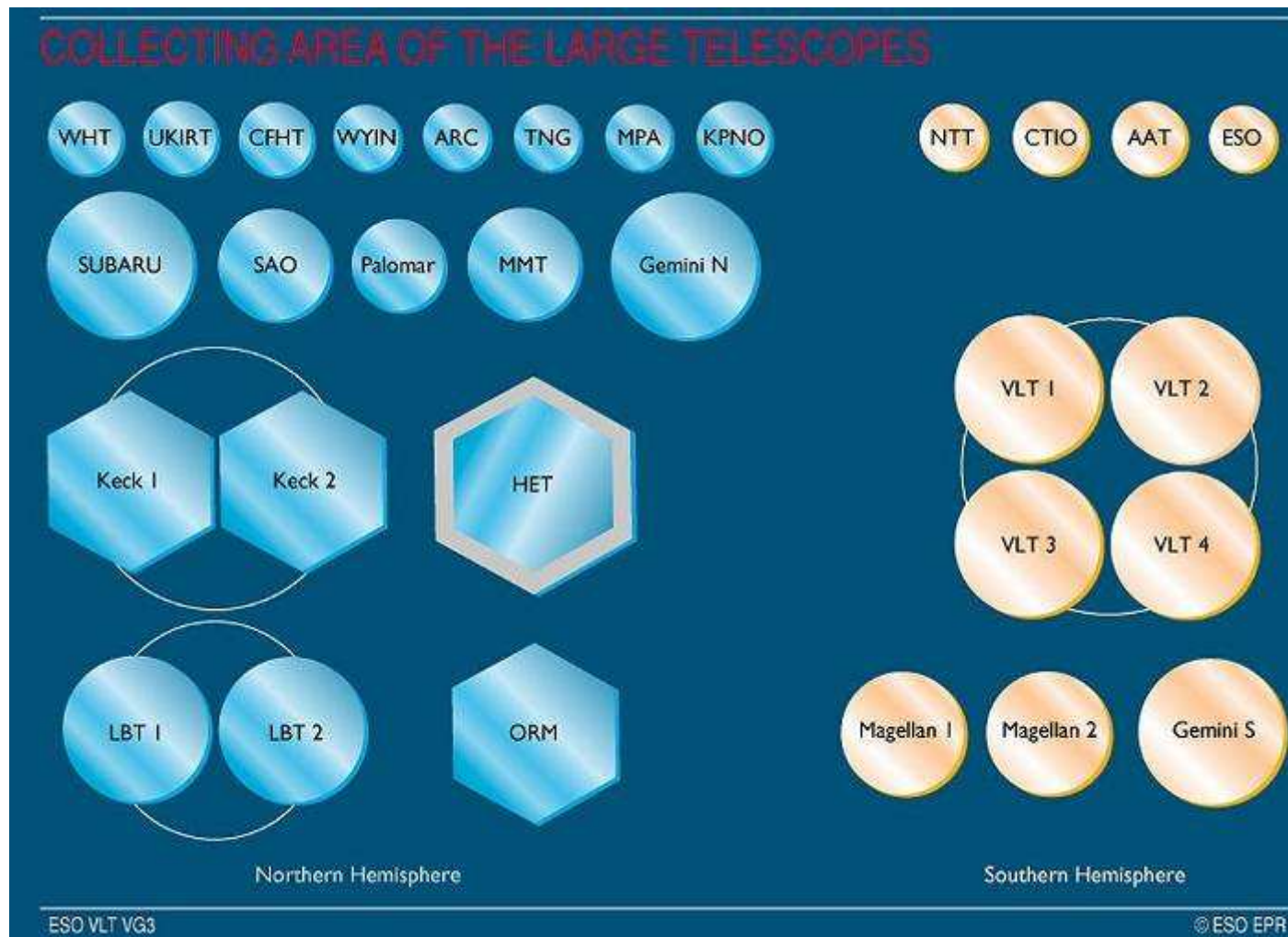


Secondario di LBT (in operazione dal 2008):

