



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Telescopi e osservazioni astronomiche

Argomento 4

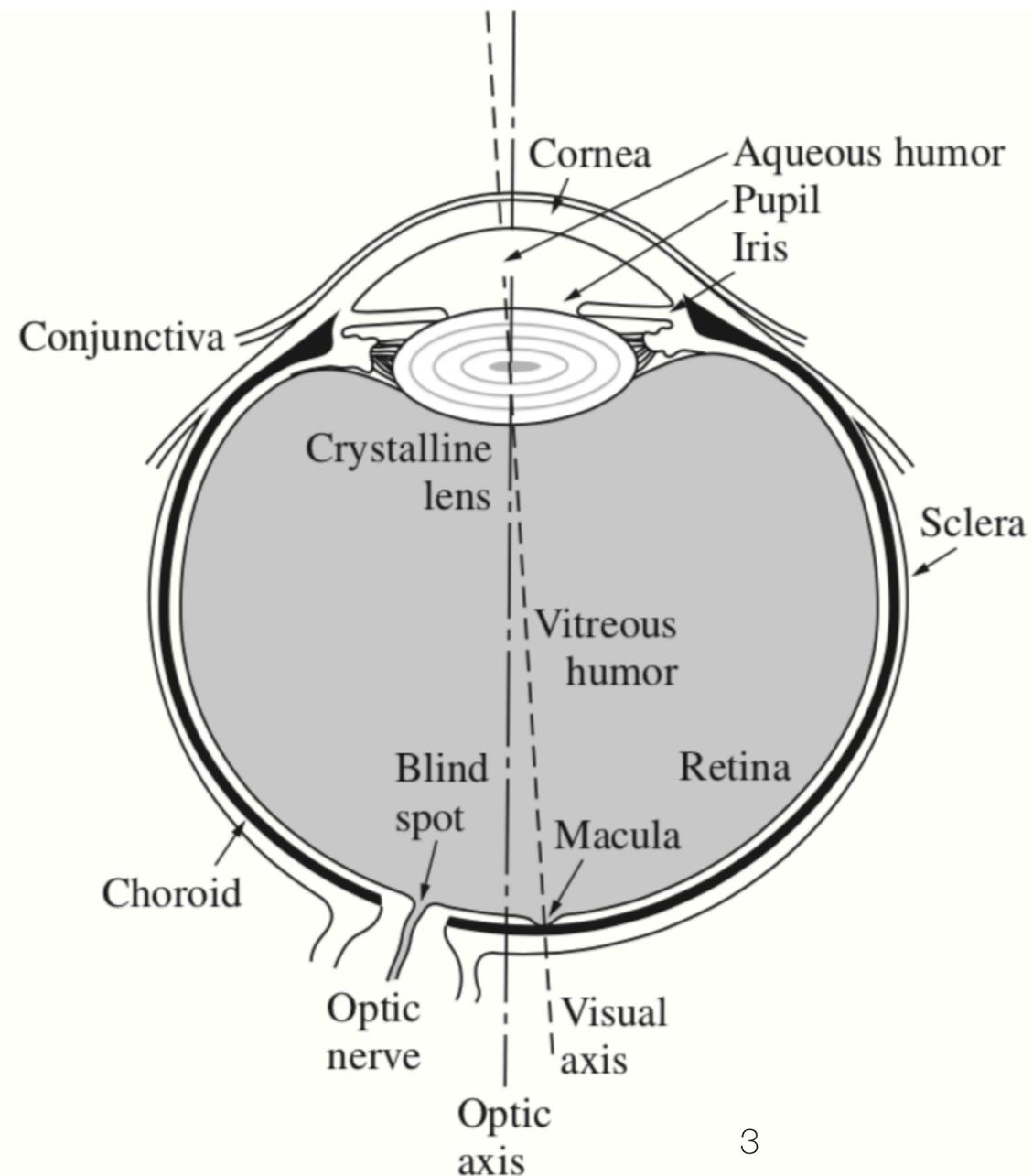
Materiale da  
Cap. 6 “The cosmic perspective”, by J. O. Bennett, M. O. Donahue, N. Schneider & M. Voit



- Definizione telescopi
- Funzioni di un telescopio
- Telescopi ottici
- Montature

# Il più semplice telescopio: l'occhio umano

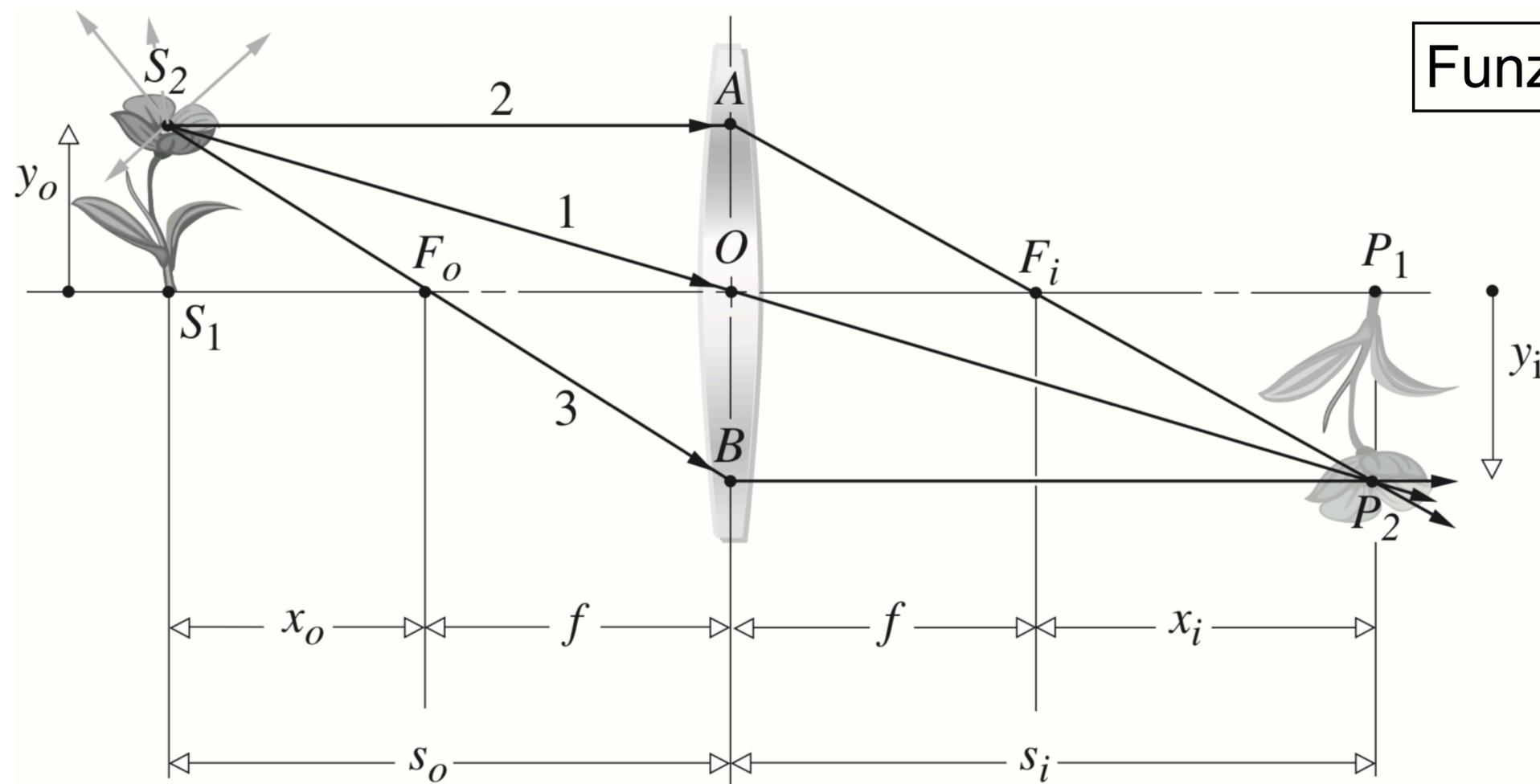
I telescopi sono *sistemi ottici*: combinazioni di lenti, diaframmi, specchi, che hanno lo scopo di raccogliere e focalizzare la luce su uno strumento che la analizza



- La *pupilla* funge da diaframma: stabilisce quanta luce entra nel *sistema ottico*
- Il *cristallino* funge da lente: focalizza i raggi verso la retina
- La *retina* funge da pellicola

# Lente convergente

Una lente convergente sottile (come il cristallino) può essere usata come obiettivo, con lo scopo di focalizzare la luce proveniente da un oggetto distante su uno schermo



Funzionamento lente sottile

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$$

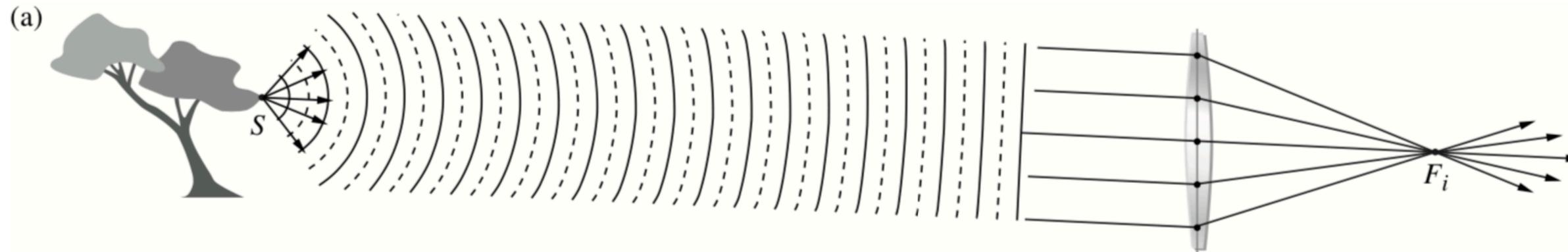
Mi dice dove si forma l'immagine

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o}$$

Mi da l'ingrandimento

*equazioni gaussiane delle lenti*

# l'occhio umano



Se l'oggetto si trova all'infinito, il fronte d'onda che arriva sulla lente si può approssimare ad un piano, e i raggi si possono considerare paralleli. Applicando la legge gaussiana delle lenti, l'immagine si forma nel fuoco

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$$

$$s_o = \infty$$

$$1/s_o = 0$$

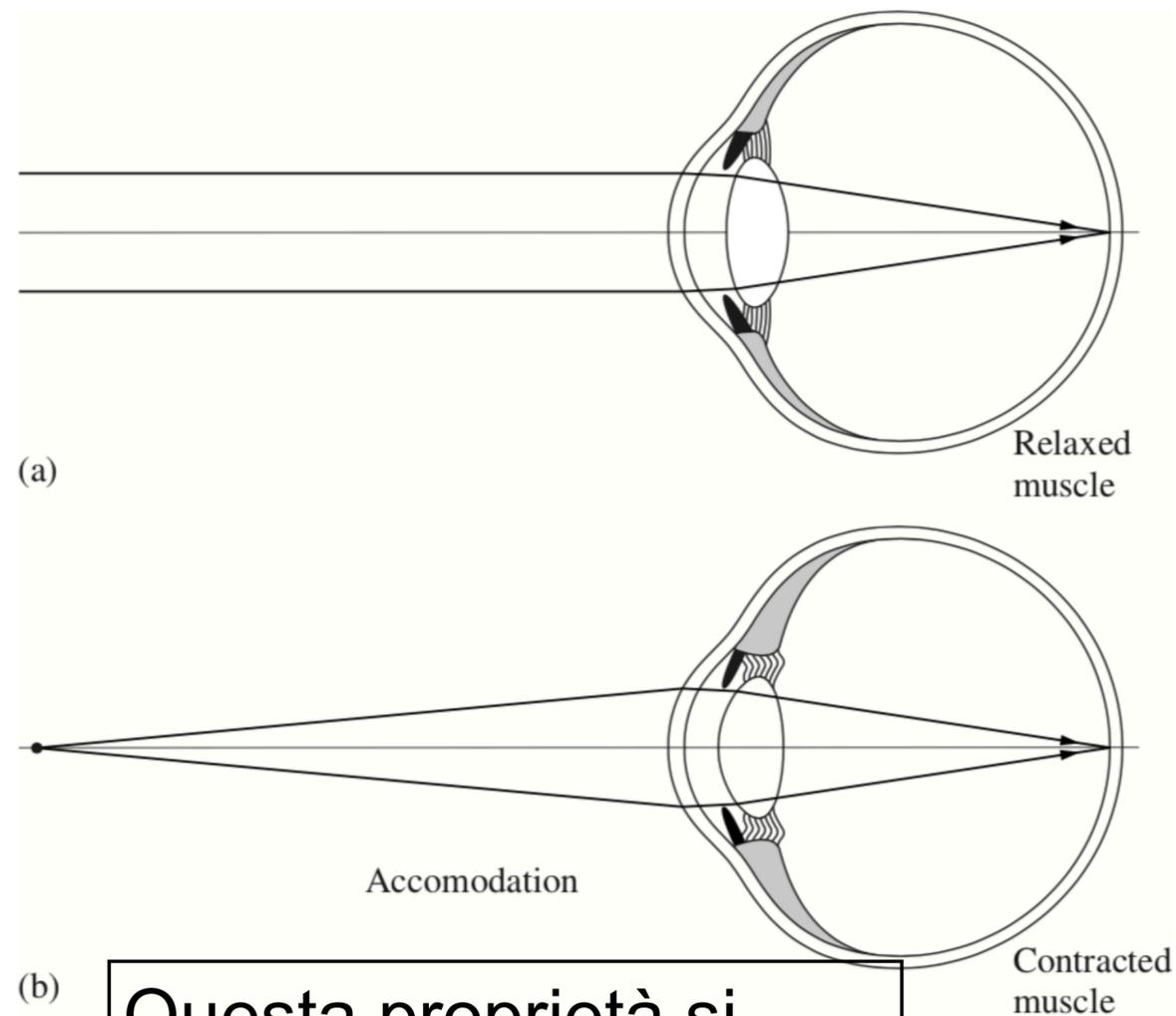
$$1/s_i = 1/f$$

$$s_i = f$$

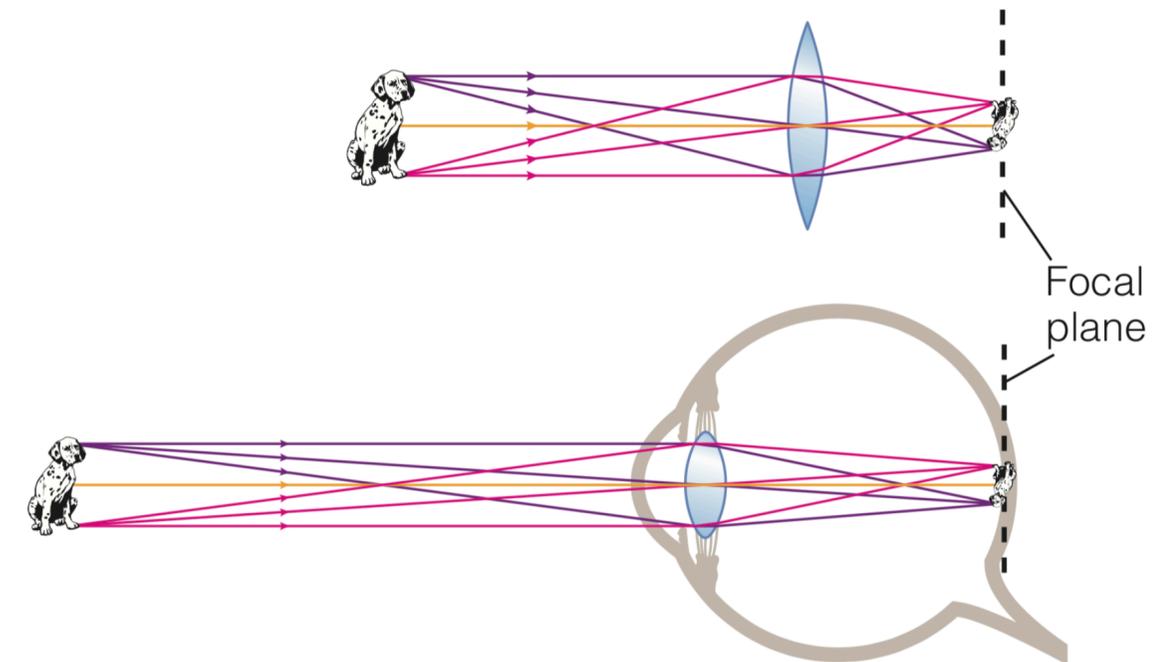
Le stelle si possono decisamente considerare all'infinito, quindi la loro immagine si forma ad una distanza  $f$  dall'obiettivo

# l'occhio umano

Nell'occhio, la forma del cristallino si può modificare, in modo che l'immagine, anche di oggetti non all'infinito, si formi sempre alla stessa distanza dalla lente



Questa proprietà si chiama **aggiustamento**

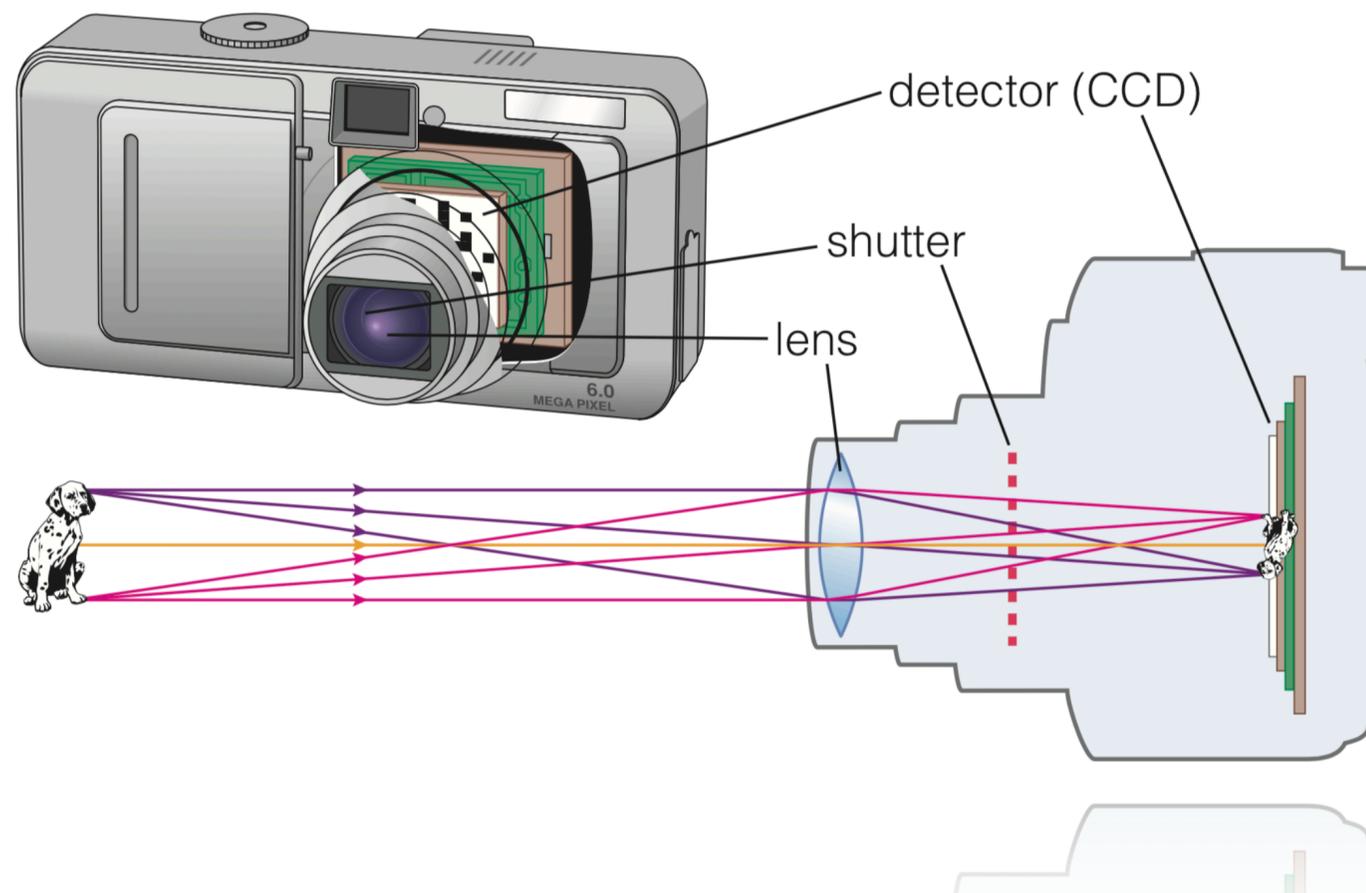


Parti diverse dell'oggetto si focalizzano in punti diversi del piano focale, formando un'immagine capovolta

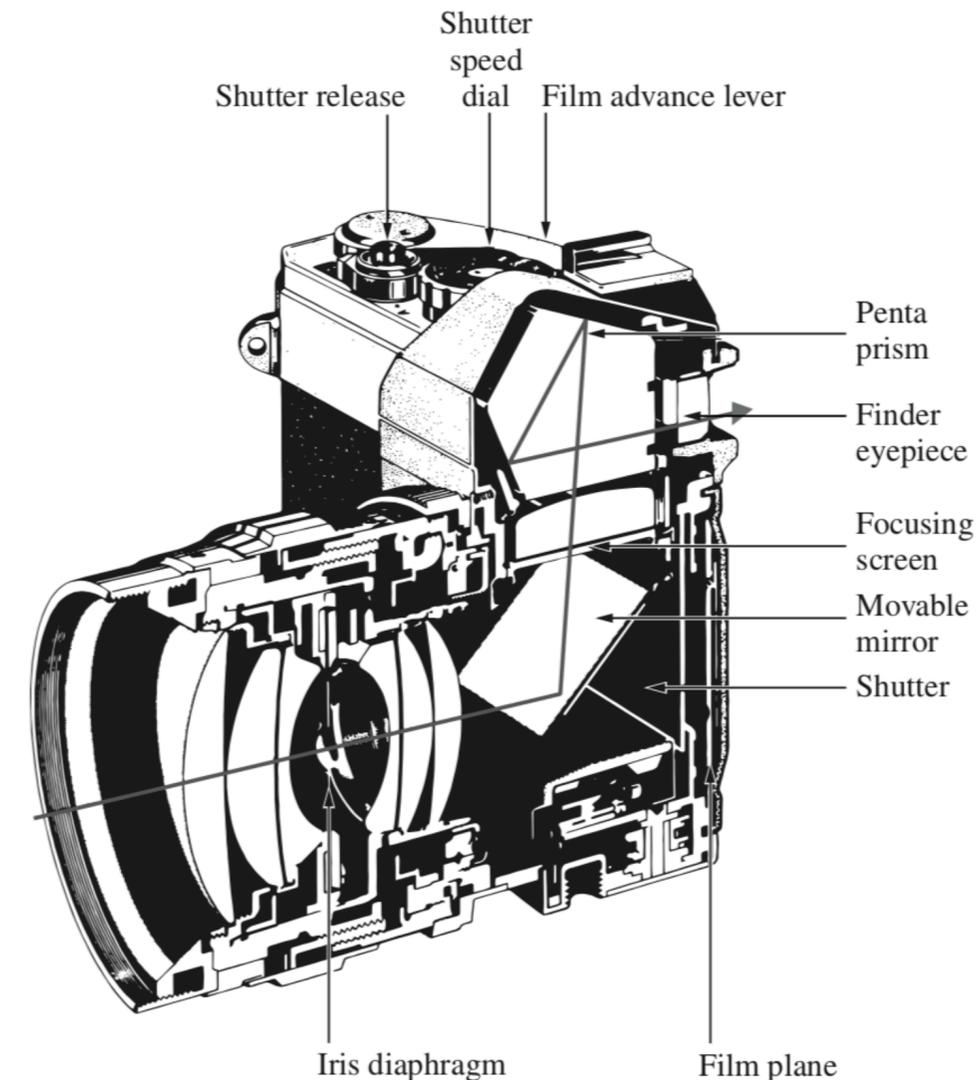


# macchina fotografica

## Camera mirrorless



## Camera *reflex*



La macchina fotografica funziona più o meno come un'occhio: il diaframma regola la quantità di luce (pupilla); l'obiettivo (cristallino) focalizza la luce sul piano focale, dove viene registrato dal CCD (una volta pellicola)