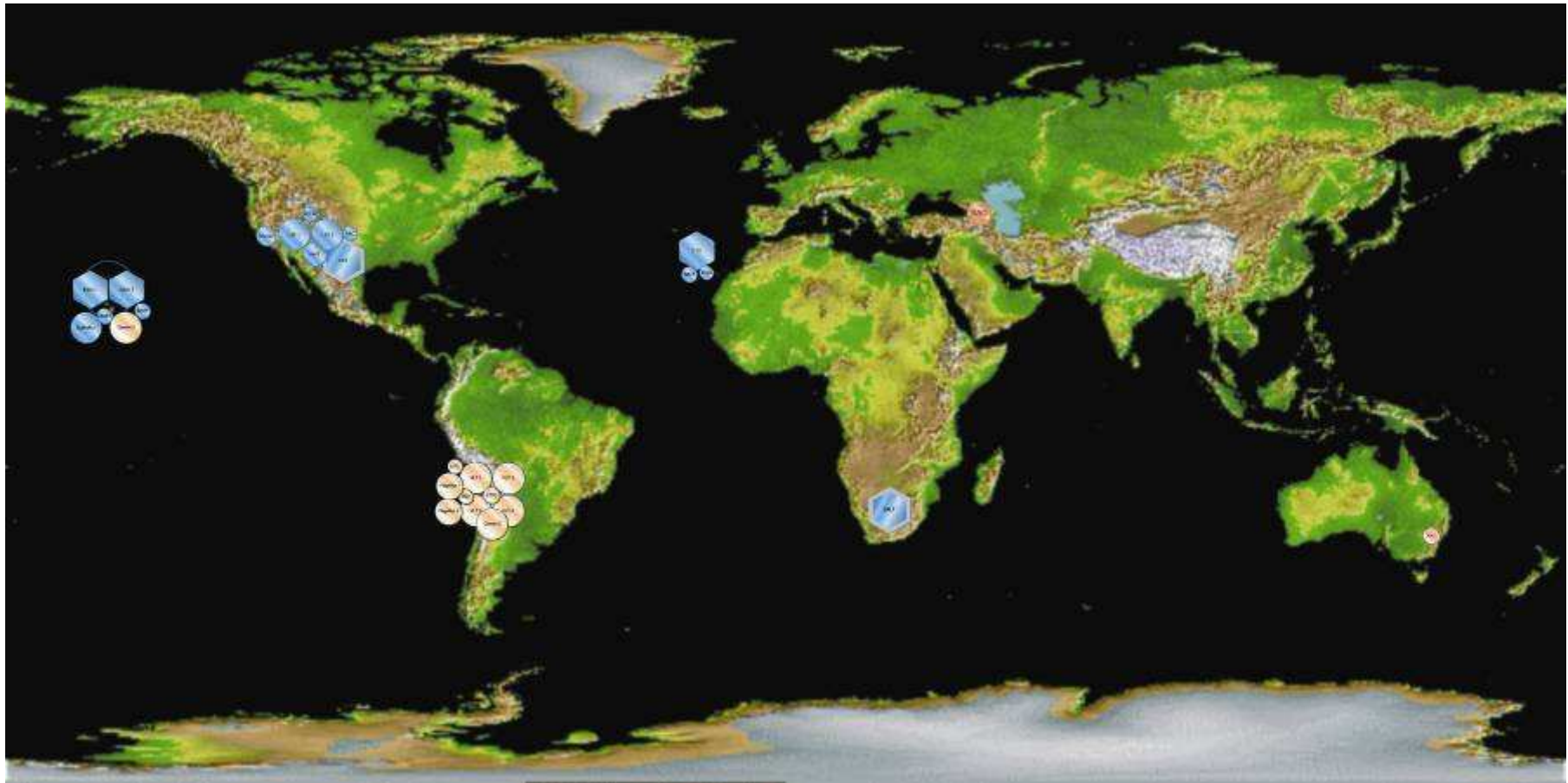
672 attuatori deformano lo specchio 1000 volte al secondo con accuratezza del milionesimo di millimetro



I grandi telescopi moderni al suolo



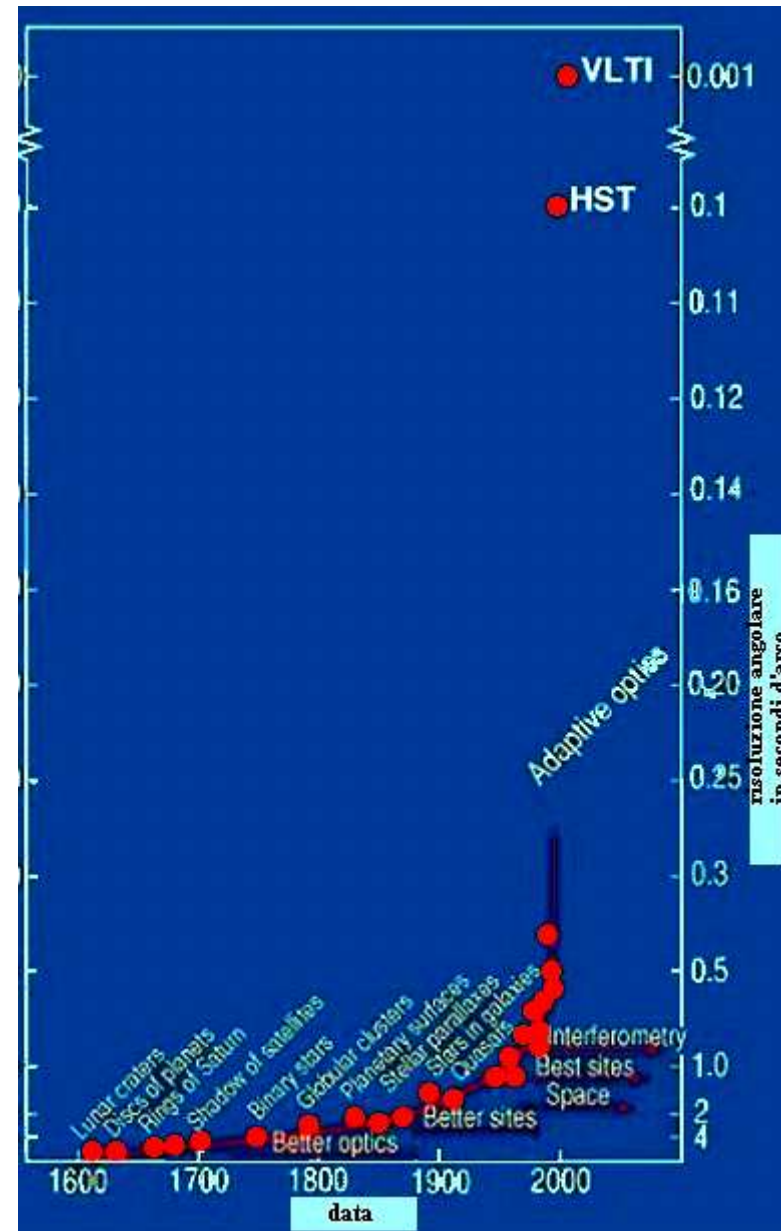
Dove sono i grandi telescopi odierni



L'aumento di risoluzione angolare con il passare dei secoli

Il VLTi supera di quasi due ordini di grandezza le capacità di risoluzione di HST. Tuttavia, si devono ben considerare due elementi:

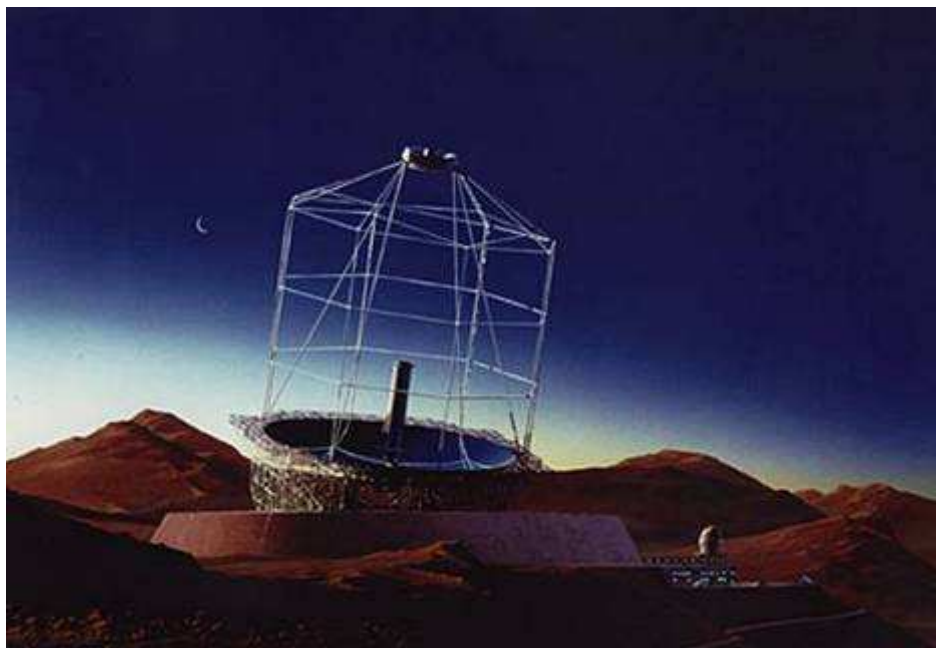
- Queste prestazioni di VLTi si riferiscono alla banda K nell'IR, quelle di HST sono nel visibile
- Il campo corretto di VLTi è molto molto piccolo.



Il futuro al suolo

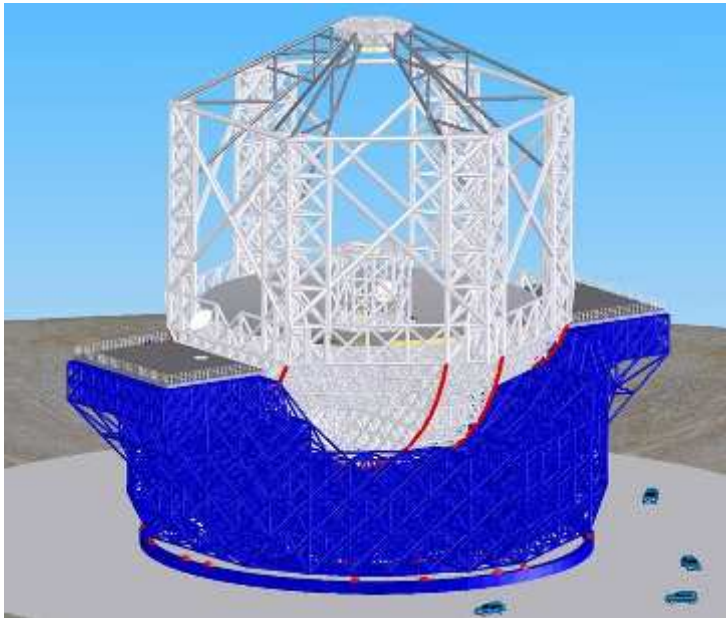
Per i vari progetti in corso vedi:

<http://www.eso.org/projects/e-elt/links.html>



Ci sono vari progetti per telescopi da 30m in su. Alcuni anni fa, l'ESO era partito con un progetto estremamente ambizioso, cioè un telescopio da 100m chiamato **OWL**

L'E-ELT oggi



European Extremely Large Telescope
(EELT), diametro 42 m (?)