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Telescopi

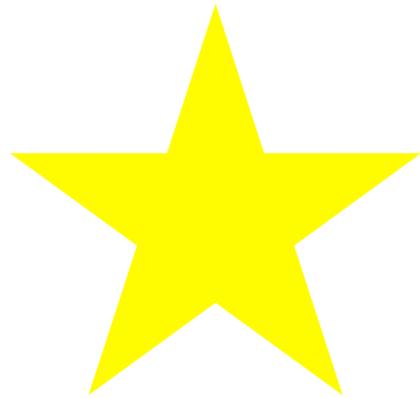


I telescopi sono occhi giganti che svolgono 2 importanti funzioni

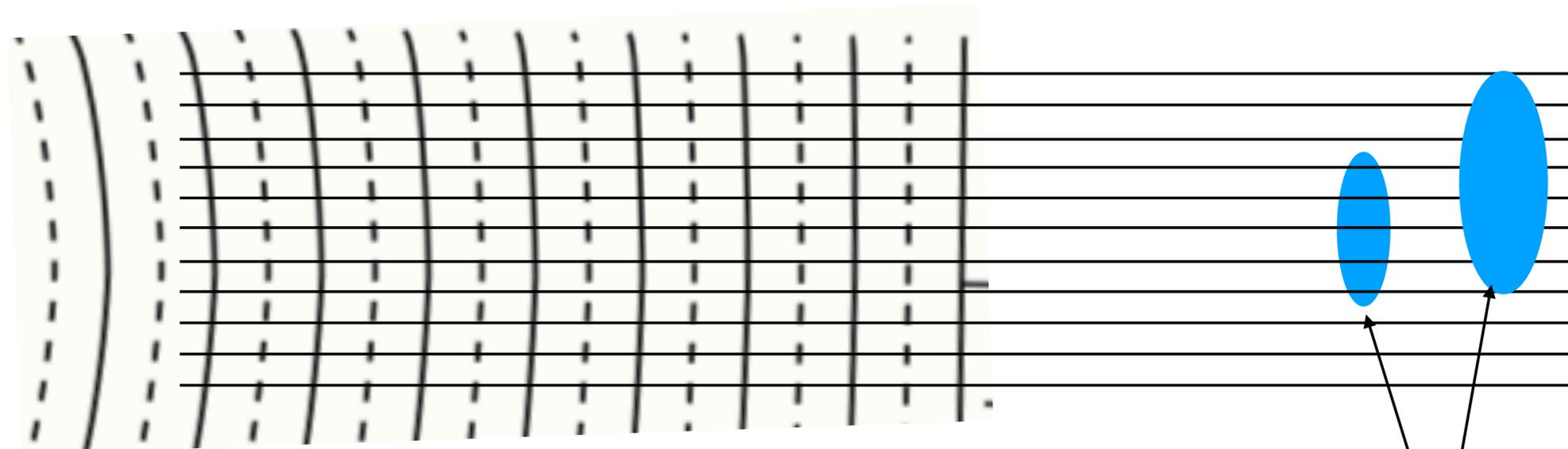


# Telescopi: collettori di luce

1. raccogliere luce



Stella distante

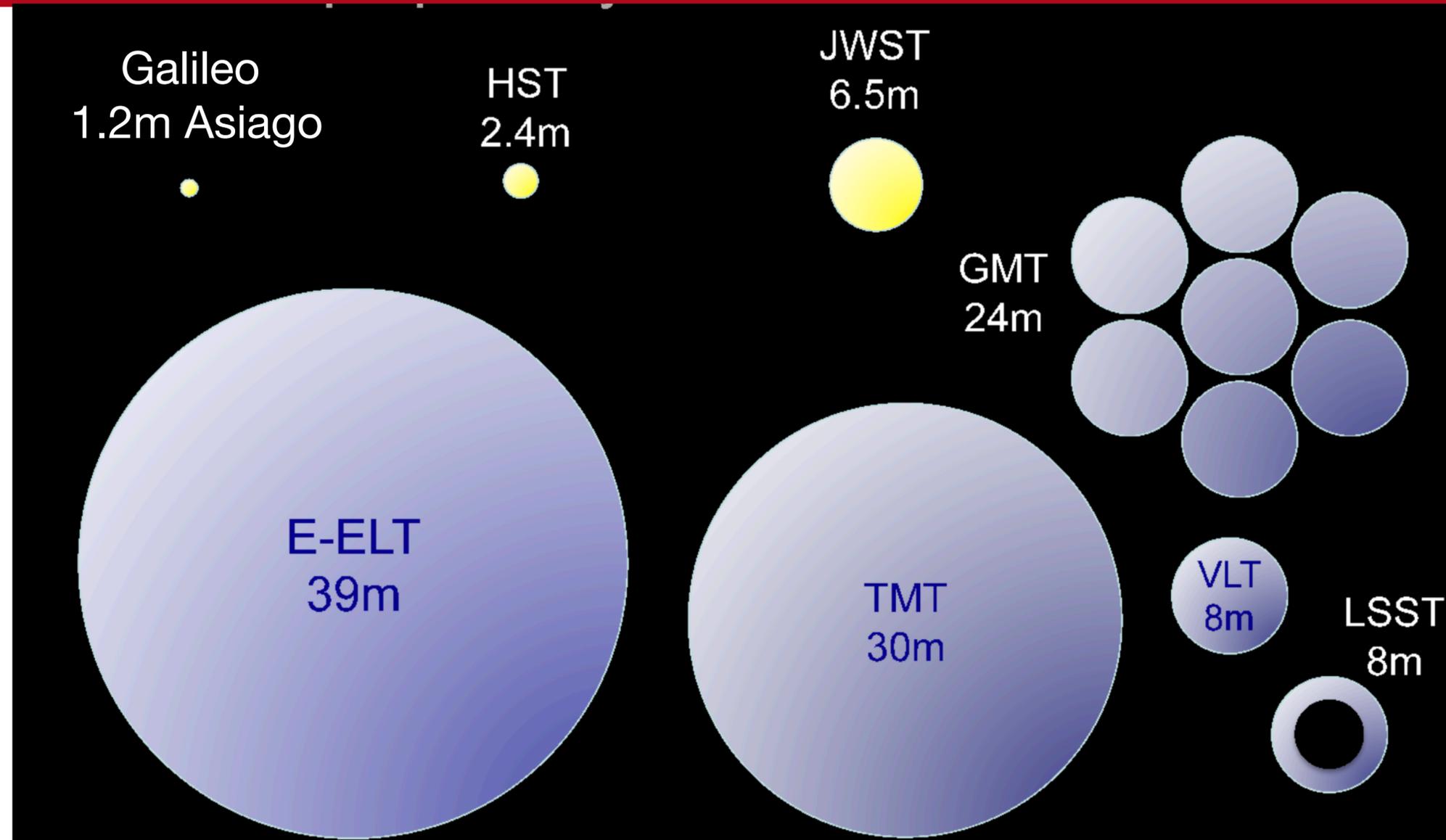


Luce: fascio di  
raggi paralleli

Più grande è l'apertura del  
telescopio (generalmente la  
dimensione dell'obiettivo) più  
luce (raggi) sarà catturata

**Questa è la funzione  
principale di un telescopio**

# Telescopi: collettori di luce



La luce raccolta è proporzionale all'area dello specchio del telescopio

Se Galileo 1.2m raccoglie 1...

HST raccoglie 4x

GMT-TMT raccolgono > 400x

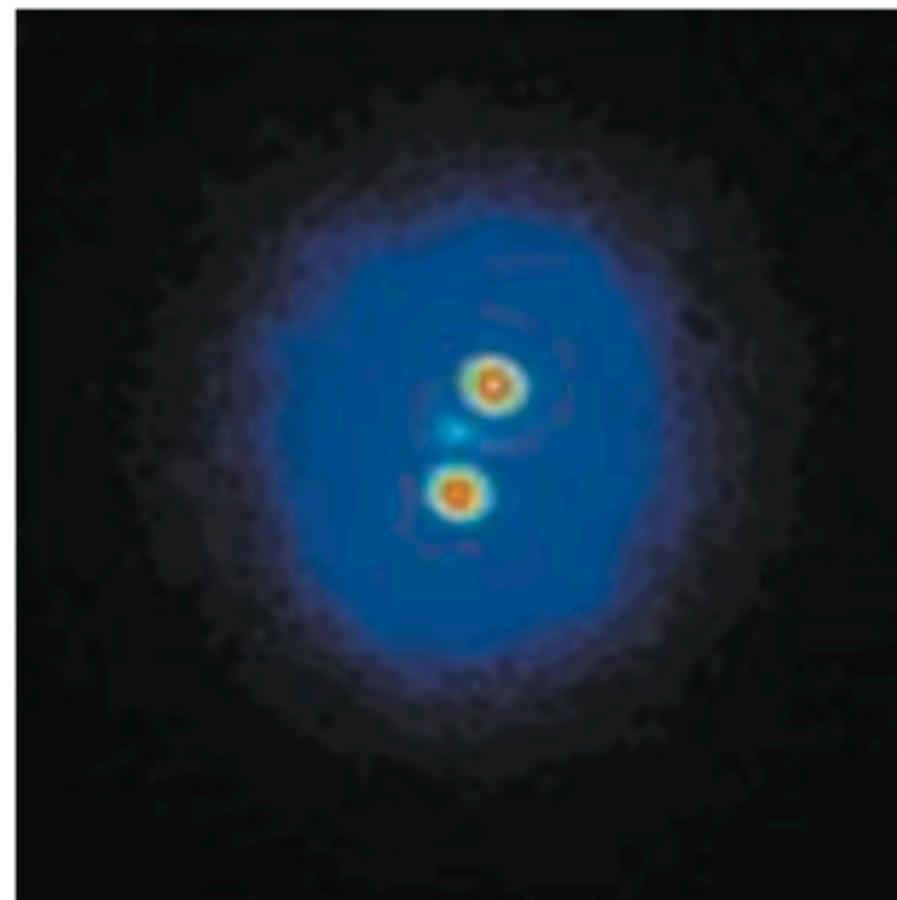
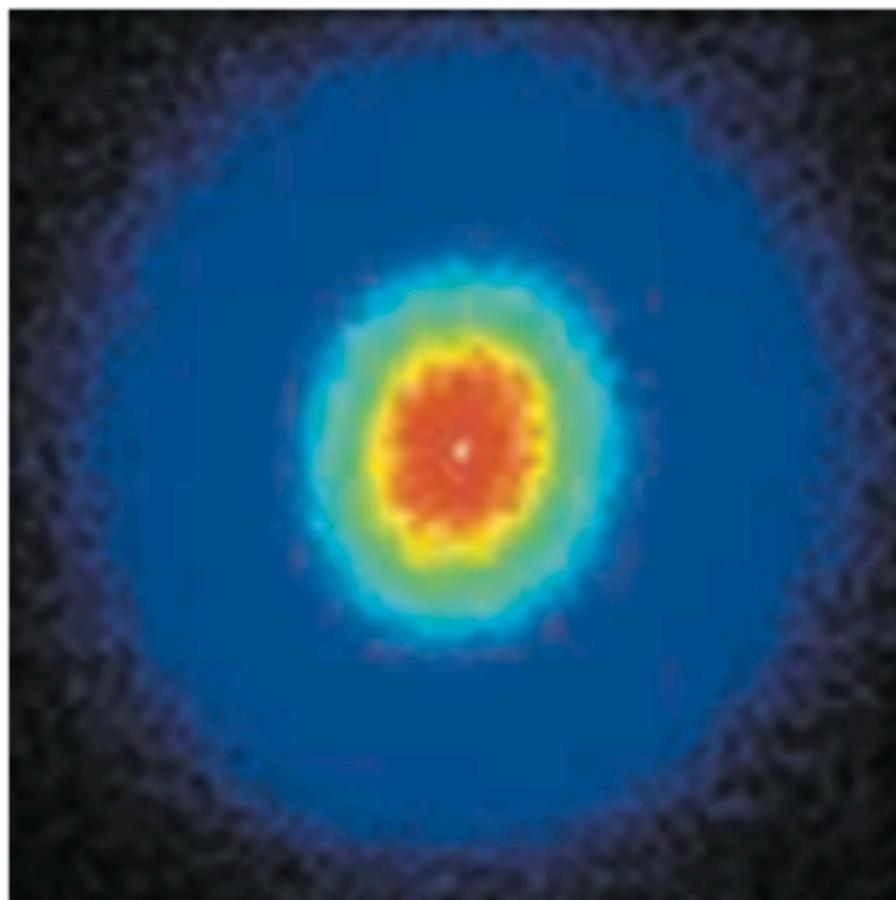
JWST raccoglie 30x

VLT raccoglie 45x

**E-ELT raccoglie 1000x!!!**

# Telescopi: risoluzione angolare

2. migliorare la risoluzione angolare delle osservazioni (risoluzione angolare: più piccola distanza angolare che riesco a distinguere)



$$R \sim \lambda / D$$

R = risoluzione angolare  
 $\lambda$  = lunghezza d'onda luce  
D = diametro telescopio

Stessa osservazione compiuta con telescopi di diversa; sono 2 stelle separate da 0.28"; a sn la risoluzione è circa 0.5-0.6" e le stelle non si distinguono

# Telescopi ottici: rifrattori



1m Yerkes telescope, il più grande telescopio a lenti del mondo



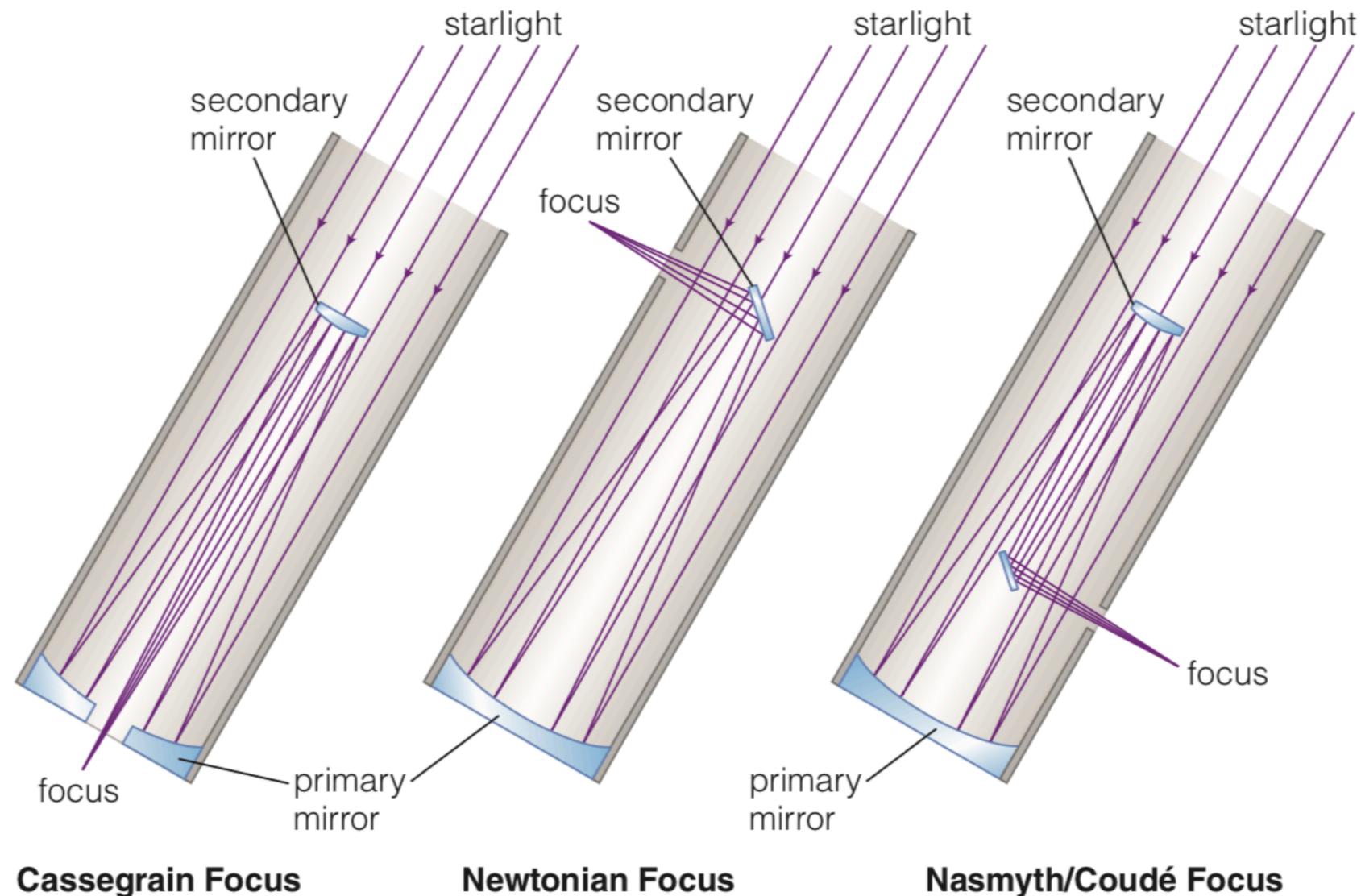
## Vantaggi:

- allineamento ottico più facile
- le ottiche sono al riparo dentro il tubo del telescopio (no effetti dovuti a temperatura, passaggio d'aria: immagini più definite e stabili)
- poca manutenzione

## Svantaggi:

- lenti grandi sono pesanti
- aberrazione cromatica (diverse lunghezze d'onda focalizzano in punti diversi)
- il fuoco può essere solo posteriore alla lente
- tubi molto lunghi per avere distanze focali lunghe
- di conseguenza cupole grandi

# Telescopi ottici: riflettori



## Diversi tipi di riflettori, con piani focali posti in diversi punti

- Newton: comodo per telescopi amatoriali, il fuoco è in alto
- Cassegrain/Nasmyth-Coudé: con uno specchio mobile si può spostare il fuoco verso diversi strumenti

## Vantaggi:

- no aberrazione cromatica
- a parità di apertura e focale, più compatti dei rifrattori
- lenti sottili sono più leggere e facili da costruire

## Svantaggi:

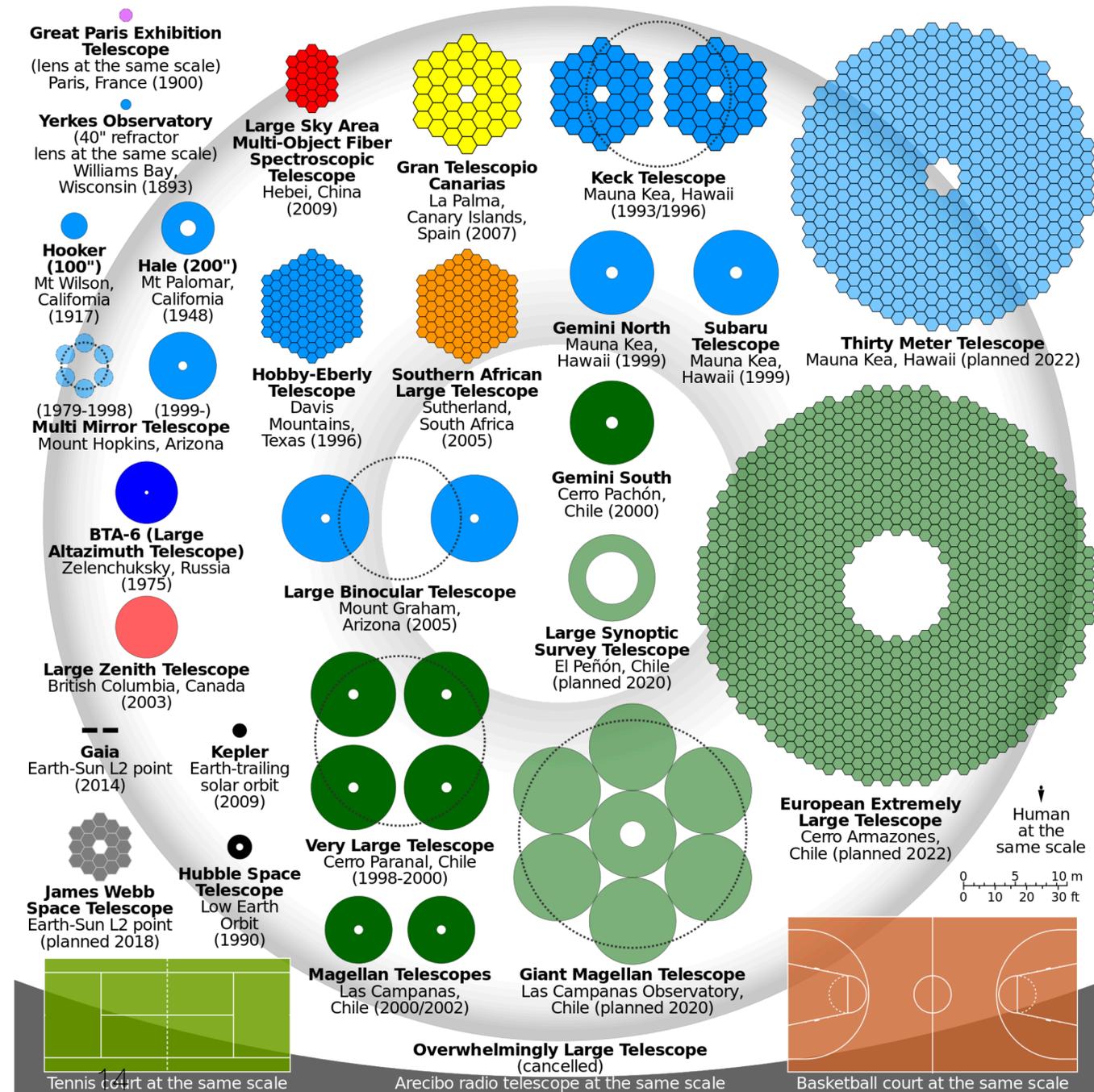
- in generale sono aperti: gli specchi sono esposti all'ambiente e si deteriorano
- le ottiche non sono riparate da tubi, quindi si creano correnti d'aria che possono alterare la qualità delle immagini

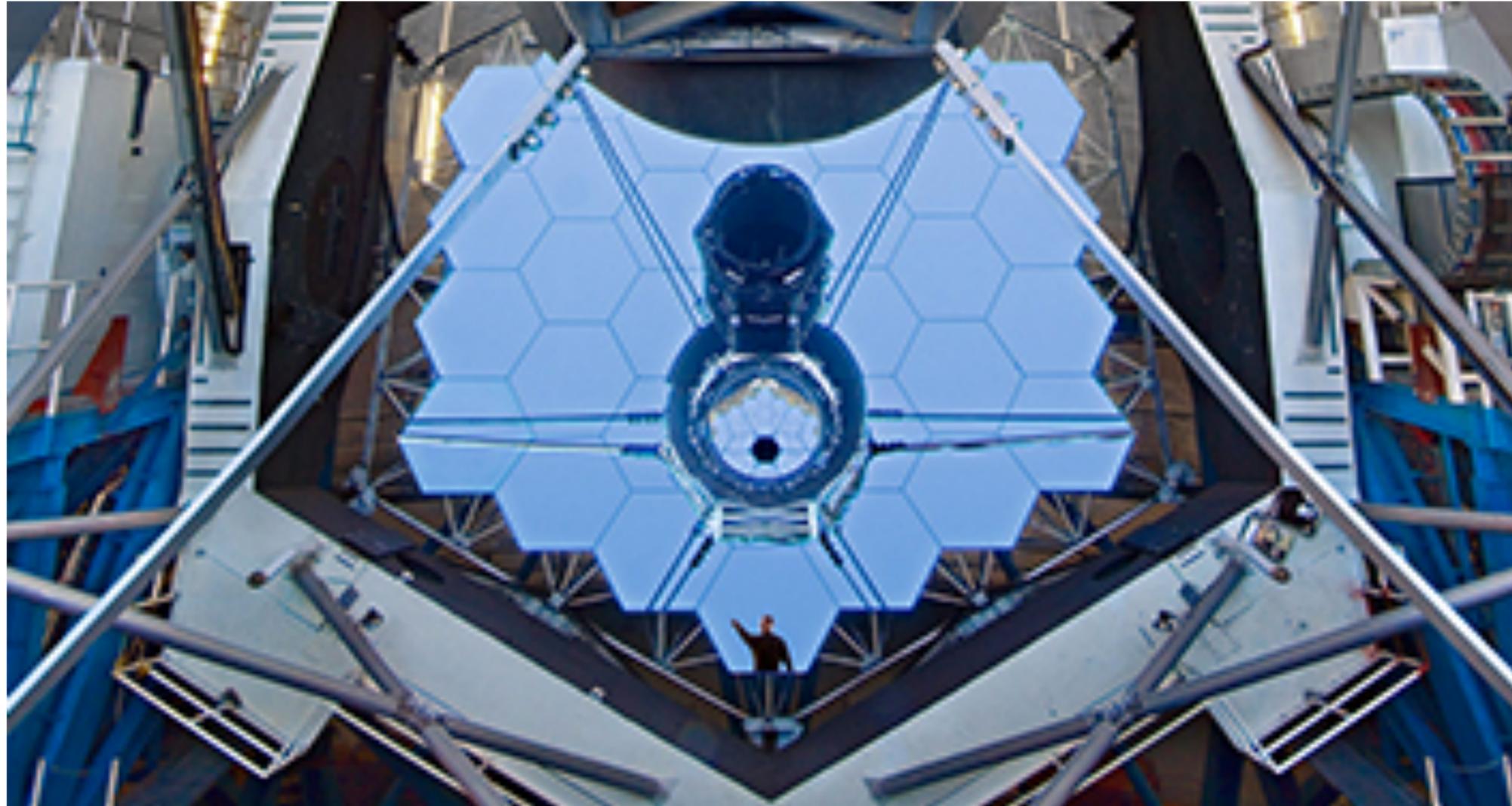


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Io e Magellan Baade, telescopio di 6.5m a Las Campanas, Chile