Area = 1200 m²

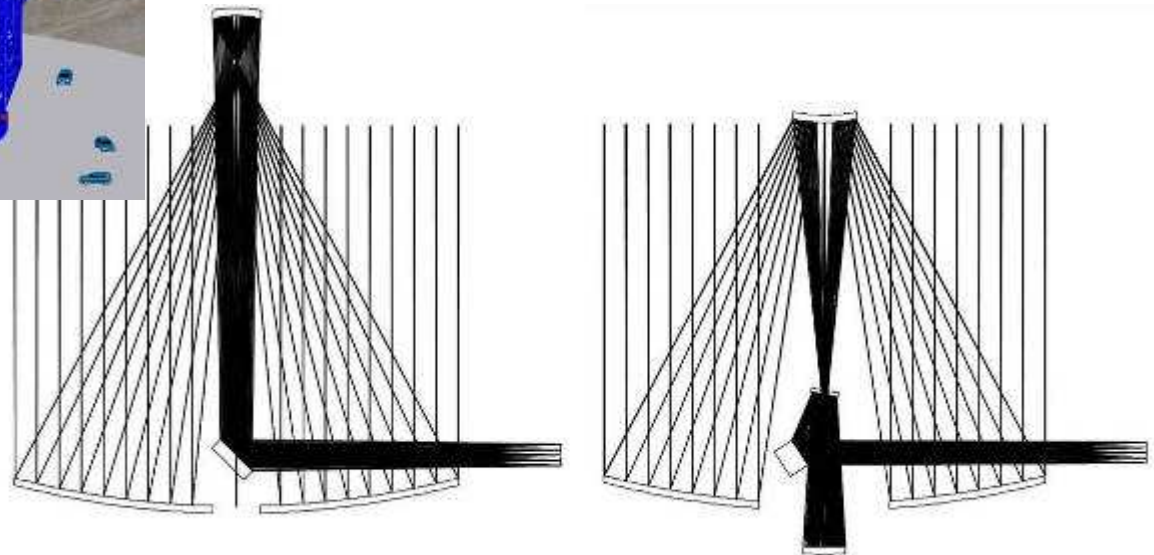
Ris. ang. = 0",01

Campo di vista = 10'

Inizio operazioni > 2017?

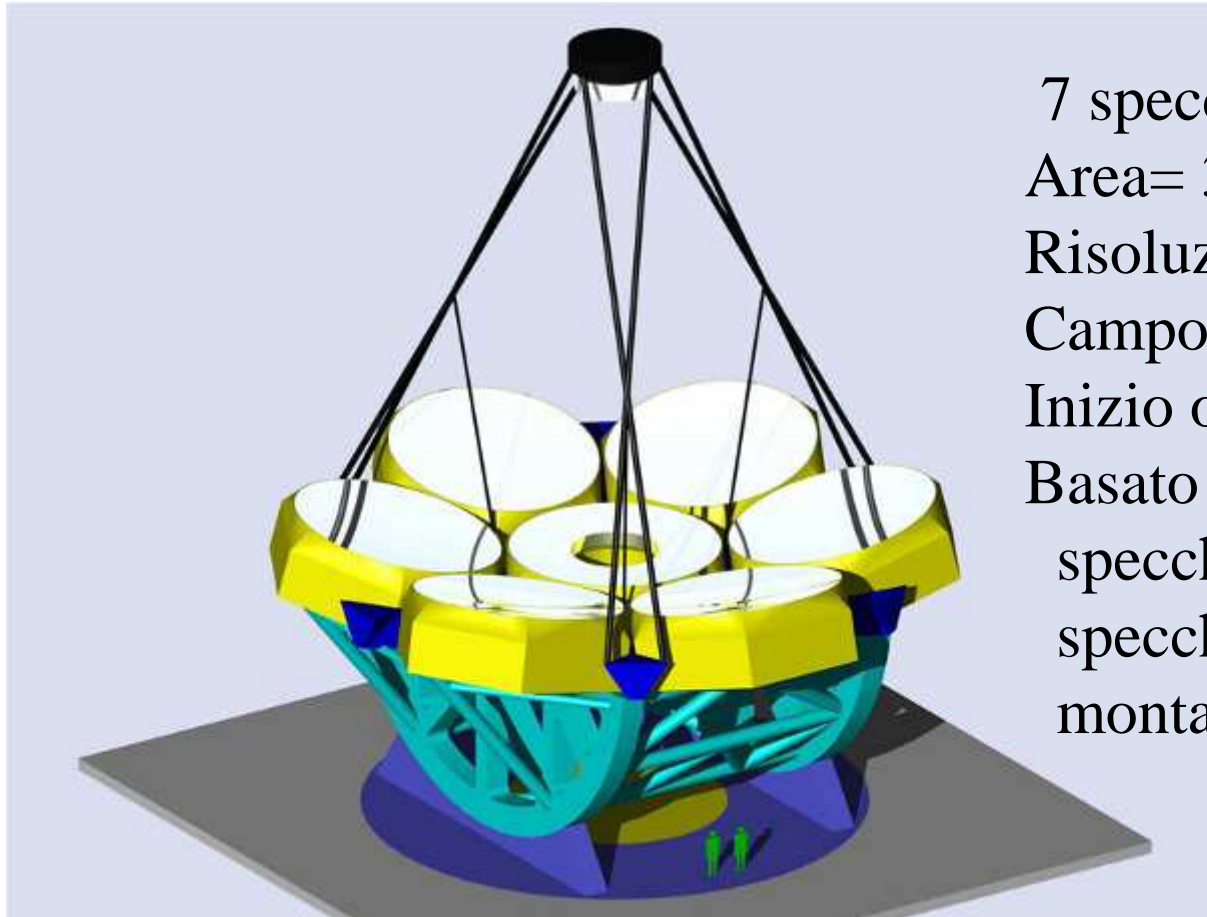
Due ottiche in
studio.