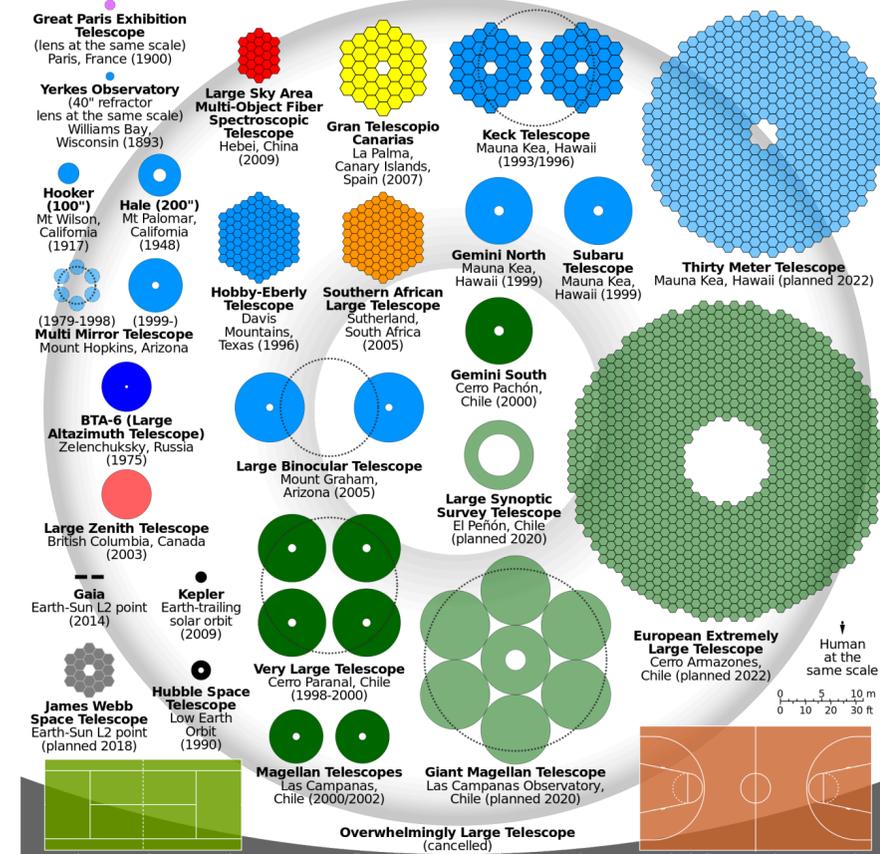




## Tutti i telescopi > 4m hanno di fatto specchi primari segmentati

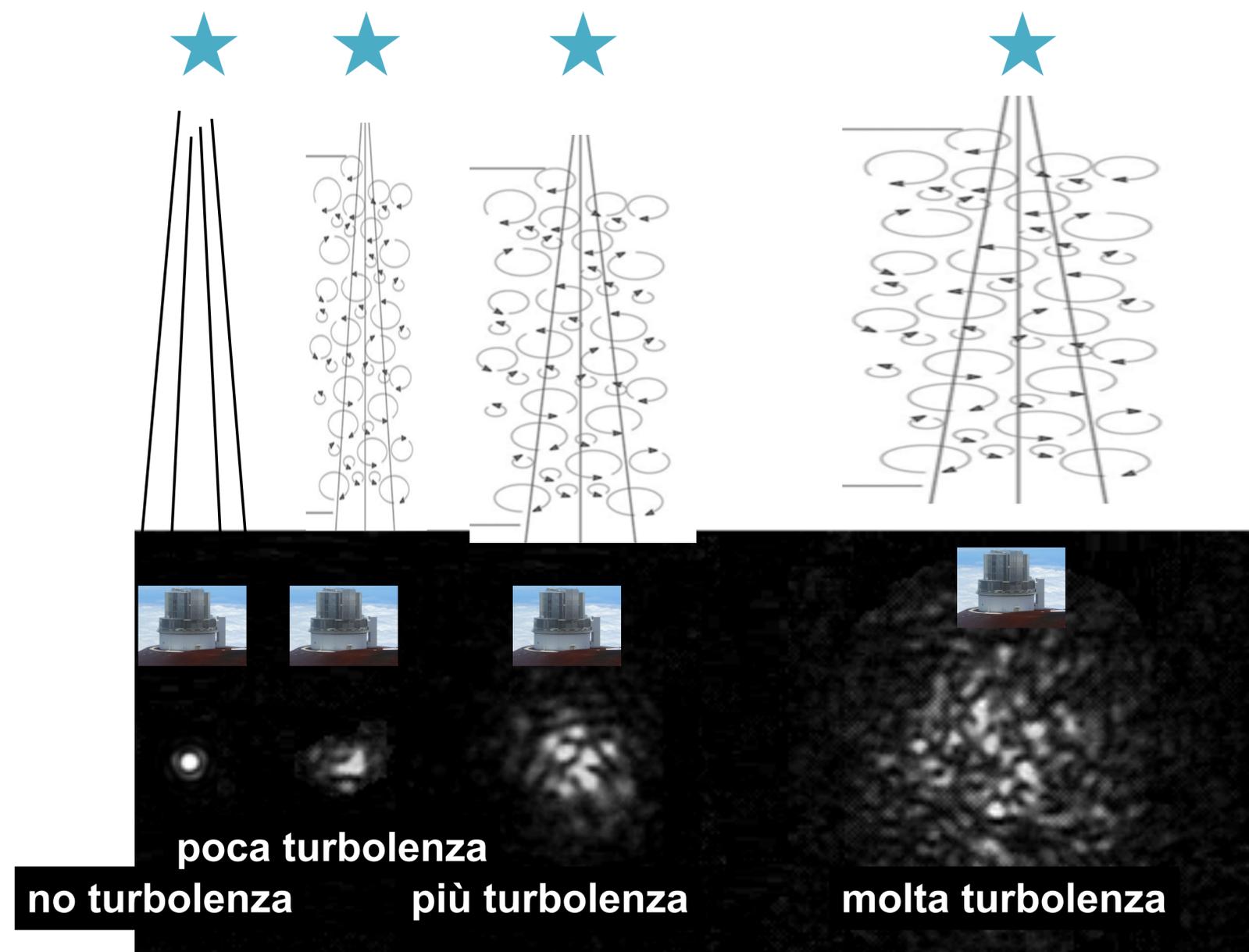
- più facili da costruire
- più leggeri
- “aggiustabili” in tempo reale

**Keck 10m telescope: array di 36 esagoni**



# Risoluzione spaziale: degradazione per atmosfera

1. La risoluzione intrinseca di un telescopio dipende dalla sua dimensione:  $R \sim \lambda/D$



2. Un telescopio trasforma un oggetto puntiforme (stella) nella trasformata di Fourier dell'apertura; una stella diventa una PSF (point spread function)

3. La turbolenza atmosferica “sposta” la PSF in maniera casuale in esposizioni lunghe, come quelle che si usano in astronomia

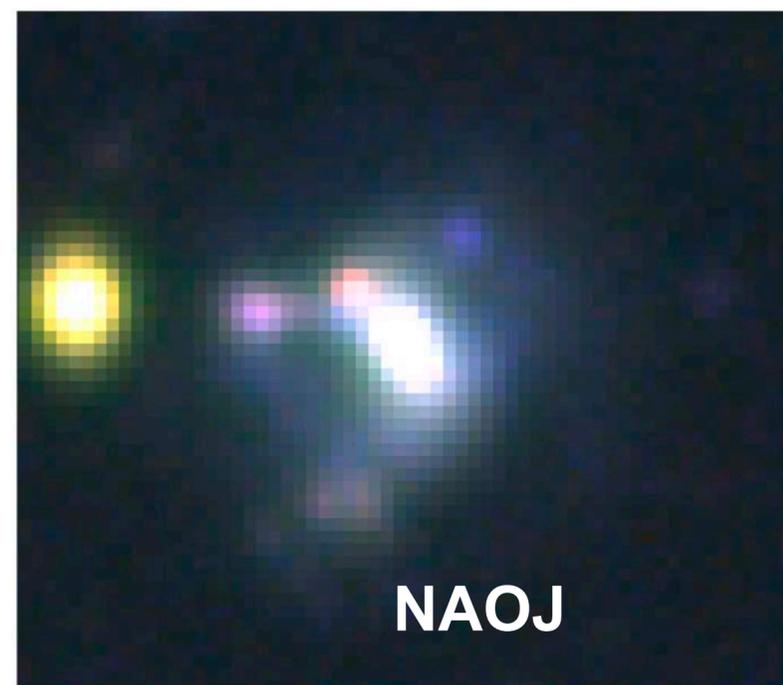
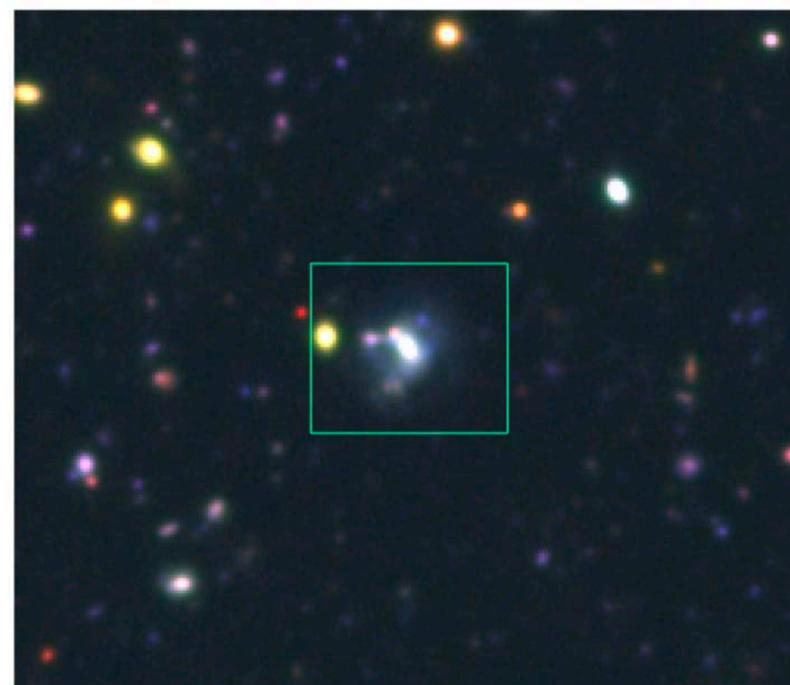
**L'atmosfera degrada le immagini astronomiche**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Risoluzione spaziale: al suolo vs spazio

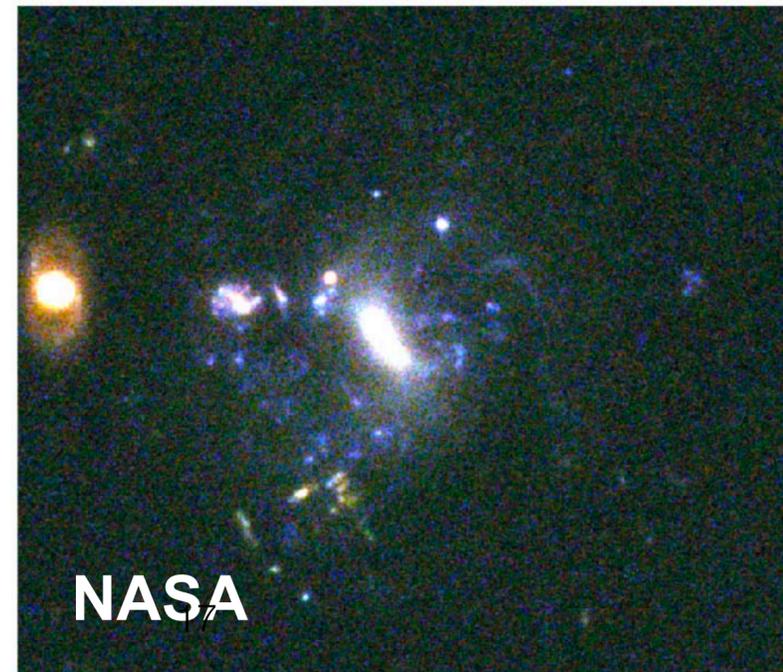
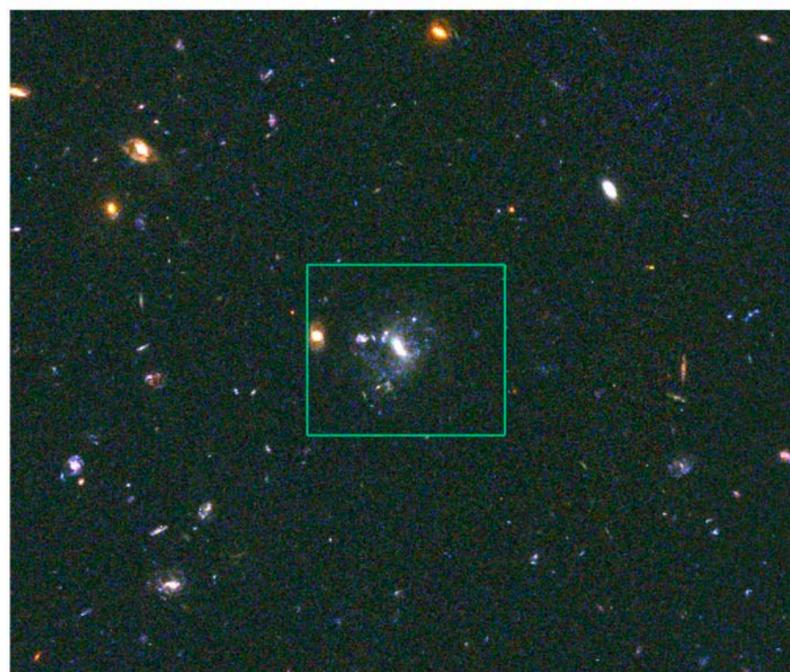
Ground: Subaru (8m)



Come risolvo? Metto un  
telescopio in orbita:  
Hubble Space Telescope

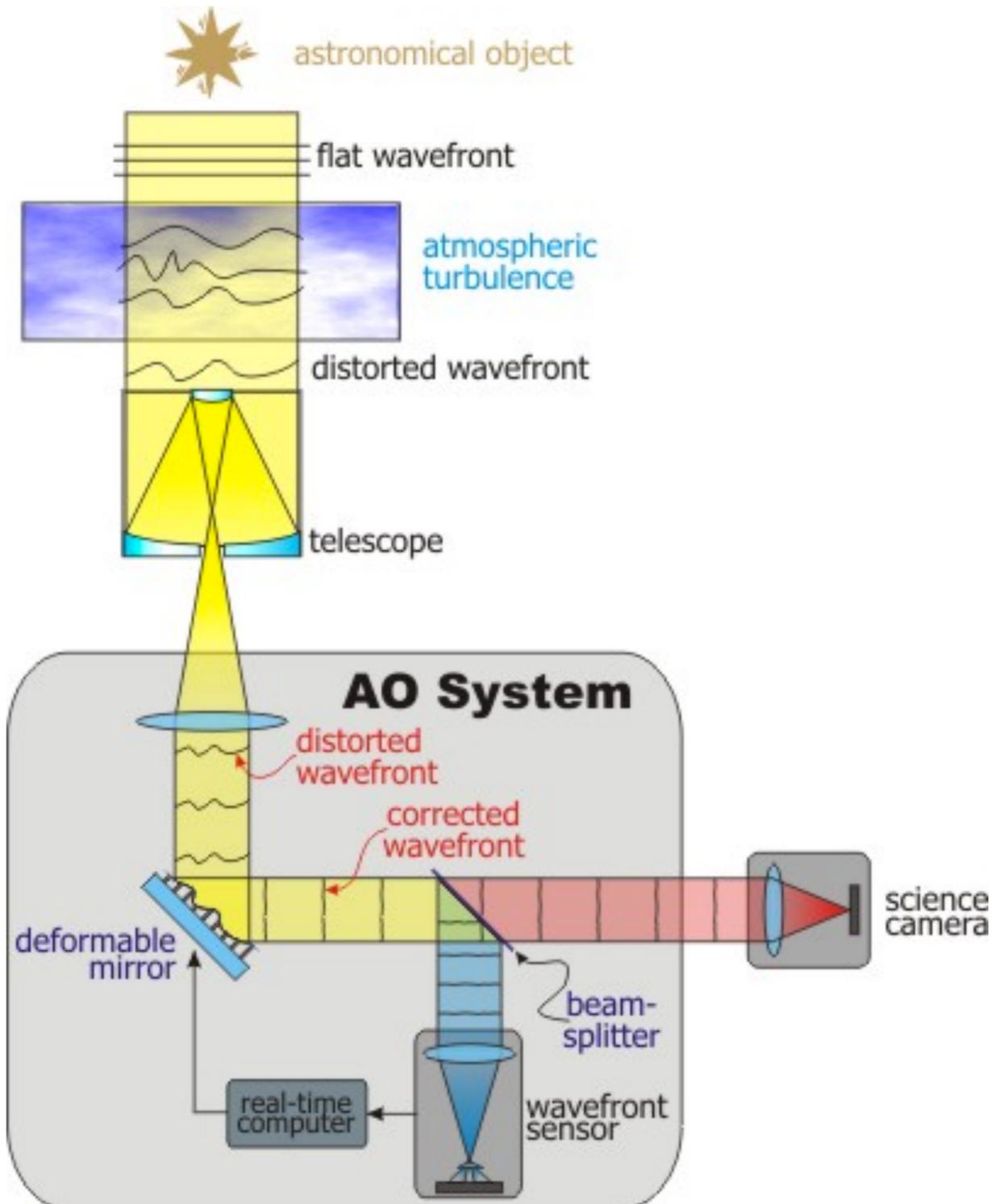
Nonostante sia più  
piccolo dei telescopi al  
suolo, ha una migliore  
risoluzione spaziale

Space: *HST* (2.4m)



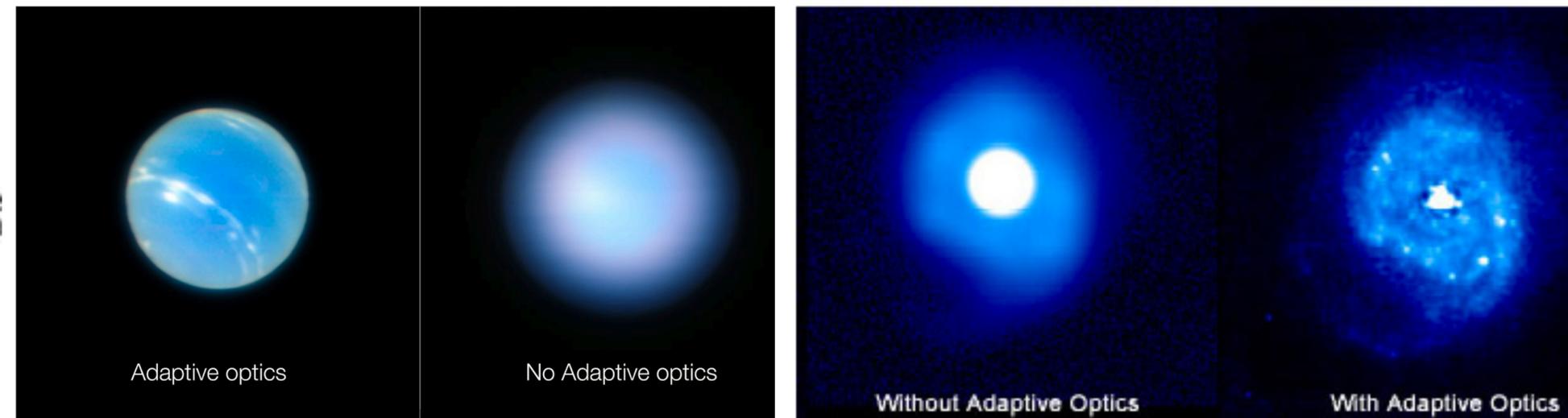
Le immagini sono più  
definite e permettono di  
studiare la morfologia delle  
galassie più lontane

# Ottica adattativa: correggere la deformazione dovuta all'atmosfera



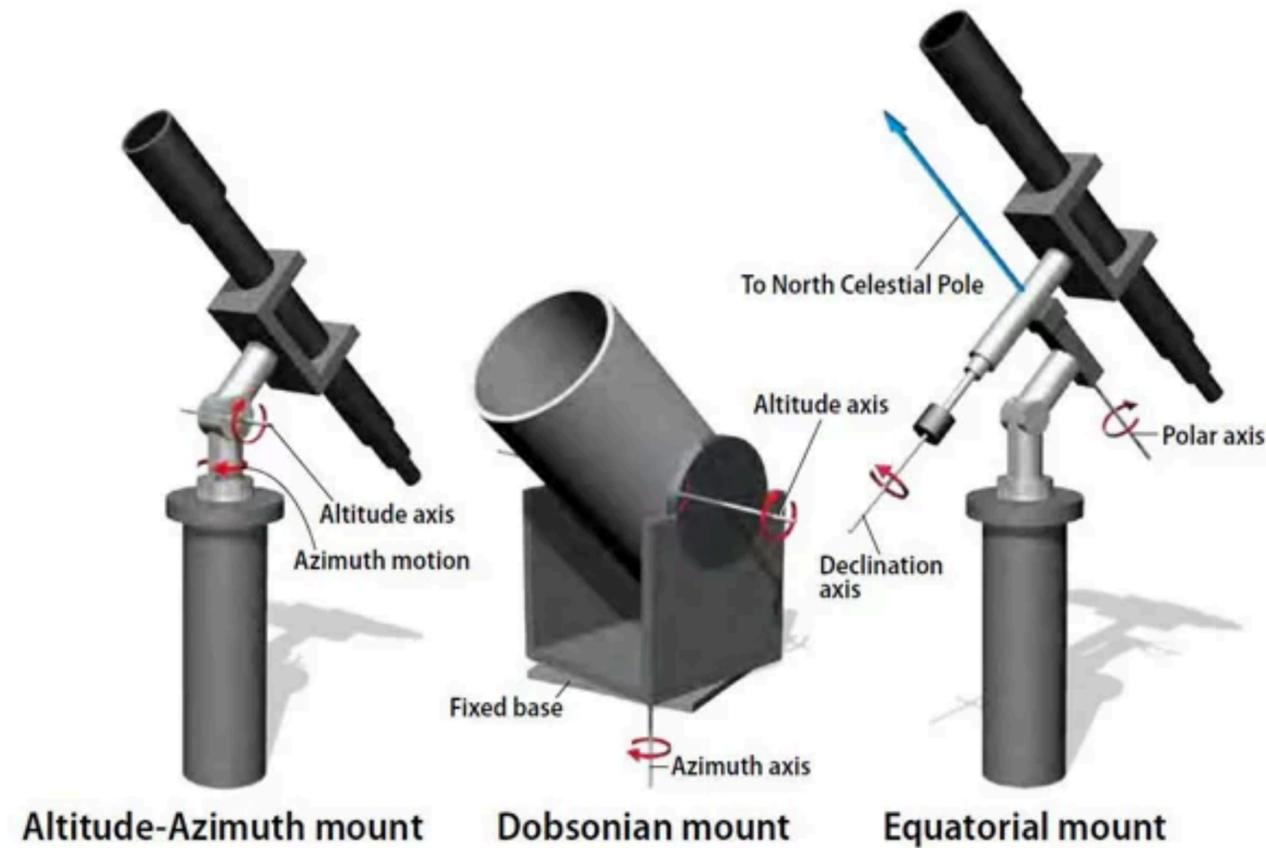
## L'ottica adattativa corregge in tempo reale la forma del fronte d'onda

- Un oggetto brillante (stella) viene usato per misurare le distorsioni dovute all'atmosfera
- Se l'atmosfera non ci fosse la stella starebbe ferma e il fronte d'onda sarebbe piatto
- In tempo reale si deforma lo specchio primario per “raddrizzare” il fronte d'onda