Uso specchi
adattivi alla LBT?



Sito ??

Il Giant Magellan Telescope GMT



7 specchi come LBT

Area= 380 m²

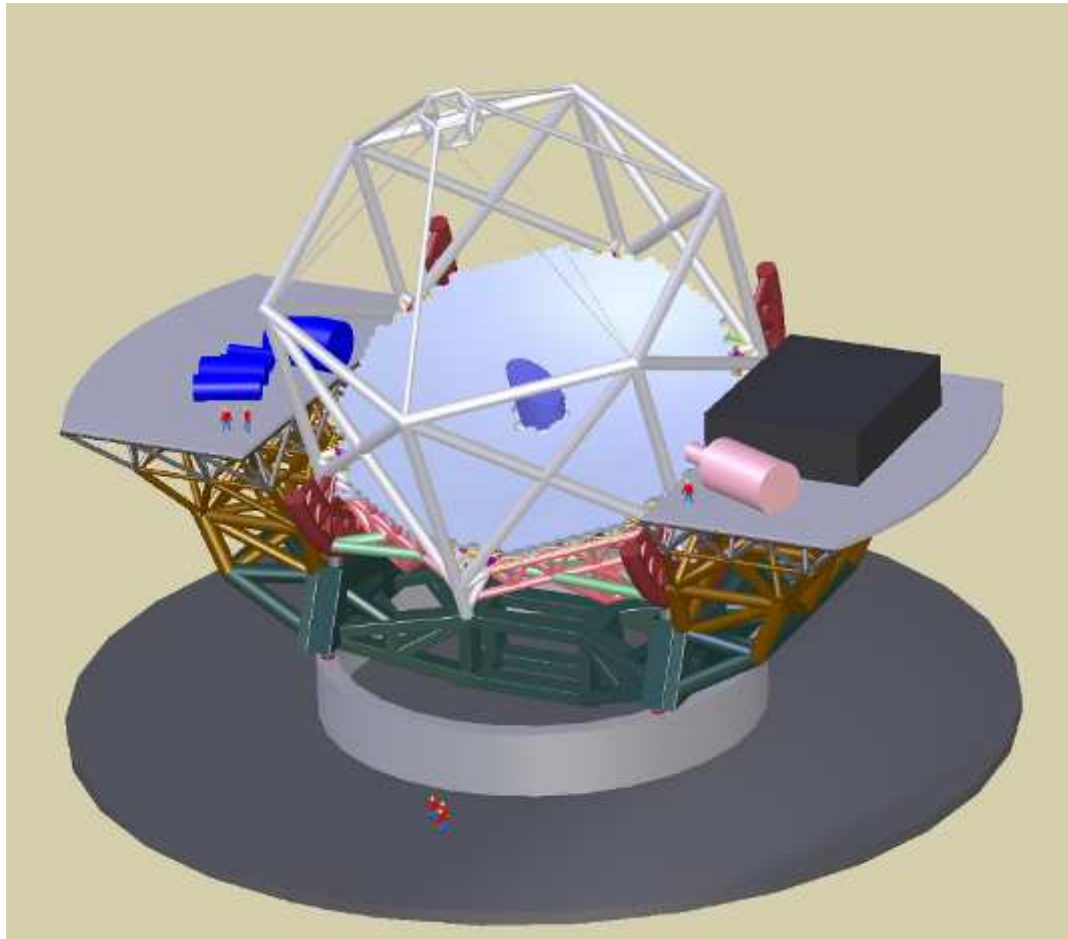
Risoluzione ang.= 0",01

Campo di vista= 20'

Inizio operazioni > 2017?