# Telescopi: montature

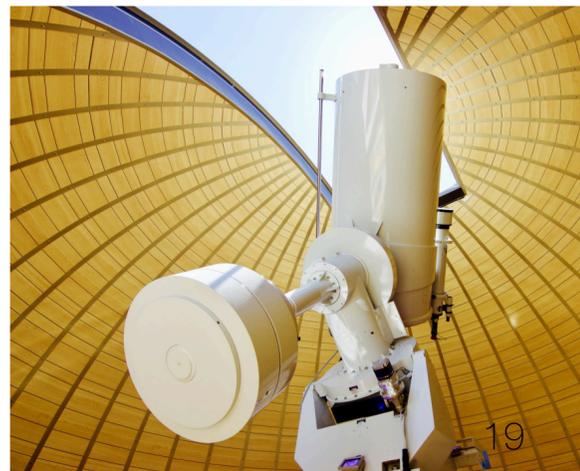
## Montature commerciali più comuni



Ne esistono vari tipi, con vantaggi e svantaggi

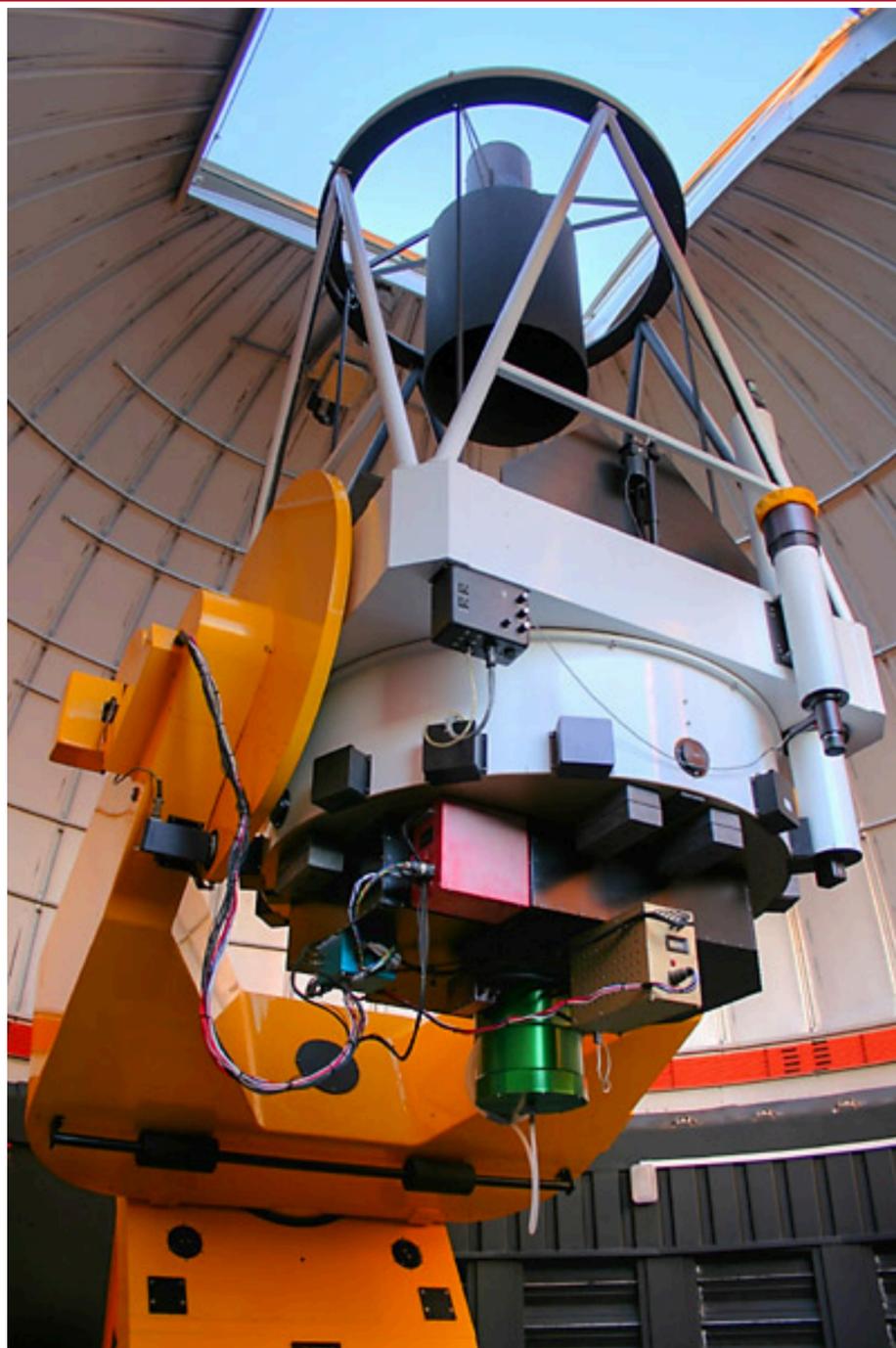
La montatura è la struttura meccanica che sostiene il telescopio, permettendogli di muoversi e raggiungere tutti i punti della volta celeste

Alcuni telescopi professionali





# Montatura equatoriale



Montatura a forcella  
(telescopio Osservatorio di Varsavia)



Montatura fuori asse  
Telescopio Osservatorio Merate

## Vantaggi

- Semplicità di puntamento e inseguimento

Una montatura equatoriale è una montatura che consente con un unico movimento, manuale o motorizzato, di "inseguire" il moto apparente di un astro nel cielo, in realtà ruotando in sincrono col moto di rotazione terrestre. Nella sostanza, il telescopio è allineato sul piano equatoriale; con un movimento angolare in altezza si raggiunge l'"orbita" della stella nel cielo; la rotazione intorno all'altro asse "insegue" il moto notturno della stella

## Svantaggi

- Masse fuori asse
- Sollecitazioni su assi
- Grandi ingombri



# Montatura alt-azimutale



Telescopio Nazionale Galileo,  
Isole Canarie



Very Large Telescope, VLT, Cile

Una montatura alt-azimutale è un sistema meccanico che sostiene un telescopio e permette di puntarlo seguendo movimenti paralleli all'orizzonte (azimut) o perpendicolari ad esso (altezza). È in genere realizzata come una montatura a forcella.

L'”inseguimento” degli oggetti celesti avviene tramite movimenti di entrambi gli assi; il campo di vista ruota durante osservazioni lunghe

## Vantaggi

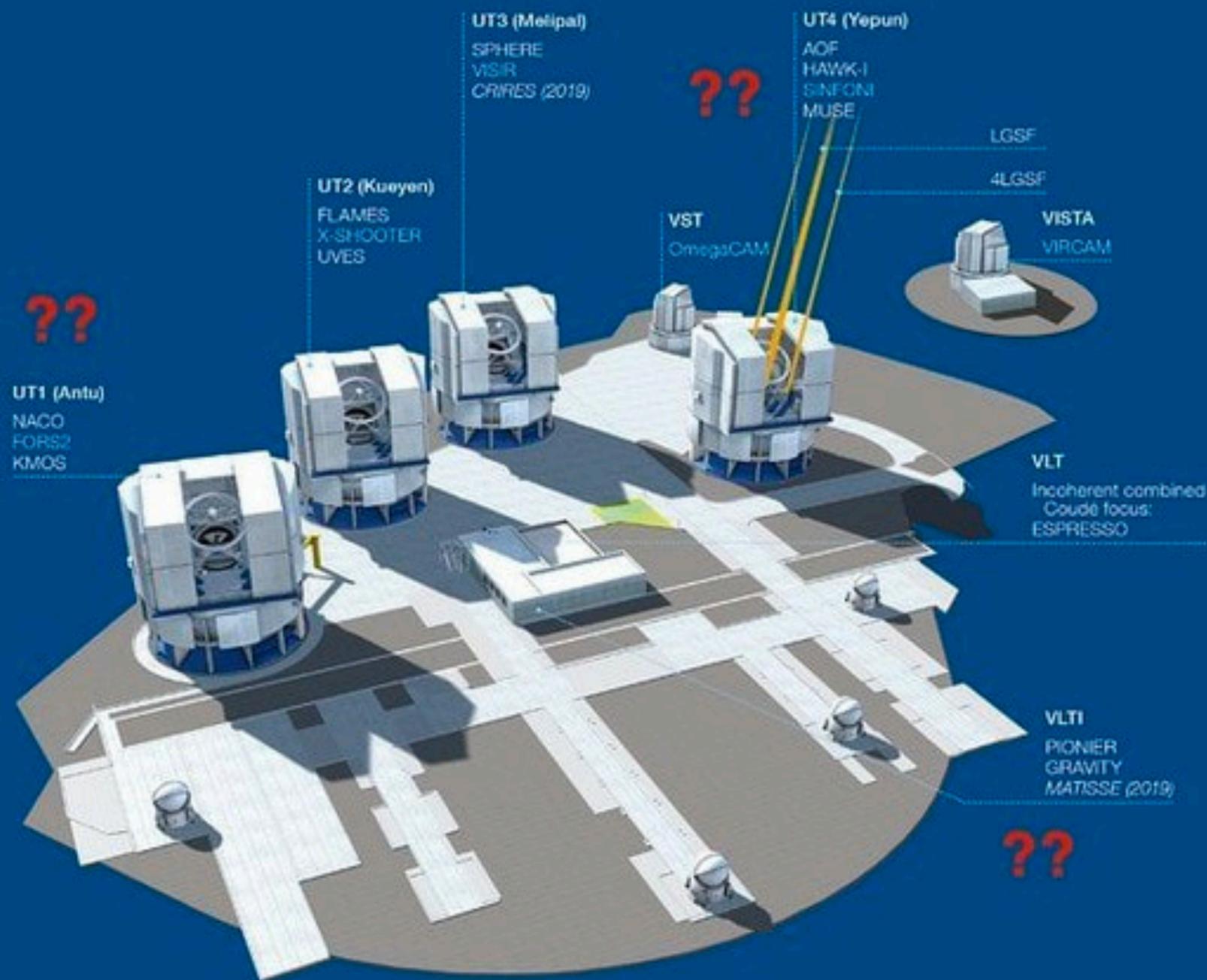
- Semplicità e universalità di costruzione
- Compattezza
- Gli strumenti possono essere collocati ai fuochi Nasmyth, in posizioni fisse

## Svantaggi

- Doppio movimento per l'inseguimento
- Rotazione di campo



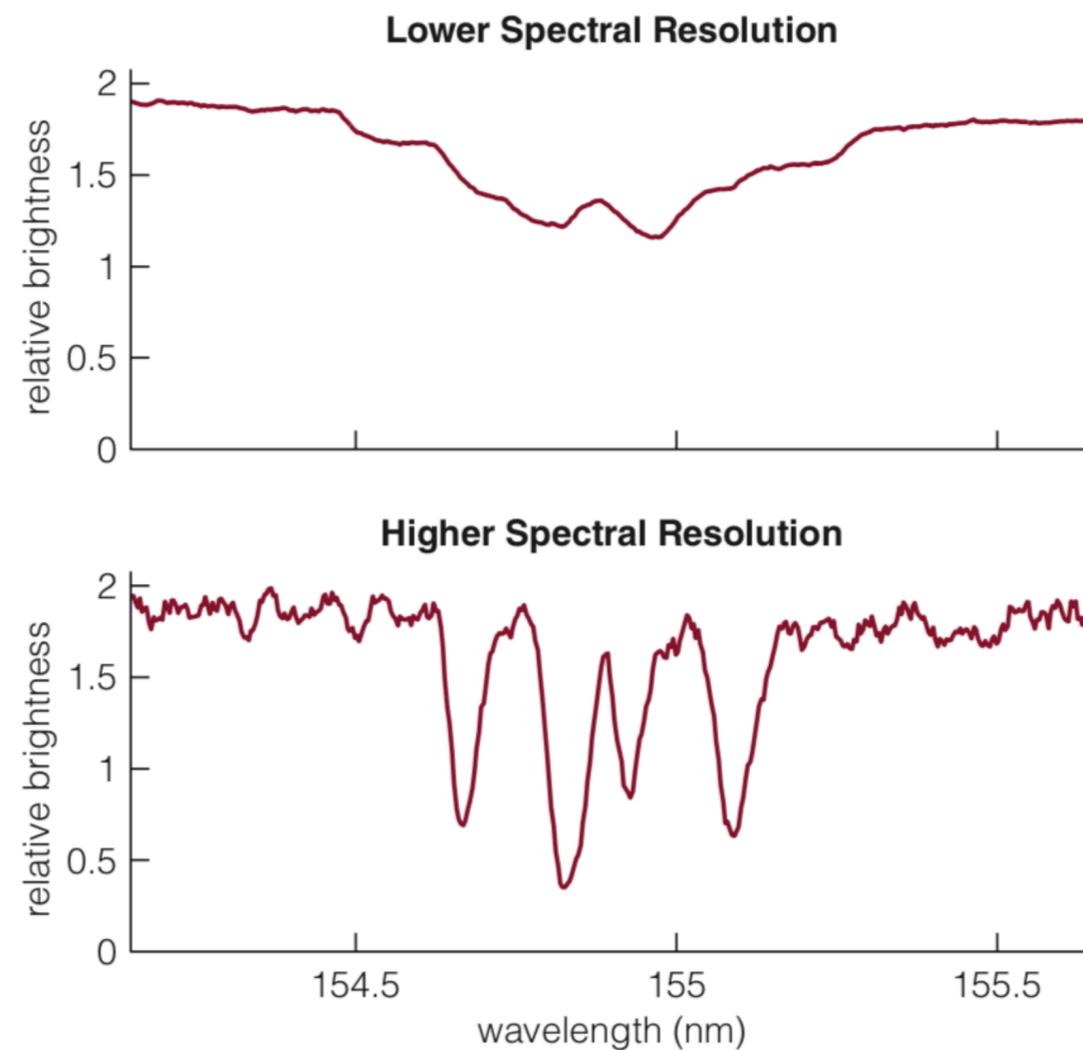
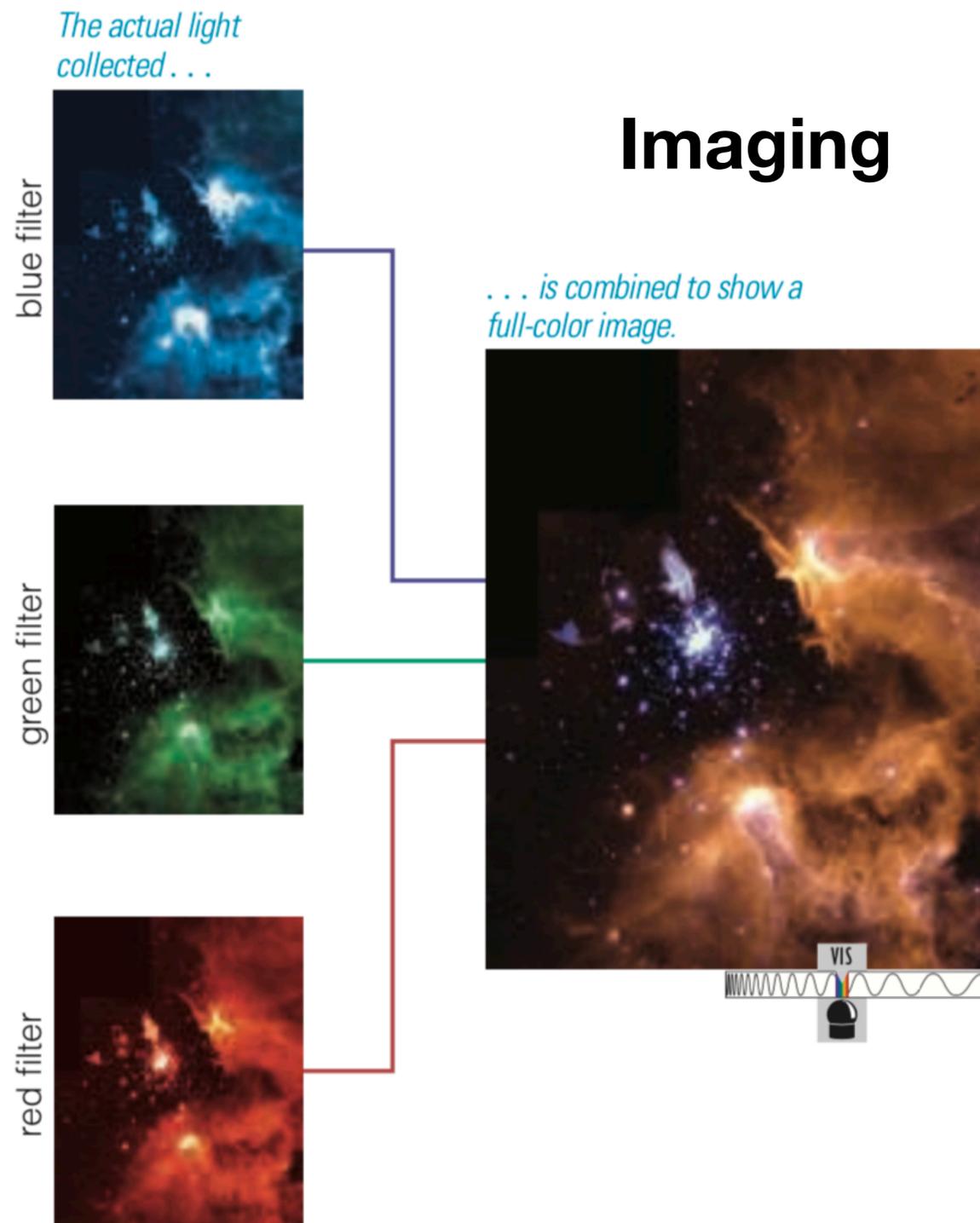
- Strumentazione
- Fotometria
- Spettroscopia
- Osservatori



## ESO/VLT

La suite più completa  
di strumentazione  
astronomica al mondo

# Imaging

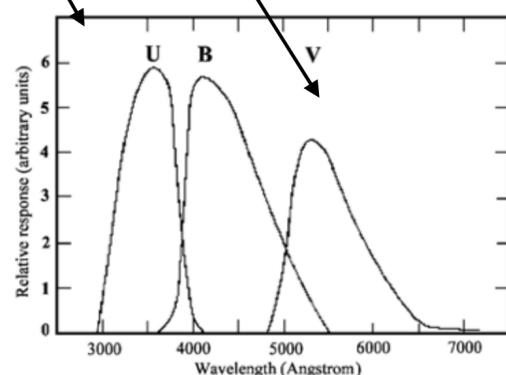


# Spectroscopy

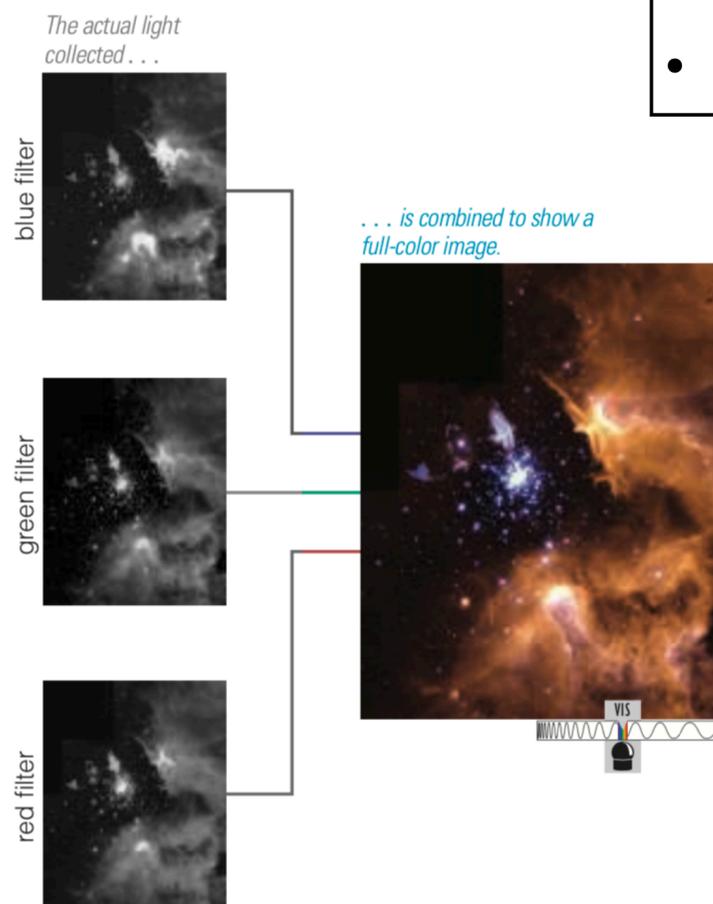
# Imaging



La luce viene convogliata dal telescopio sul piano focale, a monte del quale è posto un filtro che permette solo alla luce entro un intervallo di  $\lambda$  di passare.



Ripetendo l'operazione, ad esempio, per 3 filtri, avrò 3 immagini in BW, una per ciascun filtro



## Vantaggi

- integrando su un ampio intervallo di  $\lambda$  posso vedere (relativamente) facilmente anche oggetti deboli
- ottengo misure per tutte le sorgenti in un'immagine a grande campo
- facilità di costruzione

## Svantaggi

- “butto via” un sacco di fotoni (quelli fuori dal filtro)
- poca (nessuna) risoluzione spettrale

Solo combinando a *posteriori* le immagini nei 3 filtri posso ottenere una immagine in *falsi colori*



# La magnitudine astronomica

Diamo ora una definizione operativa più precisa di magnitudine apparente, tenendo conto della **distribuzione spettrale di energia**  $F(\lambda)$  della stella (cioè il flusso per unità di area ricevente), **la riflessività dell'ottica  $R$** , **l'efficienza quantica del ccd  $QE$** , **la curva di trasmissione del filtro e gli eventuali obiettivi  $S$** :

$$m(\lambda_c) = m_0(\lambda_c) - 2.5 \log_{10} \left( \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \times R^n(\lambda) \times QE(\lambda) \times S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^n(\lambda) \times QE(\lambda) \times S(\lambda) d\lambda} \right)$$

dove  $A$  è l'area del telescopio,  $n$  il numero di specchi riflettenti e  $\lambda_c$  una lunghezza d'onda appropriata all'interno dell'intervallo  $(\lambda_1, \lambda_2)$ , generalmente circa coincidente con la lunghezza d'onda centrale, ma il cui valore esatto dipende dalle caratteristiche spettrali della stella (o anche la sua temperatura).

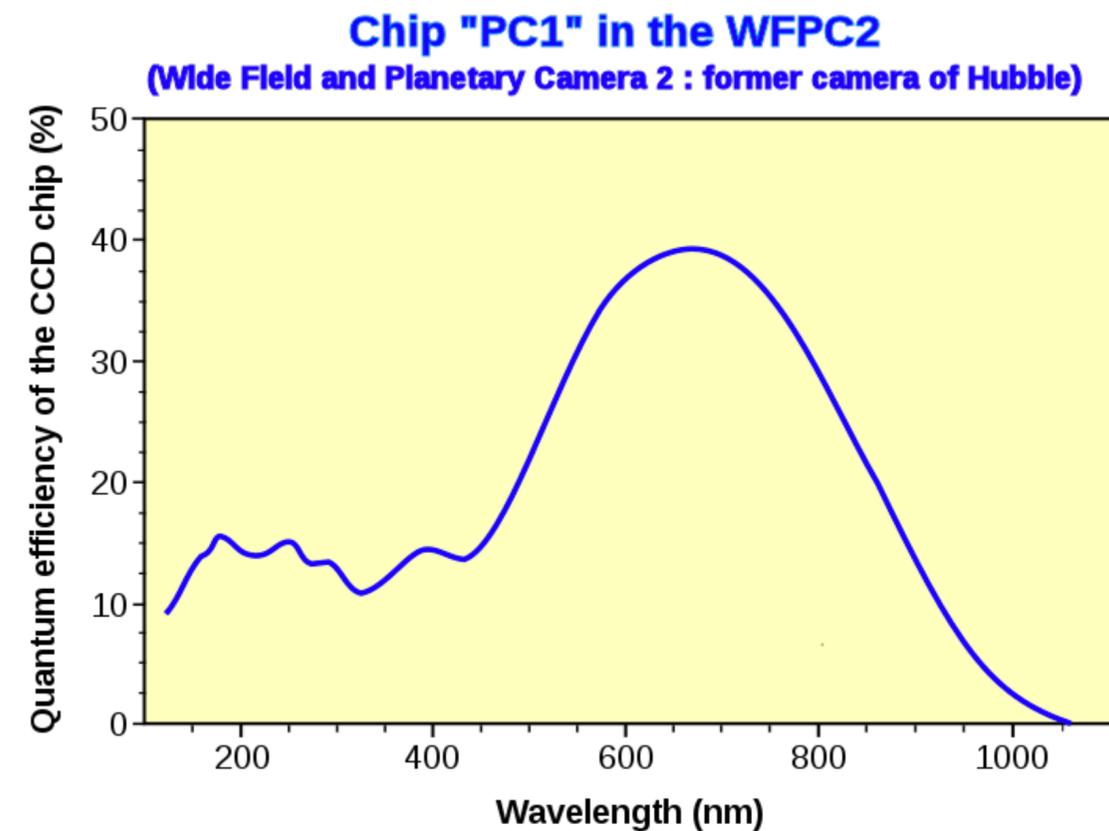
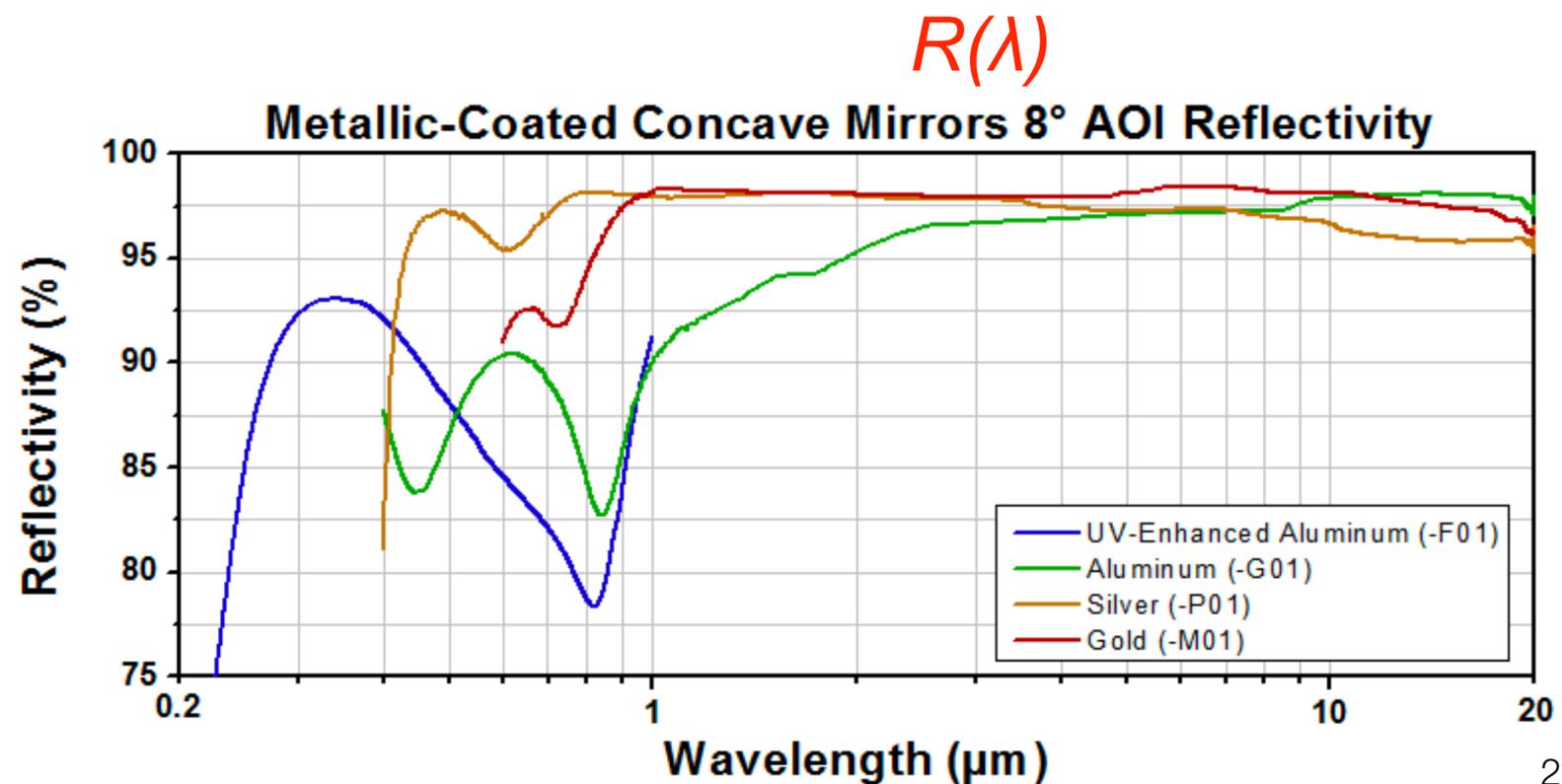


# La magnitudine astronomica

$$m(\lambda_c) = m_0(\lambda_c) - 2.5 \log_{10} \left( \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \times R^n(\lambda) \times QE(\lambda) \times S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^n(\lambda) \times QE(\lambda) \times S(\lambda) d\lambda} \right)$$

Riflettività di alcuni materiali vs  $\lambda$ :  
di solito si usa l'alluminio

Risposta di un ccd vs  $\lambda$   
 $QE(\lambda)$

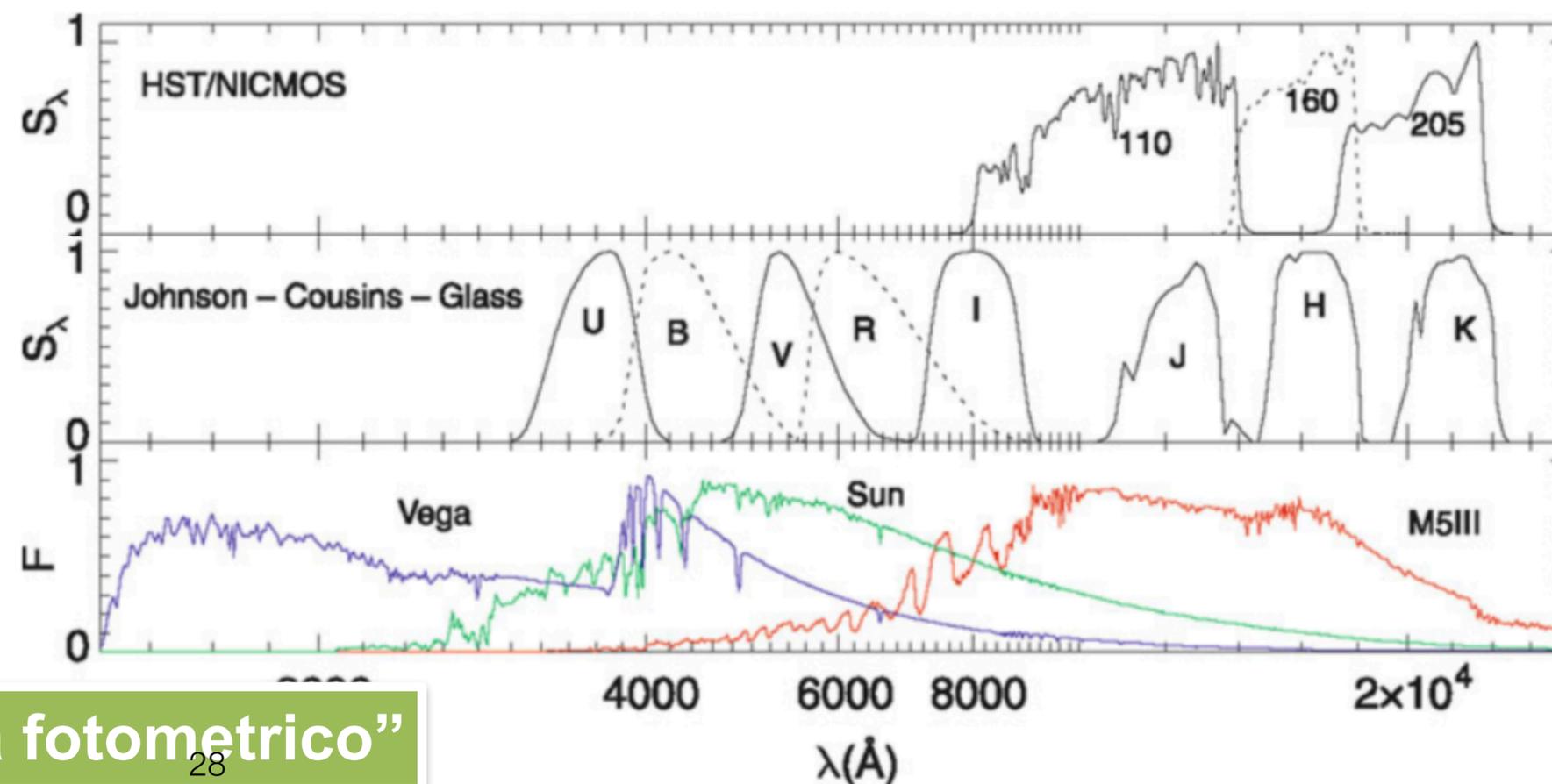


# La magnitudine astronomica

$$m(\lambda_c) = m_0(\lambda_c) - 2.5 \log_{10} \left( \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \times R^n(\lambda) \times QE(\lambda) \times S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R^n(\lambda) \times QE(\lambda) \times S(\lambda) d\lambda} \right)$$

Filtri  
fotometrici  $S(\lambda)$

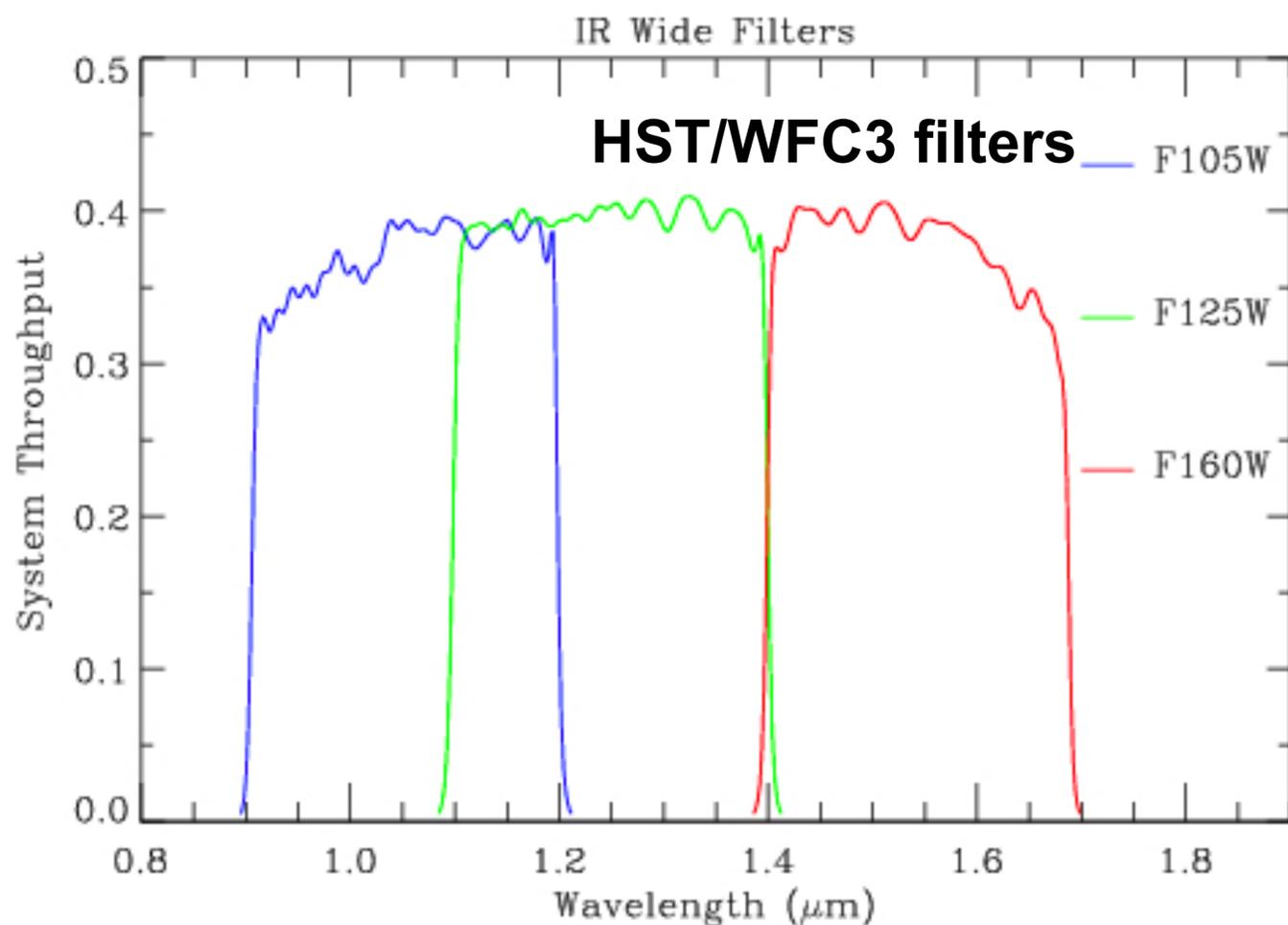
Distribuzione  
spettrale di energia  
di alcune stelle  $F(\lambda)$



Convoluzione della SED con il “sistema fotometrico”

# La magnitudine astronomica

$$m(\lambda_c) = m_0(\lambda_c) - 2.5 \log_{10} \left( \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \times T(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) d\lambda} \right)$$

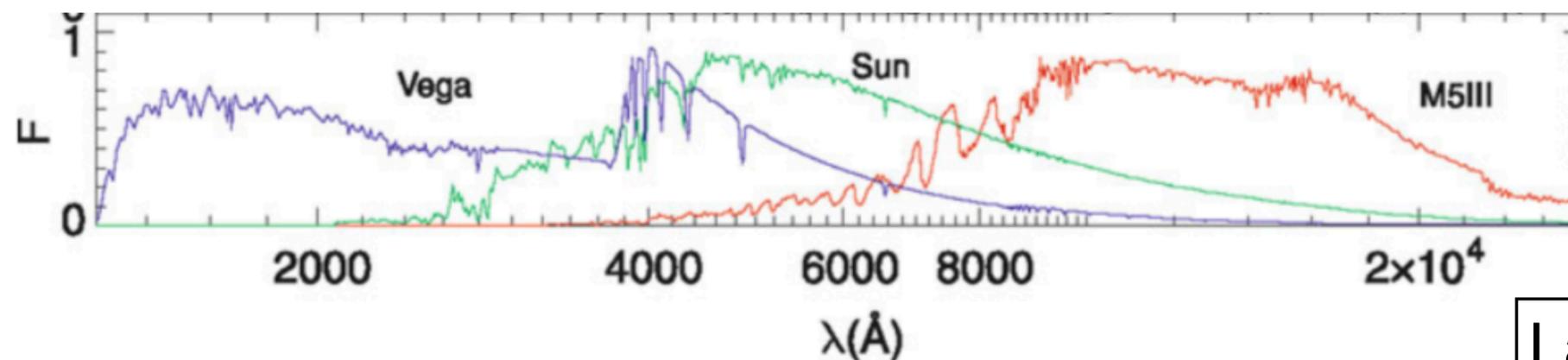


Per semplificare, di solito si inglobano le risposte dei filtri  $S(\lambda)$ , la riflessività delle ottiche  $R^n(\lambda)$  e la efficienza quantica del rivelatore  $QE(\lambda)$  nella **risposta del sistema fotometrico  $T(\lambda)$  o system throughput**

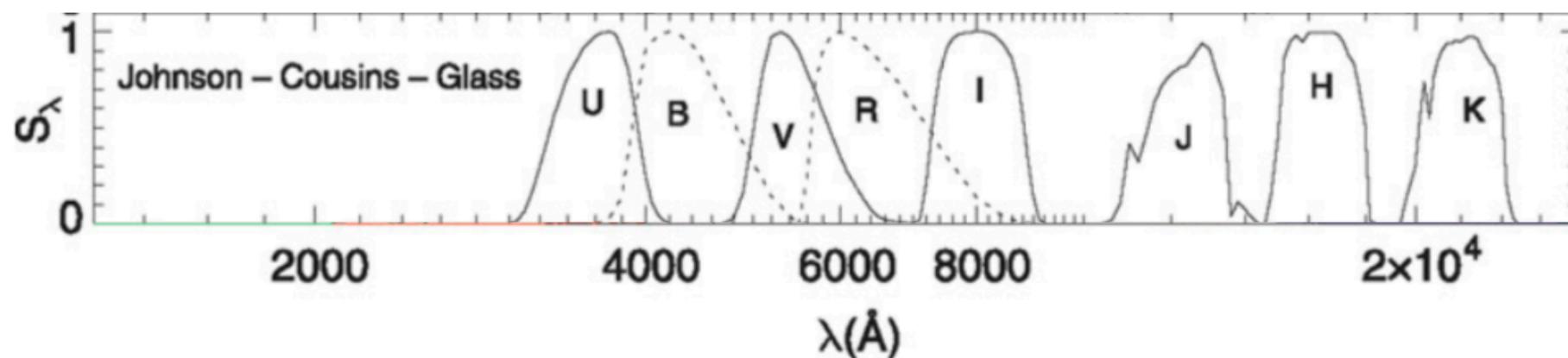
**In pratica, la magnitudine in un certo filtro è la media del flusso in un certo intervallo di  $\lambda$  pesato per la funzione  $T(\lambda)$**



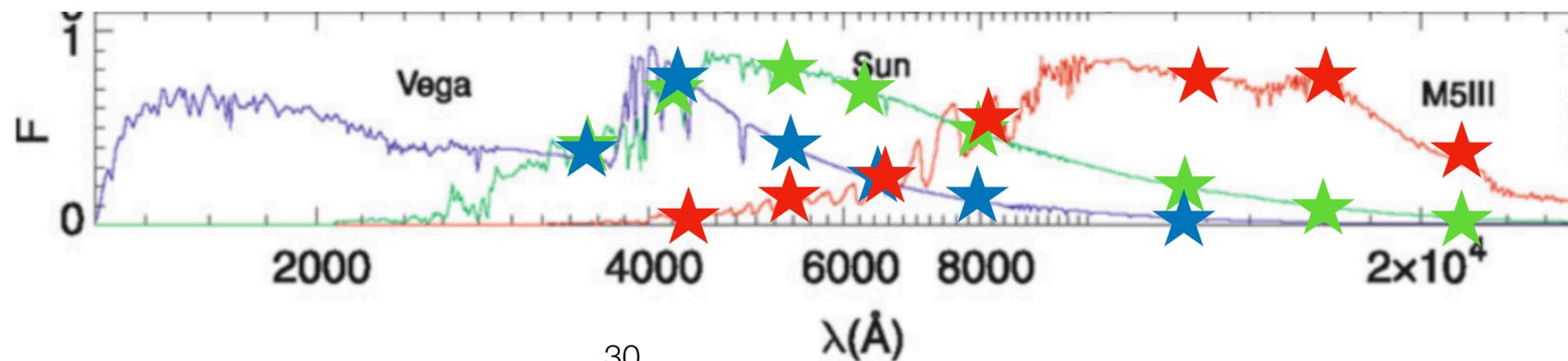
Se, per un oggetto astronomico (e.g. stella, ammasso globulare, galassia, ...):



ottengo immagini in diversi filtri spettrali, su un ampio intervallo in  $\lambda$ :



ne derivo la *Spectral Energy Distribution (SED)*:



La SED descrive la forma spettrale dell'emissione del continuo di un oggetto

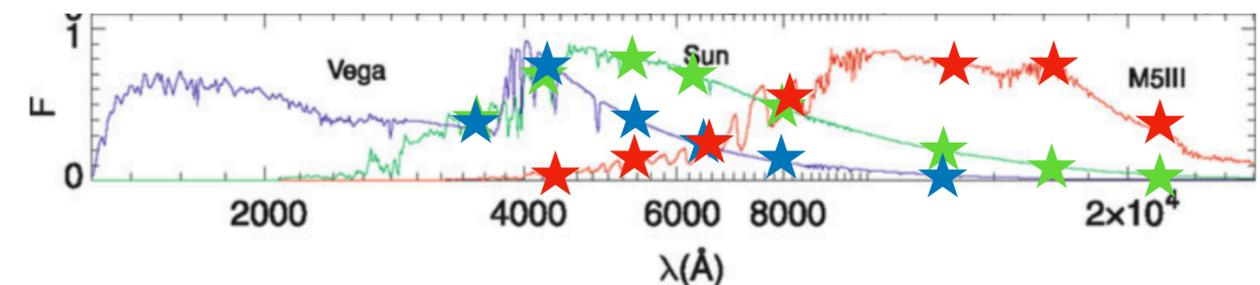
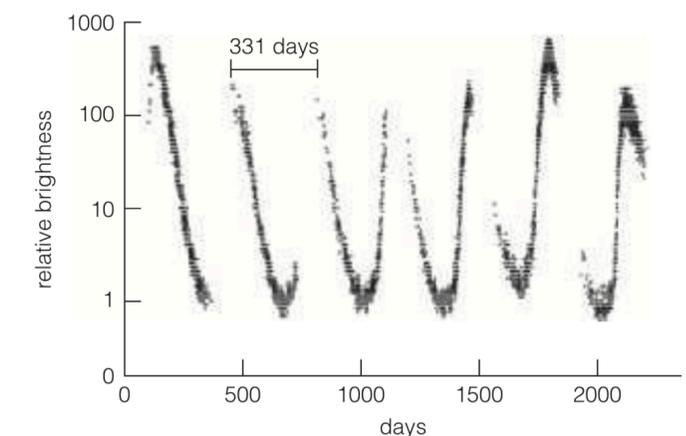
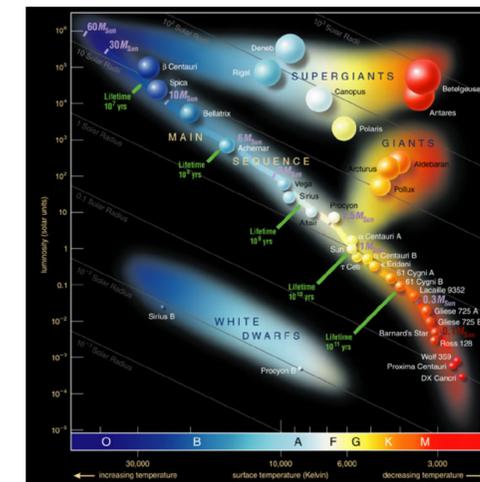
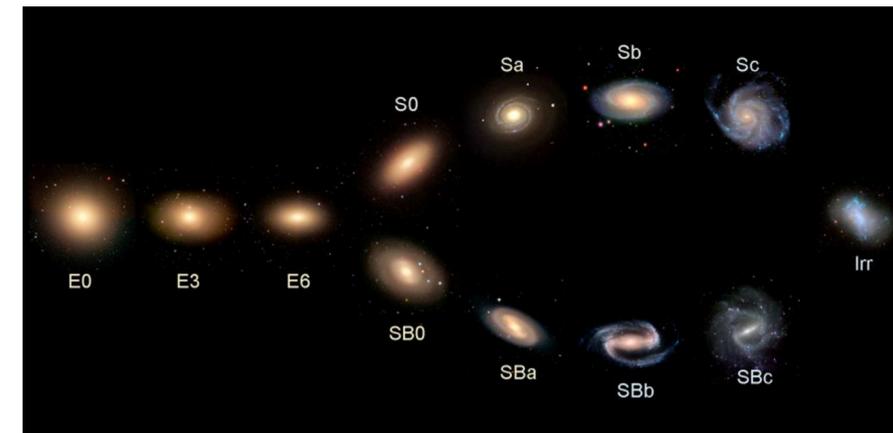
L'imaging, cioè immagini di oggetti in bande fotometriche precise, permette di fare varie misure

1. Studiare come la luce è distribuita (morfologia)

2. Misurare la luminosità totale di un oggetto, tramite la magnitudine, o il colore (e quindi la temperatura per una stella o l'età per una popolazione di stelle)

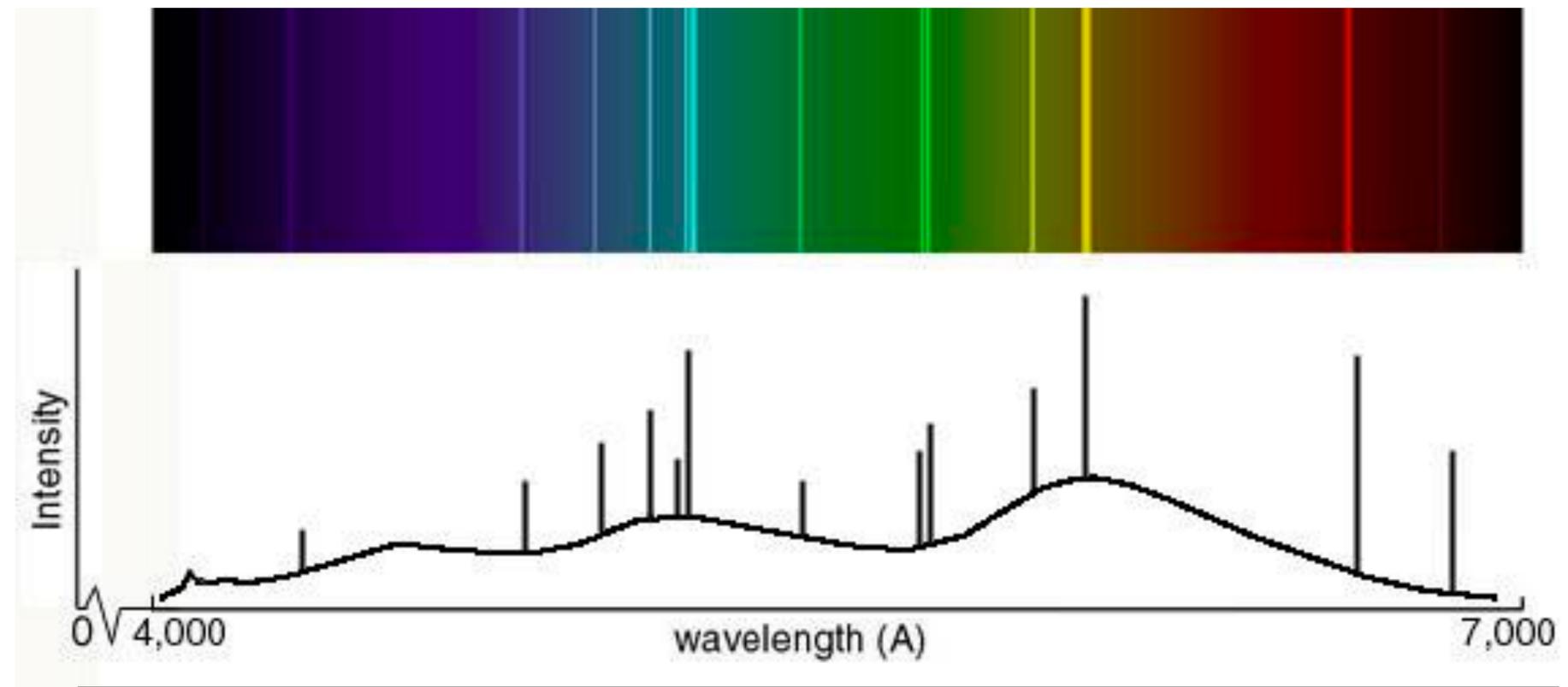
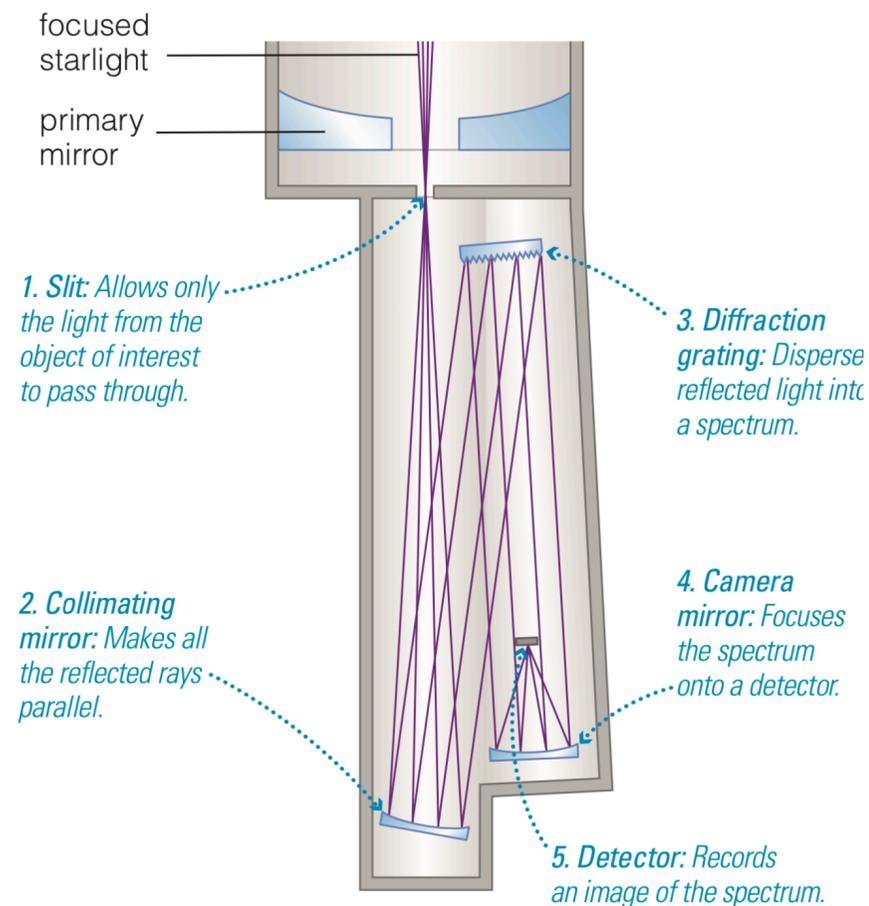
3. Costruire curve di luce (supernovae, cefeidi, *pianeti extrasolari*...)