Basato su tecnologia LBT per
specchi adattivi
specchi primari
montatura

Il Thirty Meter Telescope TMT



Area = 700 m²

Risoluzione ang. =
0",01

Campo di vista =
15' d'arco

Inizio operazioni >
2017?

Per il grande campo di vista: LSST

http://www.lsst.org/lsst_home.shtml



The Large Synoptic Survey Telescope (LSST) is a proposed ground-based 8.4-meter, 10 square-degree-field telescope.

Sito: Cerro Pachon, Cile

Sponsor: **19 Università
USA + GOOGLE!**

Avremo un GoogleSky?

Telescopi nello spazio

Il futuro nello spazio: il James Webb Space Telescope



<http://www.jwst.nasa.gov/>

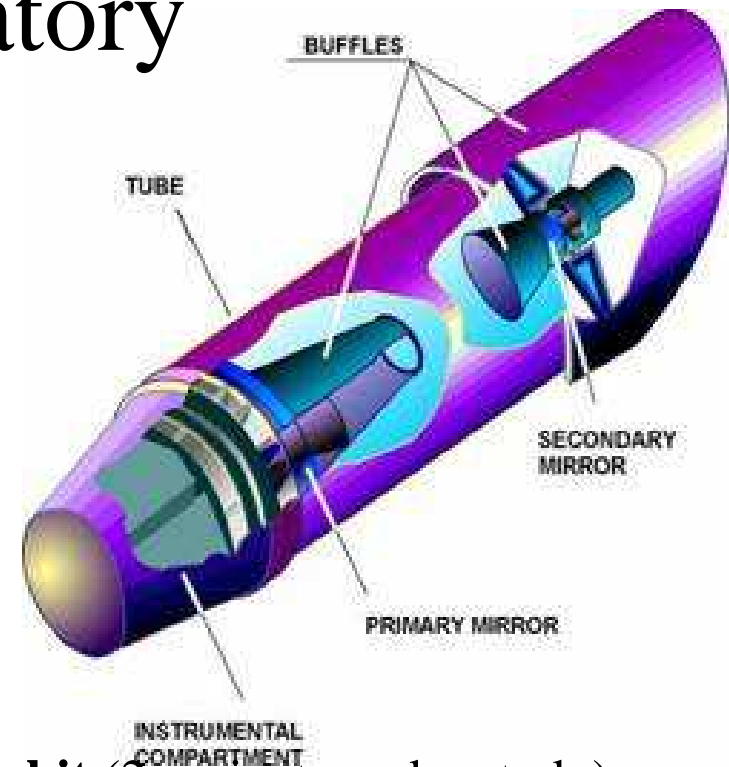
A 6.5 infrared-optimized space telescope, scheduled for launch in 2013.

WST will have a sunshield the size of a tennis court. Both the mirror and sunshade won't fit onto the rocket fully open, so both will fold up and open only once JWST is in outer space. JWST will reside in an orbit about 1.5 million km (1 million miles) from the Earth (in Sun-Earth Lagrangian point L2).

II World Space Observatory

The World Space Observatory for Ultraviolet (WSO-UV) is a planned international collaboration led by Russia *with Italian partnership* to build a UV (100-310 nm) mission. The mission consists of a 1.7m telescope Ritchey-Chretien aplanat, f/10, FoV=0.5° able to perform:

- high resolution ($R \sim 55,000$) spectroscopy by means of two echelle spectrographs covering the 100-310 nm range;
- long slit (1 x 75 arcsec) low resolution ($R \sim 1500-2500$) spectroscopy;
- deep UV and diffraction limited optical imaging.



Orbit:(2 variants under study) :

- Circular/geosynchronous - 51.8° inclination
- High perigee elliptical orbit - 160000 Km (apogee) 40000 Km (perigee)- 3-4 days period - 51.8° orbit inclination