4. la SED, ad esempio per galassie, da informazioni sulla massa totale di stelle, il tasso istantaneo di formazione di nuove stelle, [...]





La spettroscopia invece prevede di “scomporre” la luce in frequenza o lunghezza d’onda



Con la spettroscopia posso estrarre informazioni:

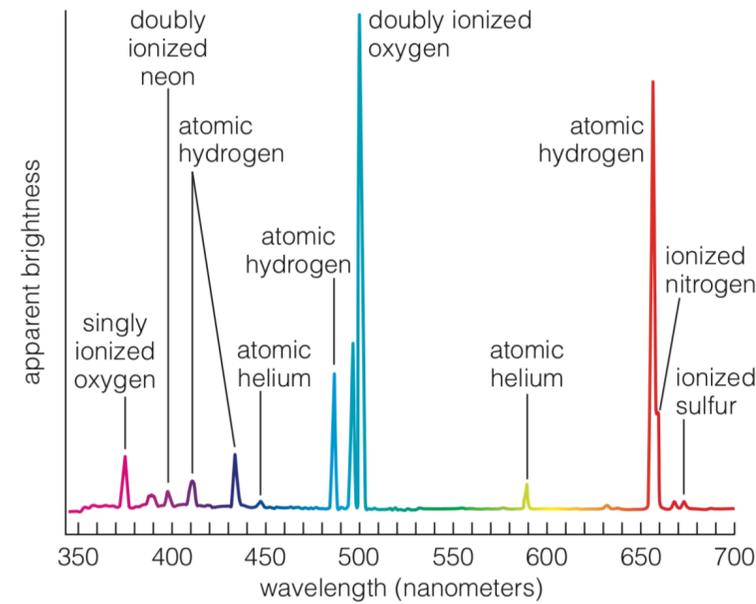
1. dalla forma spettrale del *continuo* (ho cioè informazioni simili a quelle che ottengo da fotometria multi-banda)
2. dalle *linee spettrali*



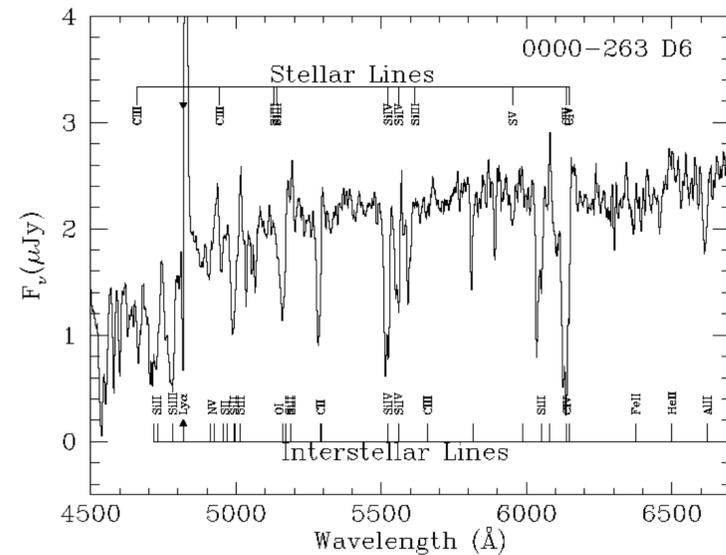
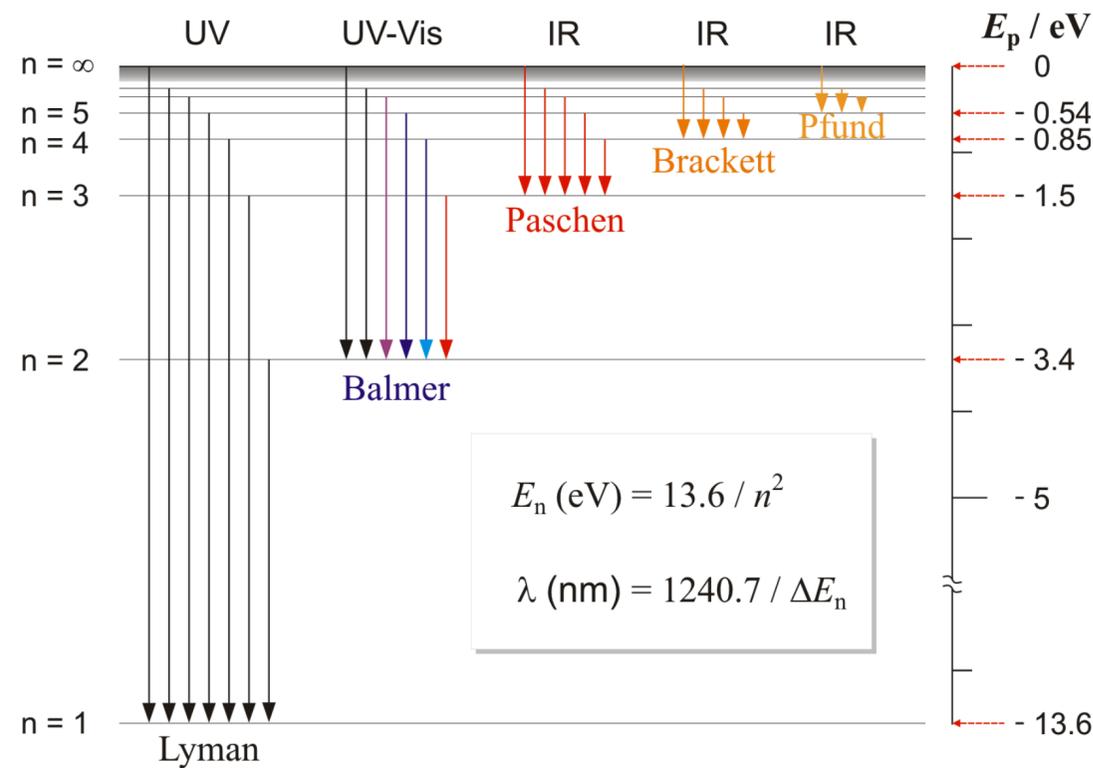
# Linee spettrali

Si manifestano in **emissione** quando un elettrone passa da un livello energetico più alto ad uno più basso

Si manifestano in **assorbimento** quando un elettrone assorbe un fotone e si eccita passando ad un livello energetico più alto



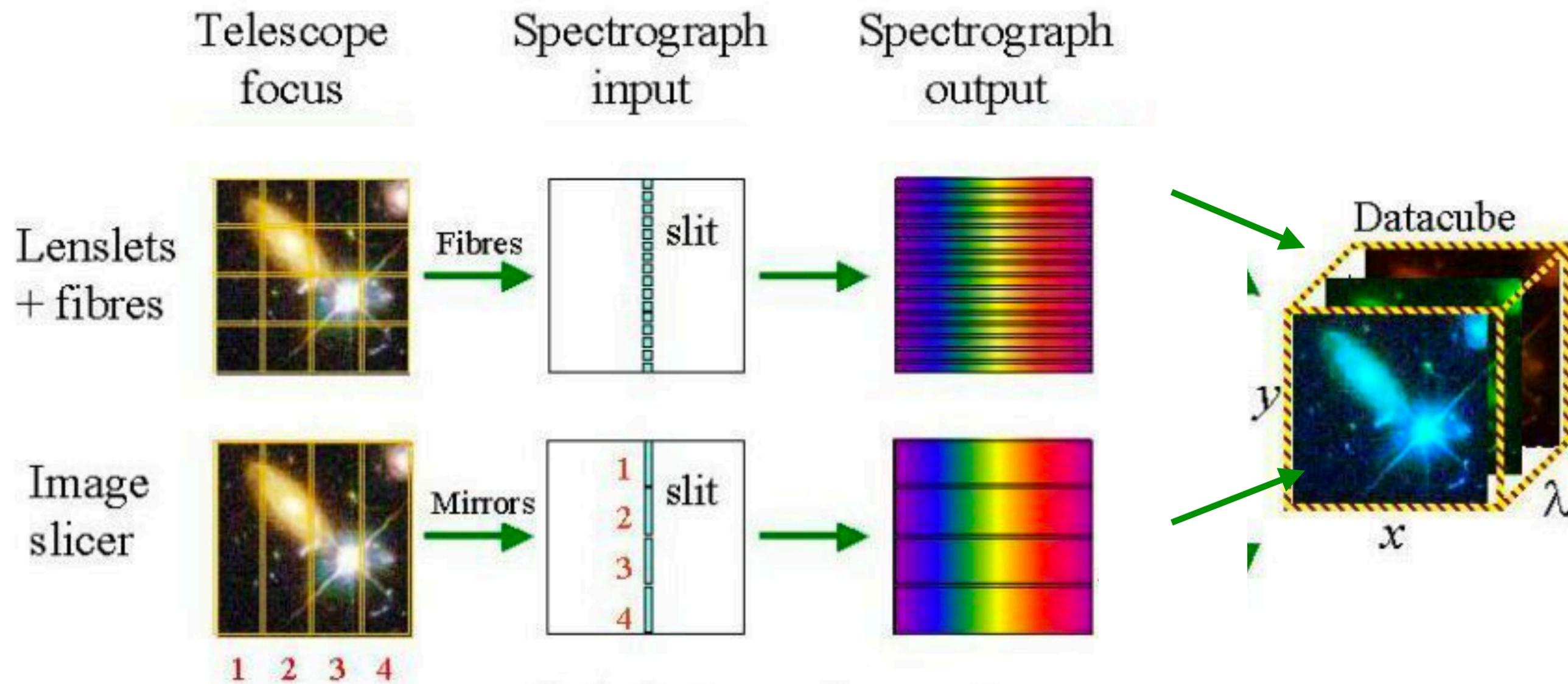
- Danno moltissime informazioni:
1. composizione chimica (quali elementi sono presenti)
  2. temperatura elettronica, stato di ionizzazione (dall'intensità relativa delle diverse righe)
  3. **redshift** (fondamentale per le distanze di galassie lontane!!)
  4. [...]



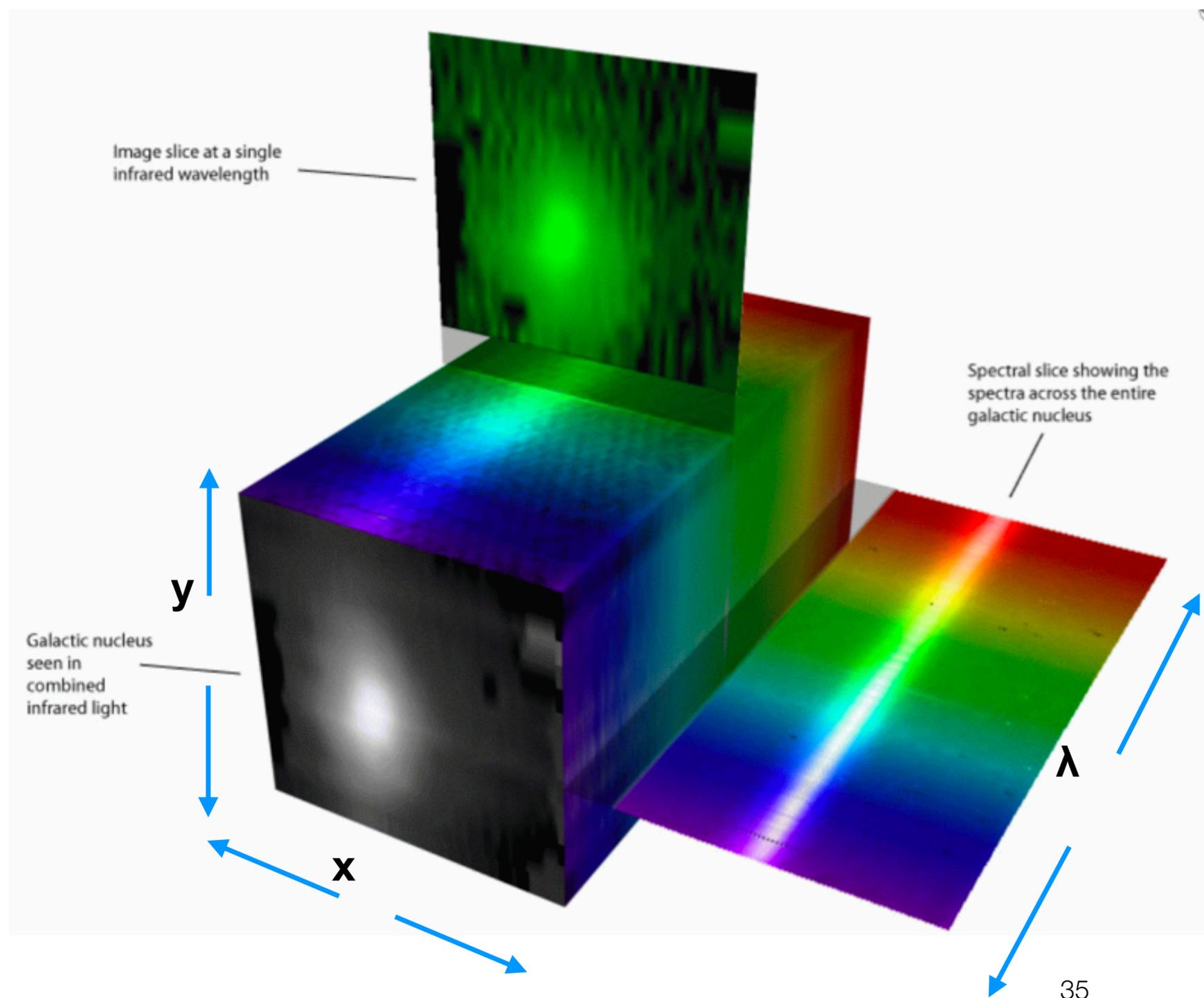
Livelli energetici dell'atomo di idrogeno

# Integral field spectroscopy

Spettroscopia integral field: si ottiene uno spettro per ciascuno *spaxel* dell'immagine



# Integral field spectroscopy



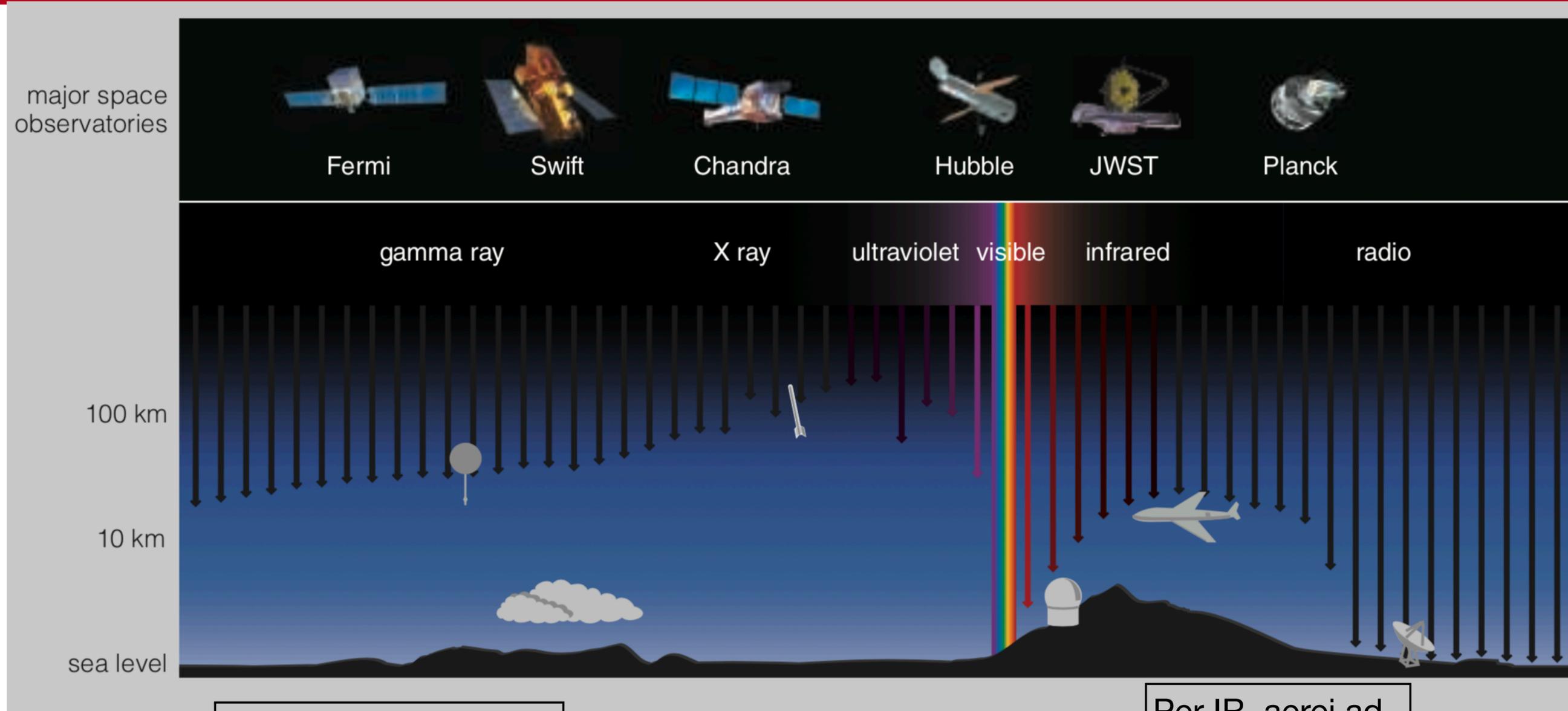
Ottengo uno spettro per ogni posizione nell'immagine, o un'immagine per ogni lunghezza d'onda

**KMOS: Multi- Integral Field Unit vicino infrarossa sul telescopio VLT**

**MUSE: Integral Field Unit vicino ottica sul telescopio VLT**



# Lo spettro elettromagnetico



Questo diagramma mostra fino a che profondità nell'atmosfera fotoni di diverse  $\lambda$  possono penetrare

Per raggi gamma o X posso lanciare palloni o razzi nell'alta atmosfera, ma meglio lo spazio

Per UV, solo spazio

Per ottico, terra o spazio

Per IR, aerei ad alta quota o spazio

Per radio, terra o spazio



# Telescopi radio

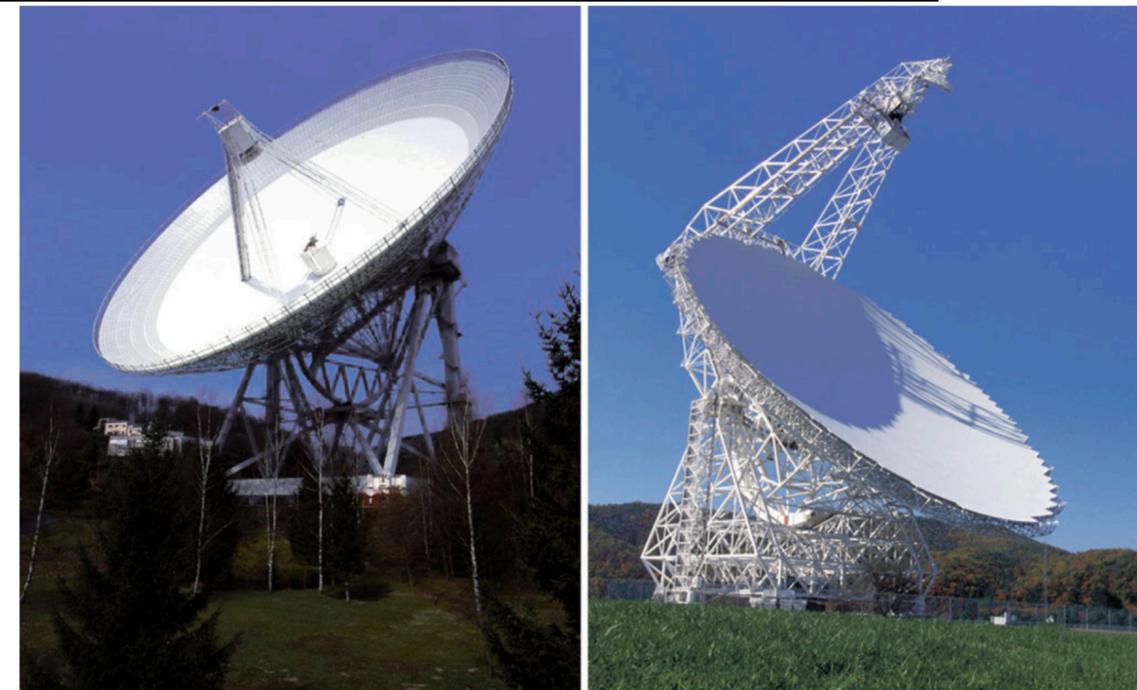
$\lambda_{\text{radio}} \sim \text{mm-cm-m}$   
 $\gg \lambda_{\text{ottico}} \sim \mu\text{m}$

$$R \sim \lambda/D$$

Per avere risoluzioni angolari simili a quelle tipiche dell'ottico, nel regime  $\lambda \sim \text{mm}$  devo avere specchi 1000 volte più grandi



**Arecibo radio telescope; D=305m**  
È fisso, non si può puntare



**100m Effelsberg Telescope; Green Bank Radio Telescope: D=100m.** Si possono puntare in cielo

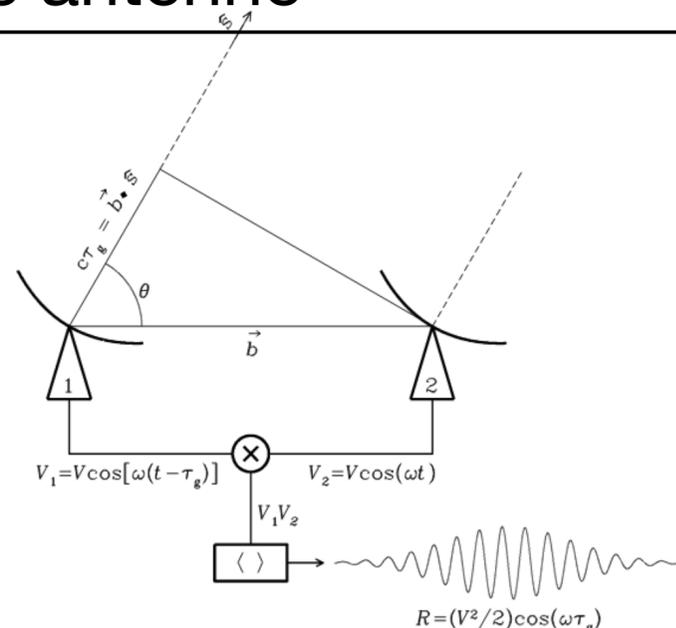
**Non sono abbastanza grandi per avere risoluzioni che si avvicinino a quelle dell'ottico**

# Telescopi radio

Per avere risoluzioni a 1mm simili a quelle che abbiamo ad  $1\mu\text{m}$  con HST ( $D=2.5\text{m}$ ) Dovremmo costruire telescopi di  $2.5 \times 1000 = 2500\text{m}$  di diametro, ovviamente impensabili

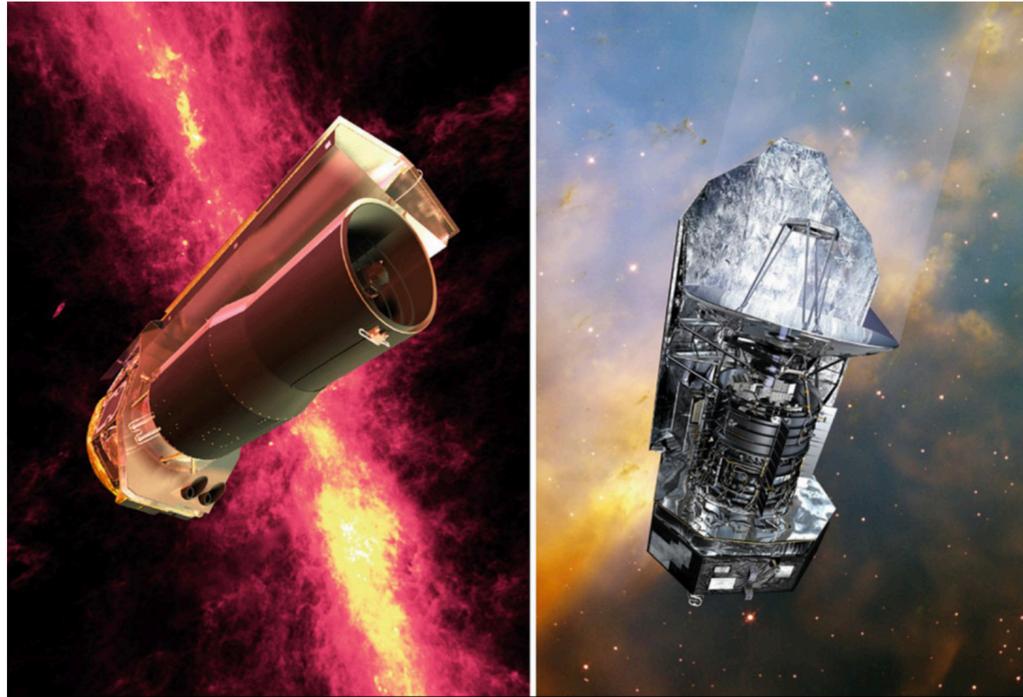
## Soluzione: interferometria

Si usa un array di telescopi più piccoli e tramite lo studio dell'interferenza si ricostruisce l'immagine della sorgente. La risoluzione idealmente è quella data dalla separazione più grande delle antenne



**ALMA:** 66 antenne di 7-12m, semoventi, per ottenere diverse configurazioni e quindi risoluzioni

# Telescopi lontano-IR



**Spitzer e Herschel:** telescopi IR di  $D \sim 1\text{m}$  e  $3.5\text{m}$

A seconda dell'intervallo preciso di lunghezze d'onda, IR è accessibile dallo spazio, dall'alta atmosfera, o da terra



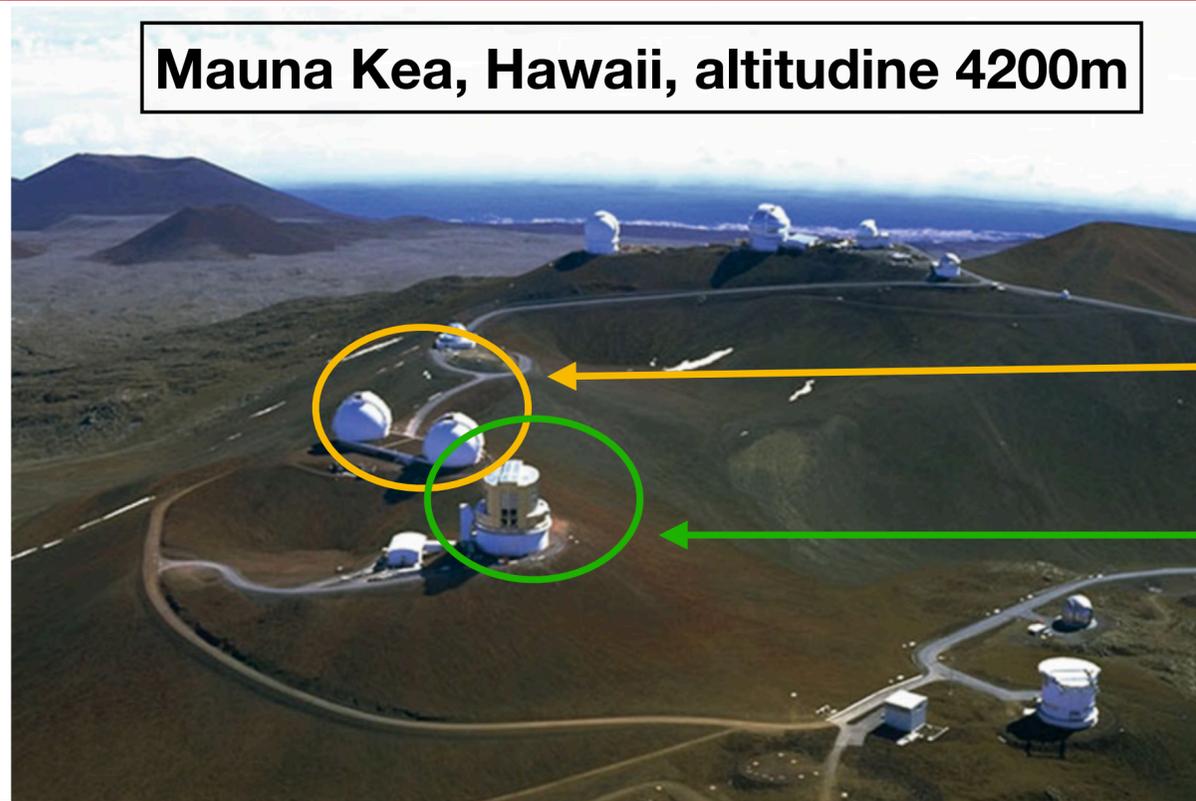
**SOFIA:** telescopio di  $2.5\text{m}$  su un Boeing 747 che vola a  $12\text{km}$  di altezza



**South Polar Telescope:** antenna di  $10\text{m}$  al polo Sud

# Telescopi ottici

Mauna Kea, Hawaii, altitudine 4200m



Telescopi ottici grandi a terra permettono di raccogliere molti fotoni, preferibili quindi per spettroscopia

**2 Keck 10m telescopes**

**Subaru 8m telescope**

Telescopi ottici nello spazio permettono di produrre immagini con altissima risoluzione spaziale

Paranal ESO observatory



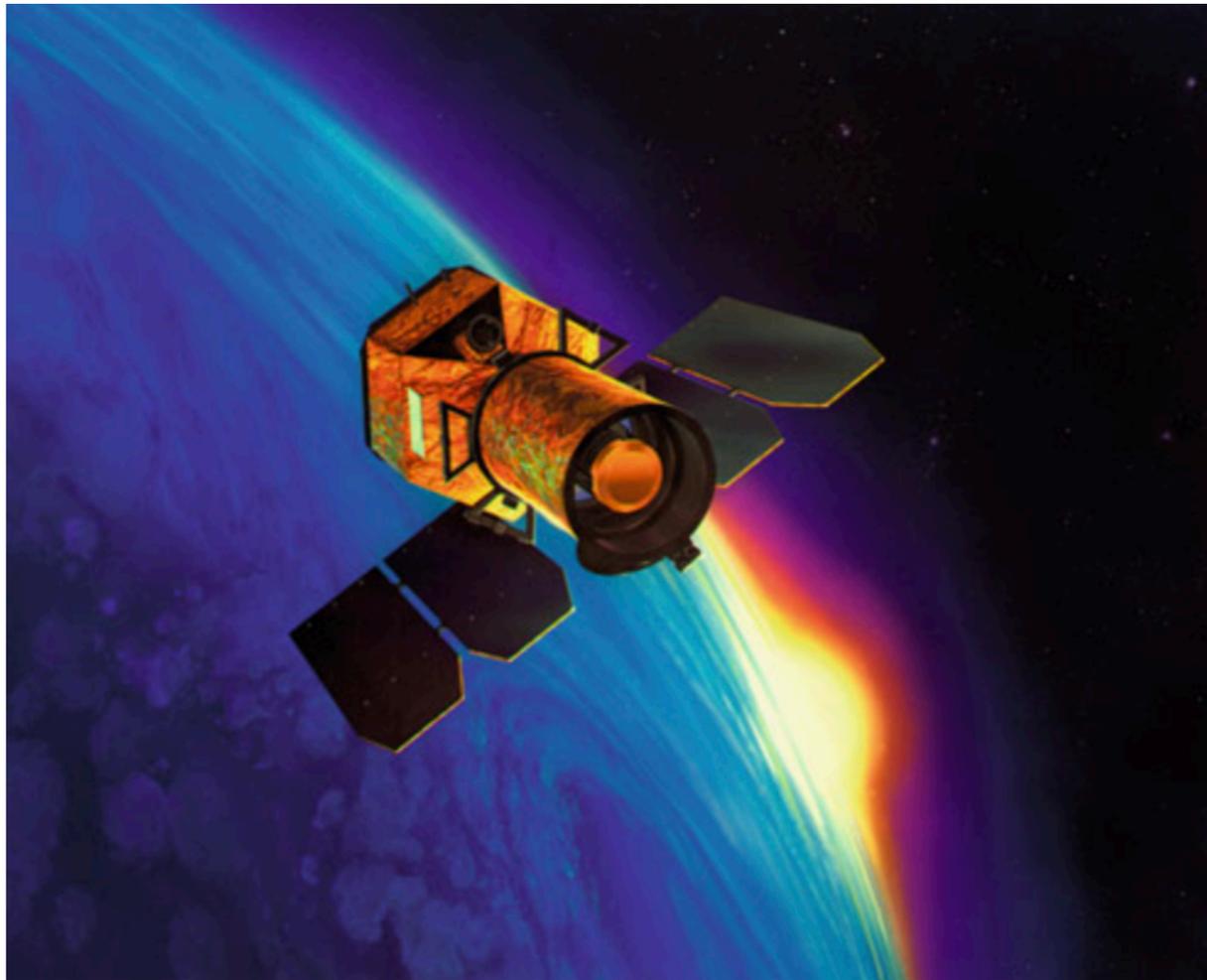
**4x8m VLT telescopes**





# Telescopi UV

Nonostante i fotoni UV siano vicini a quelli ottici nello spettro elettromagnetico, e perciò in principio potrebbero essere osservati con telescopi simili a quelli ottici, l'atmosfera li assorbe quasi completamente



**GALEX:** telescopio di 50cm interamente dedicato all'UV



**Hubble:** può osservare dall'UV al vicino infrarosso

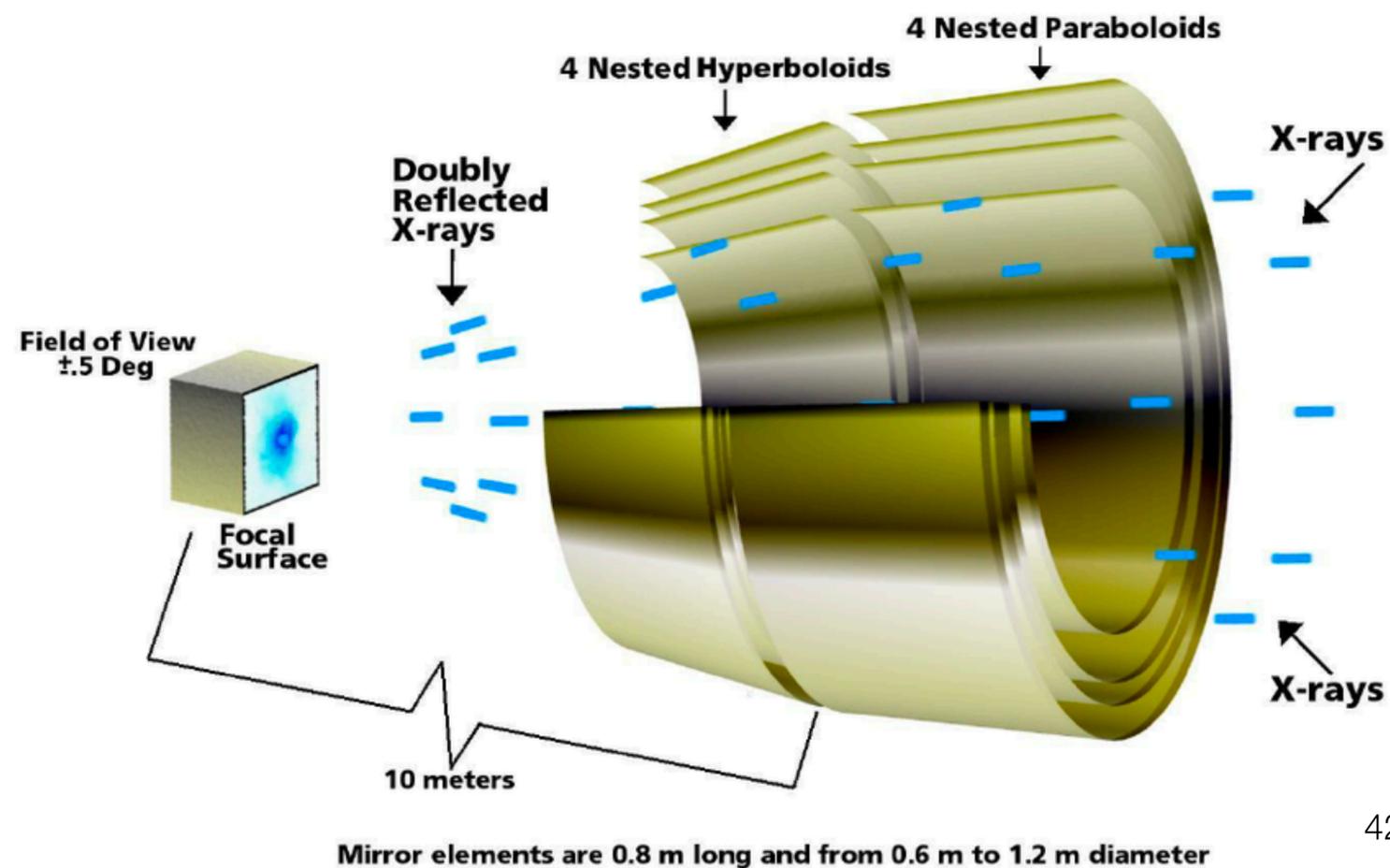
Devo per forza andare nello spazio

# Telescopi X

I fotoni X sono assorbiti interamente dall'atmosfera; devo per forza andare in orbita per osservarli

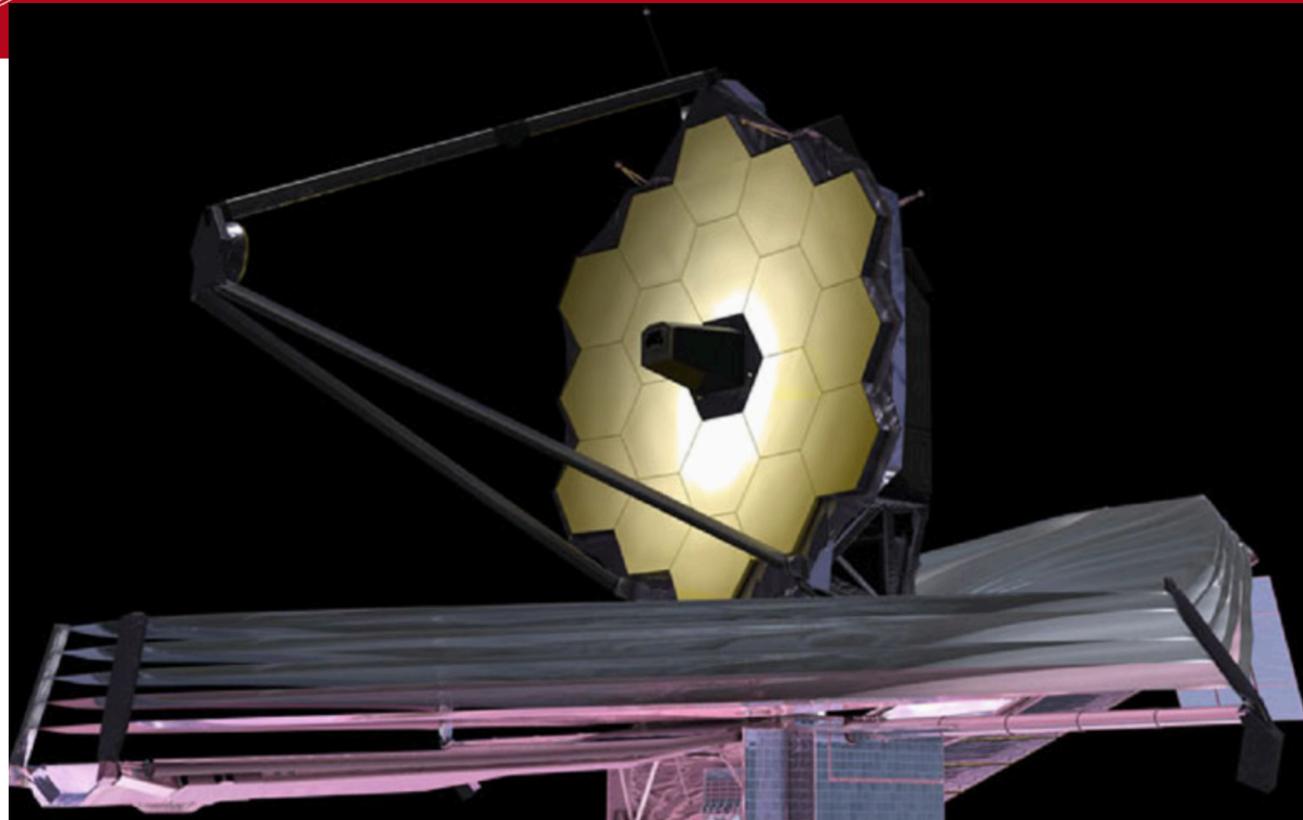
I fotoni X sono anche molto energetici; non posso usare specchi normali per focalizzarli

Si sfrutta la riflessione radente per focalizzare i raggi



**Chandra:** satellite X della NASA

# Futuri osservatori



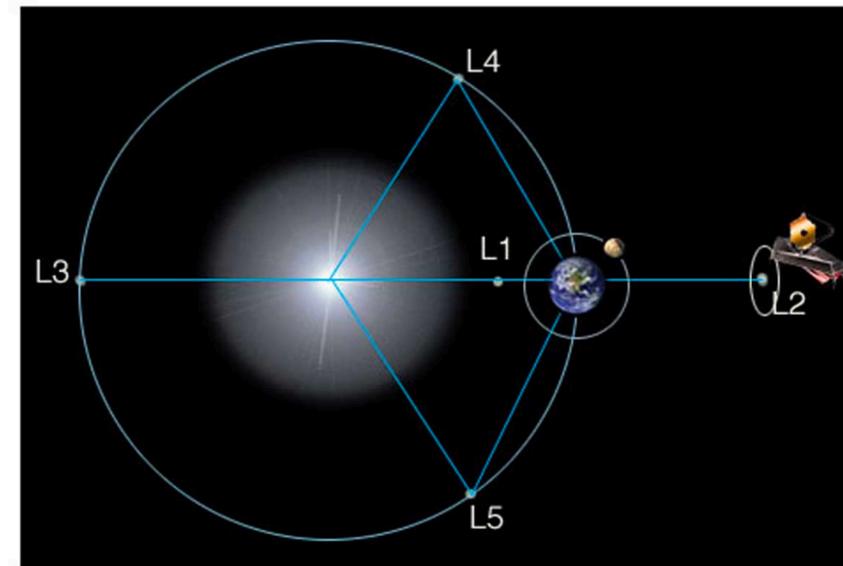
## JWST:

satellite IR della NASA

costo: 10 billion \$

D=6.5m

Orbita: L2, 1.5 milioni di km dalla Terra

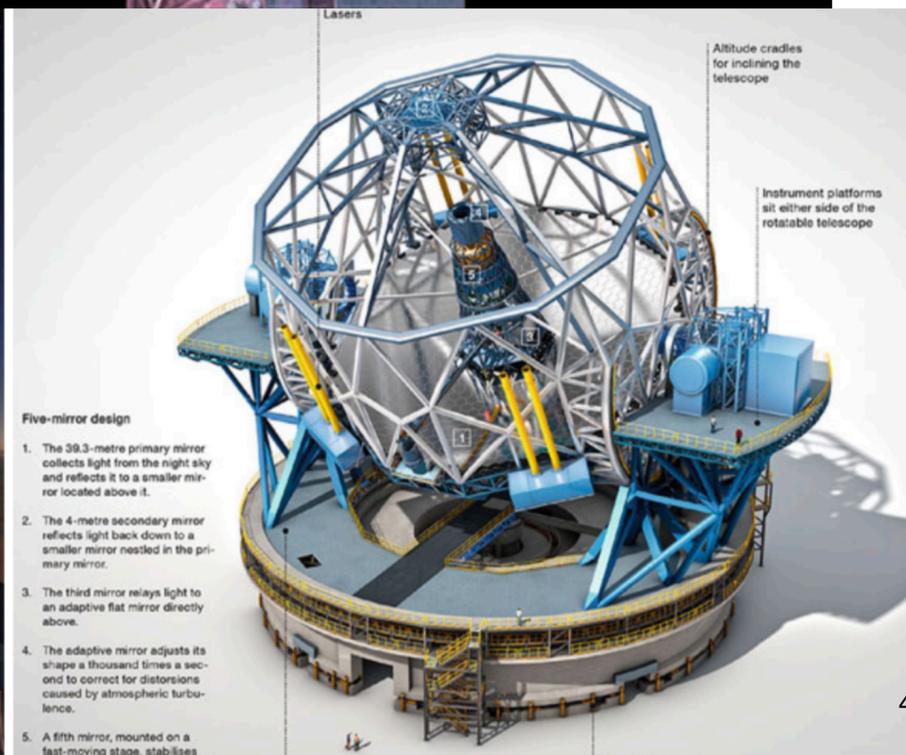
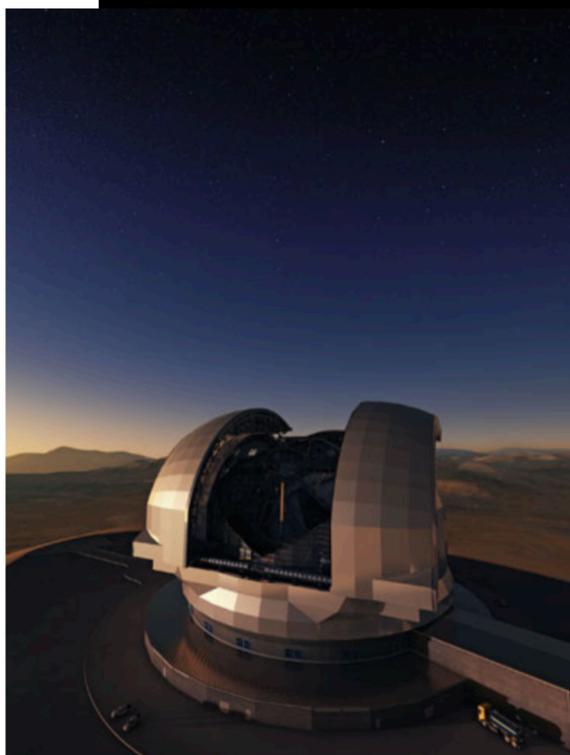


## E-ELT:

D=40m

Atacama desert (vicino a VLT)

Fully adaptive optics: risoluzione spaziale molto migliore di JWST o HST



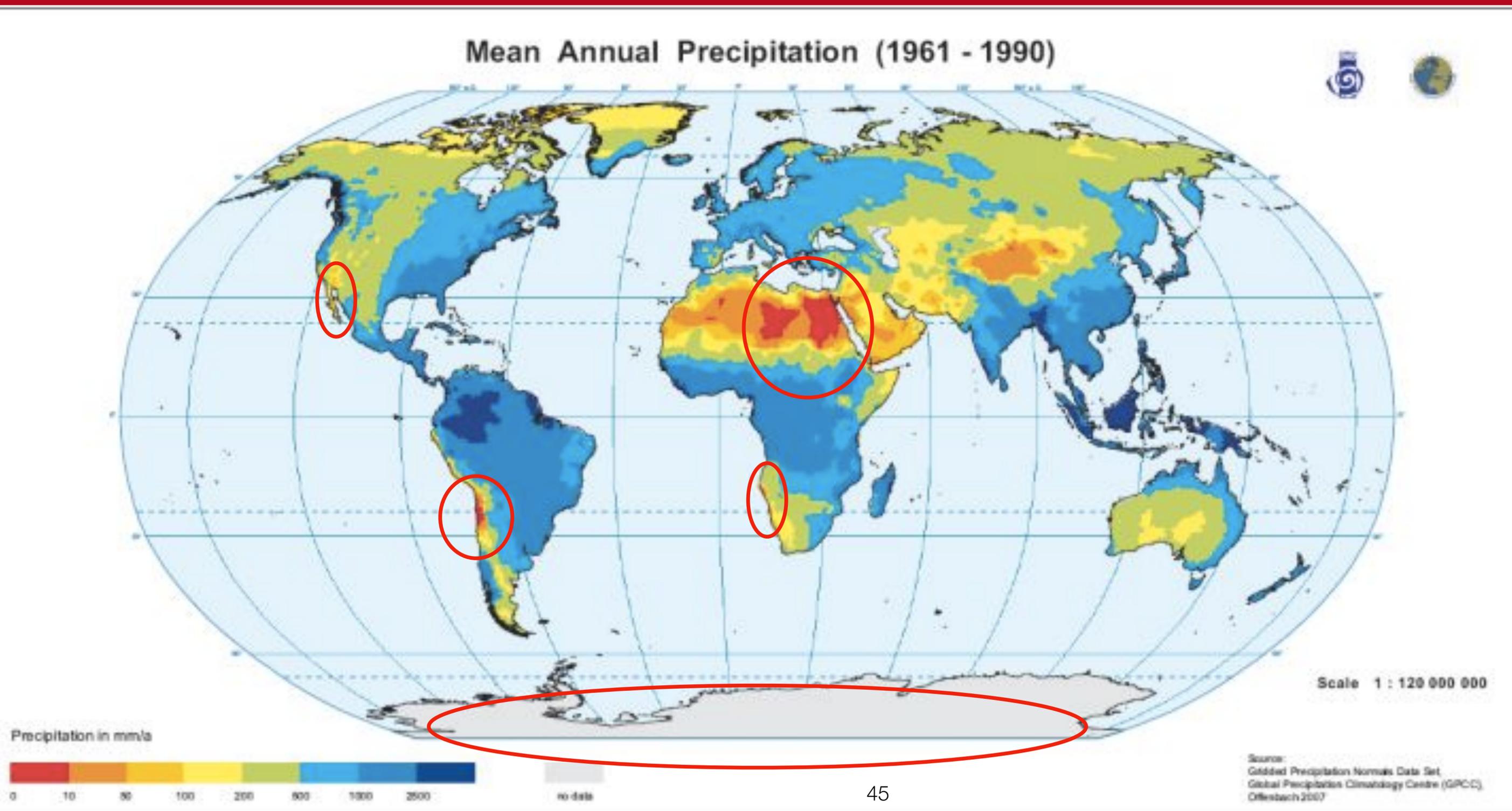


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Ingredienti per un buon osservatorio

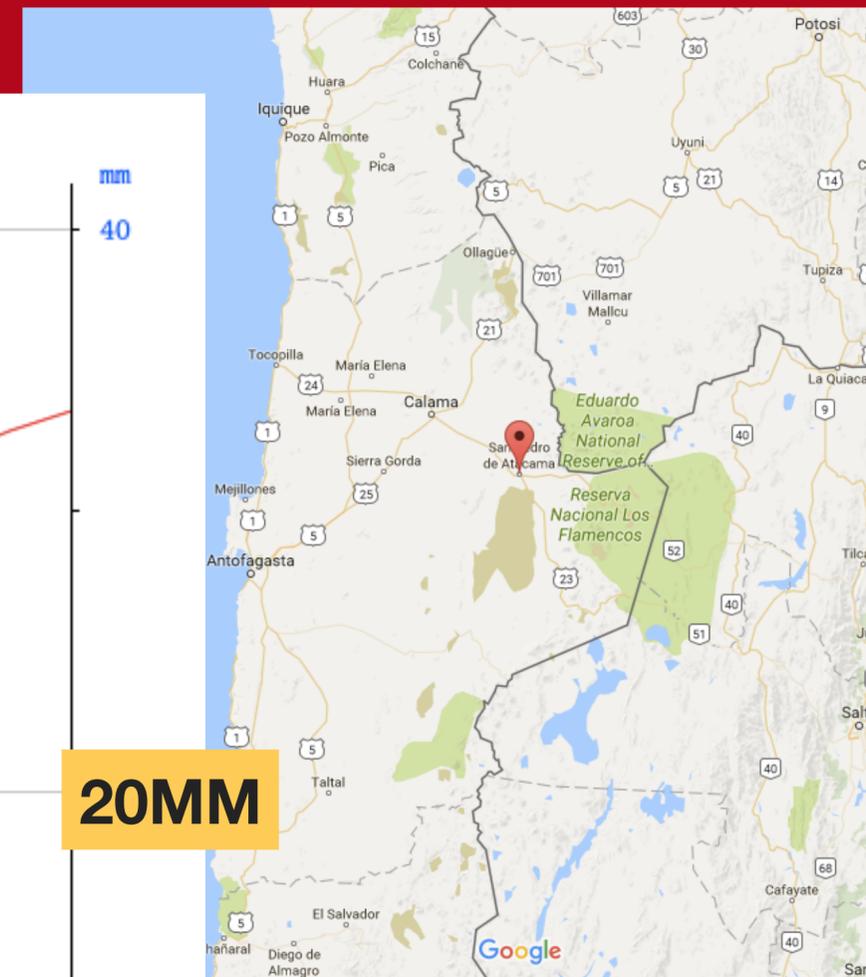


# 1. poche nuvole e pioggia



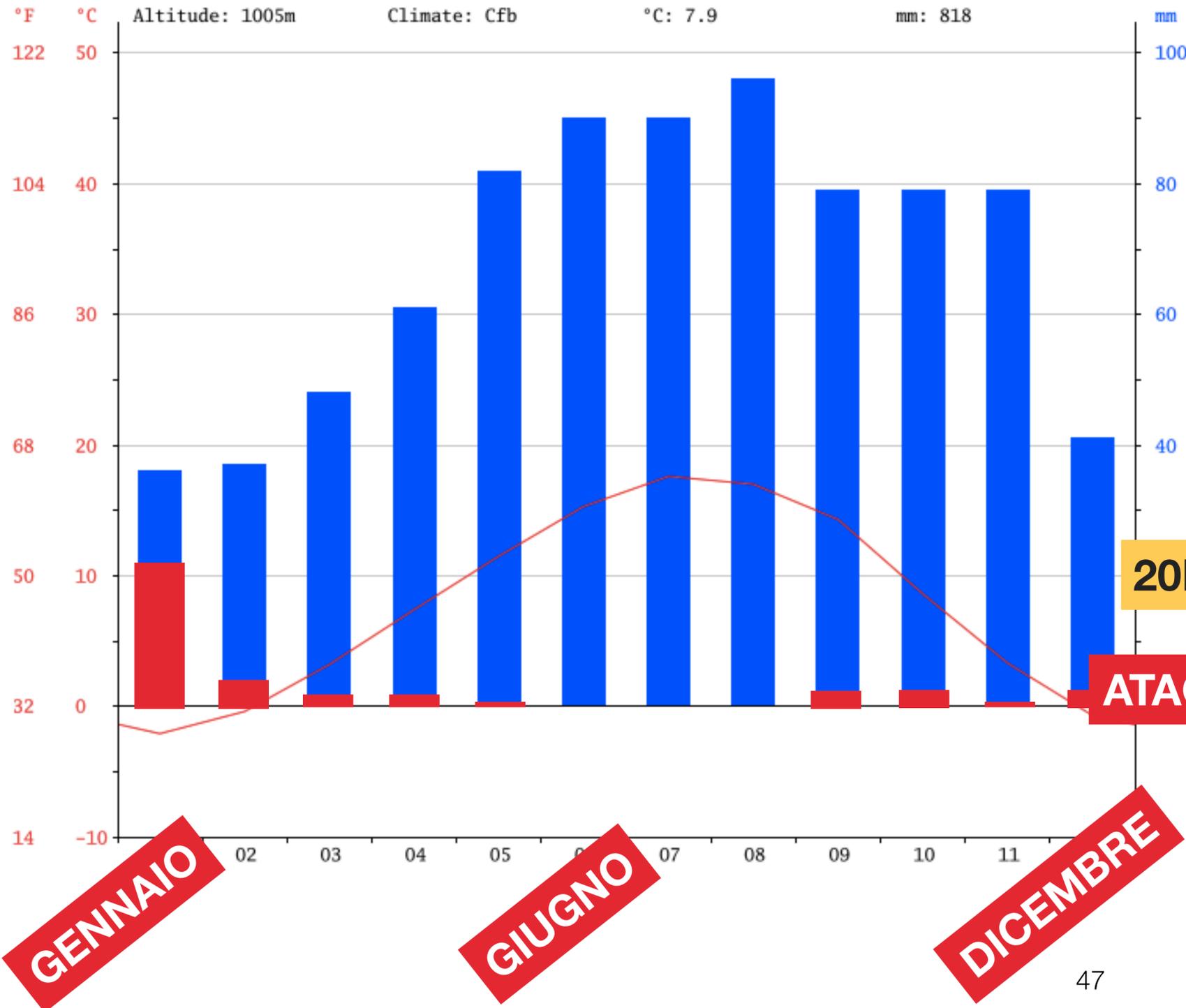


# San pedro de atacama: climate chart





# ASIAGO: climate chart

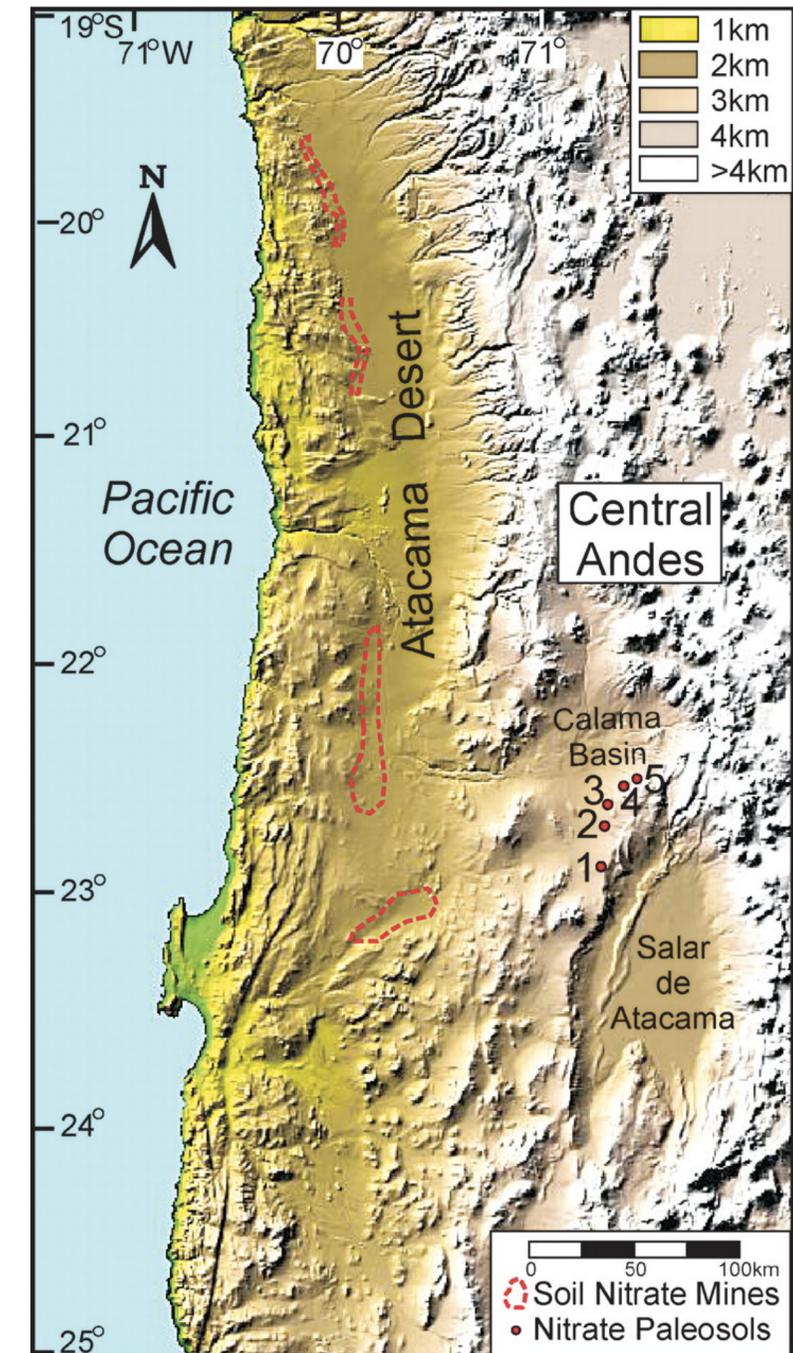
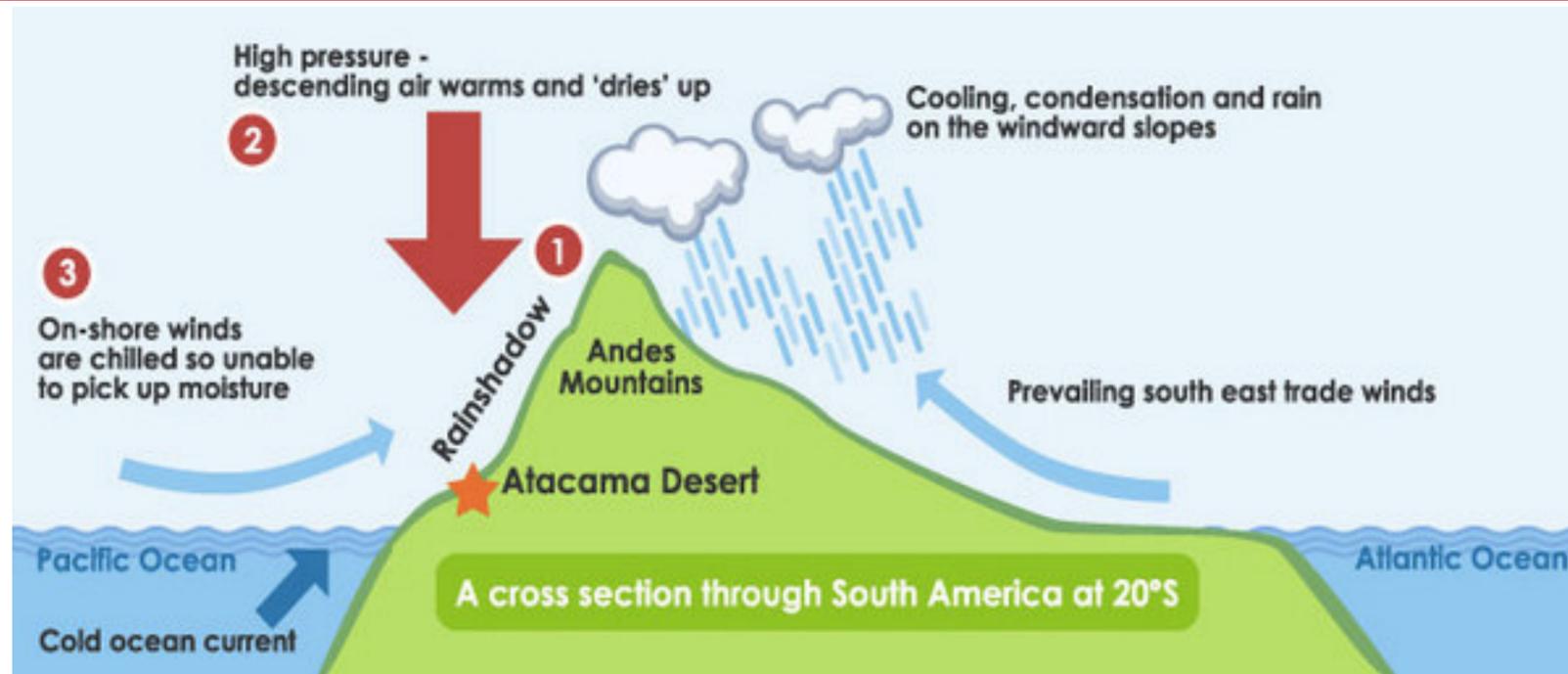




# Oceano freddo: corrente di Humboldt



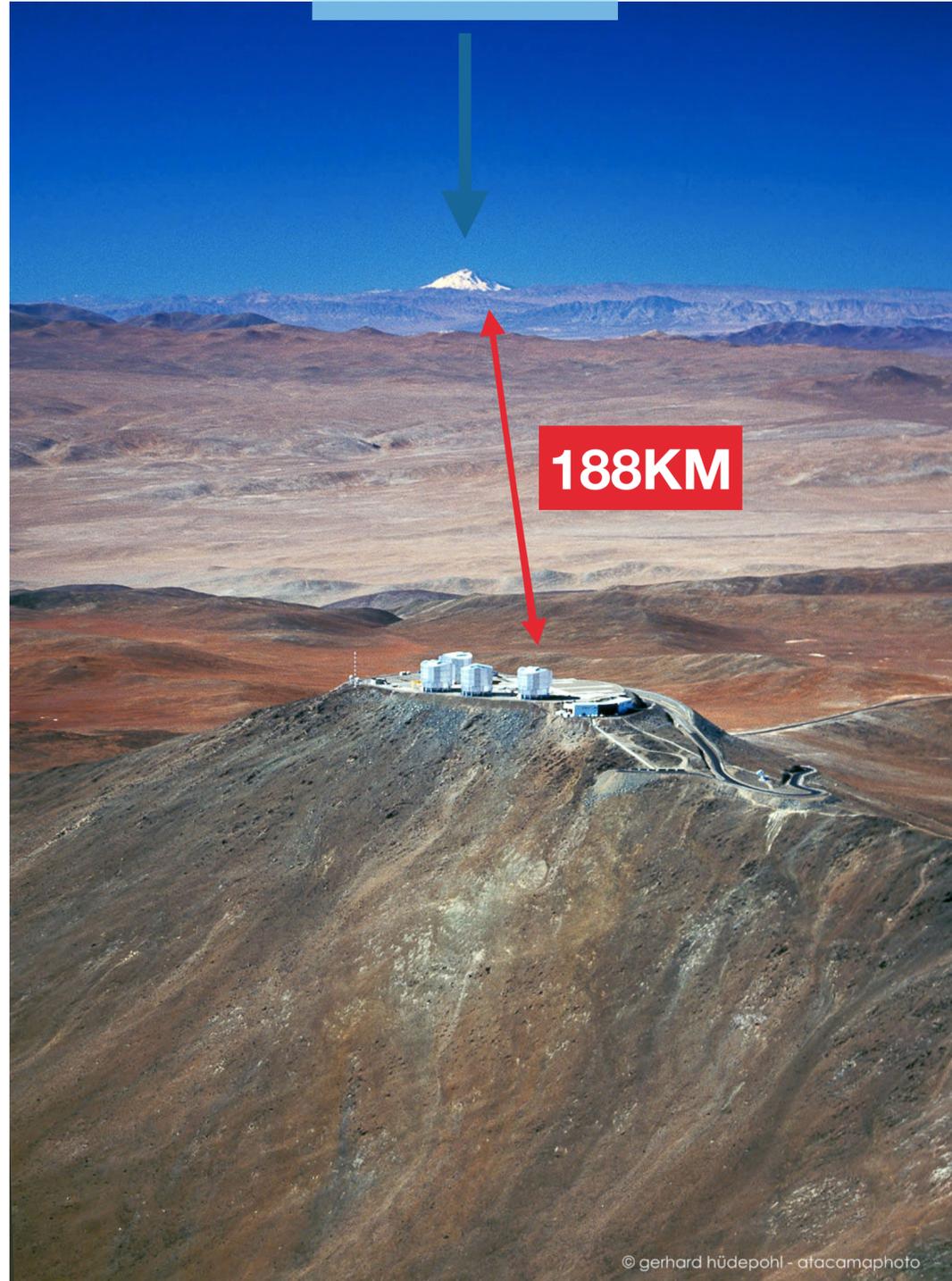
# Un deserto a 2000 m: al di sopra delle nuvole





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

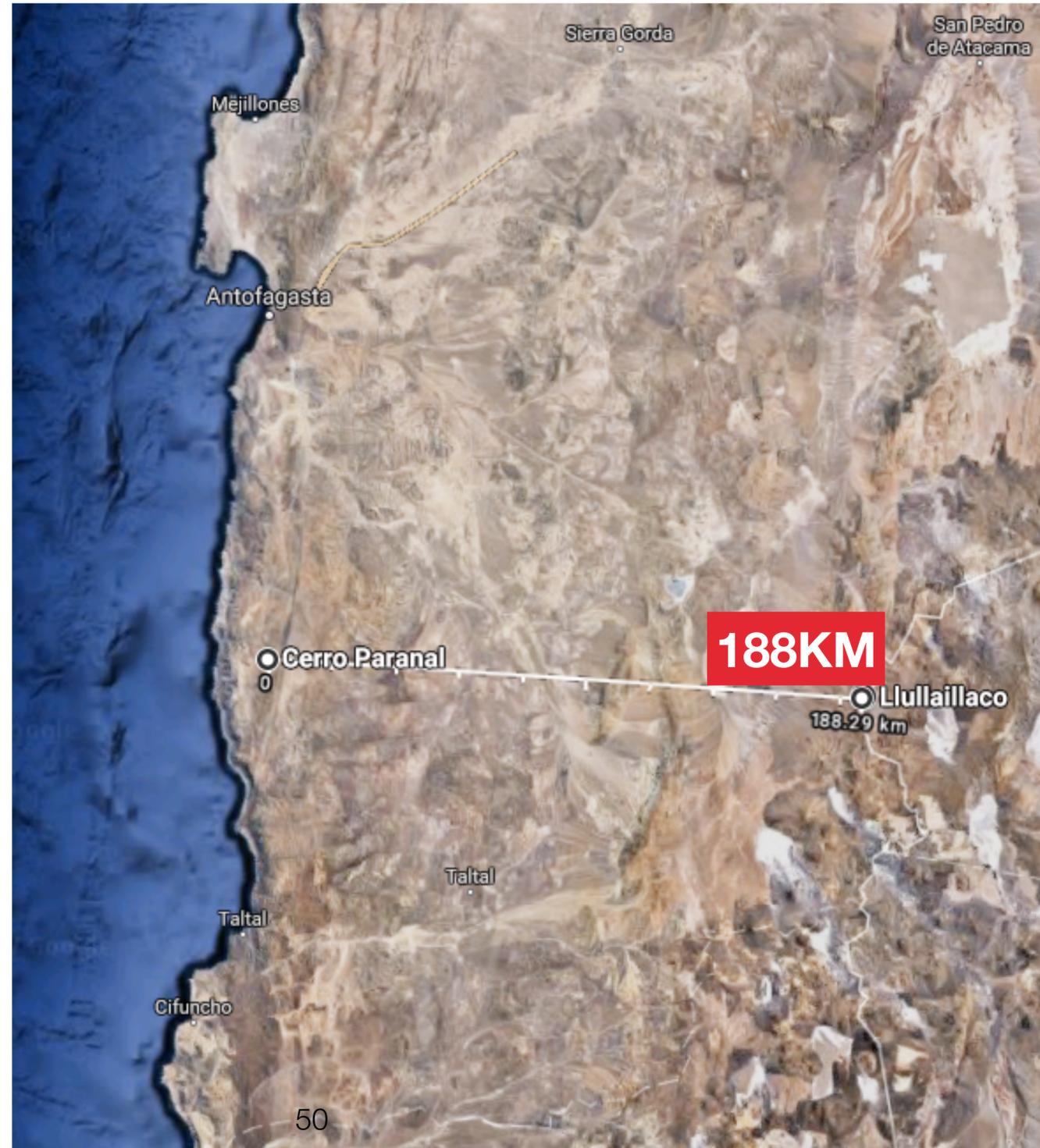
VOLCAN  
LLULLAILLACO



188KM

© gerhard hüdepohl - atacamaphoto

## 2. Trasparenza del cielo

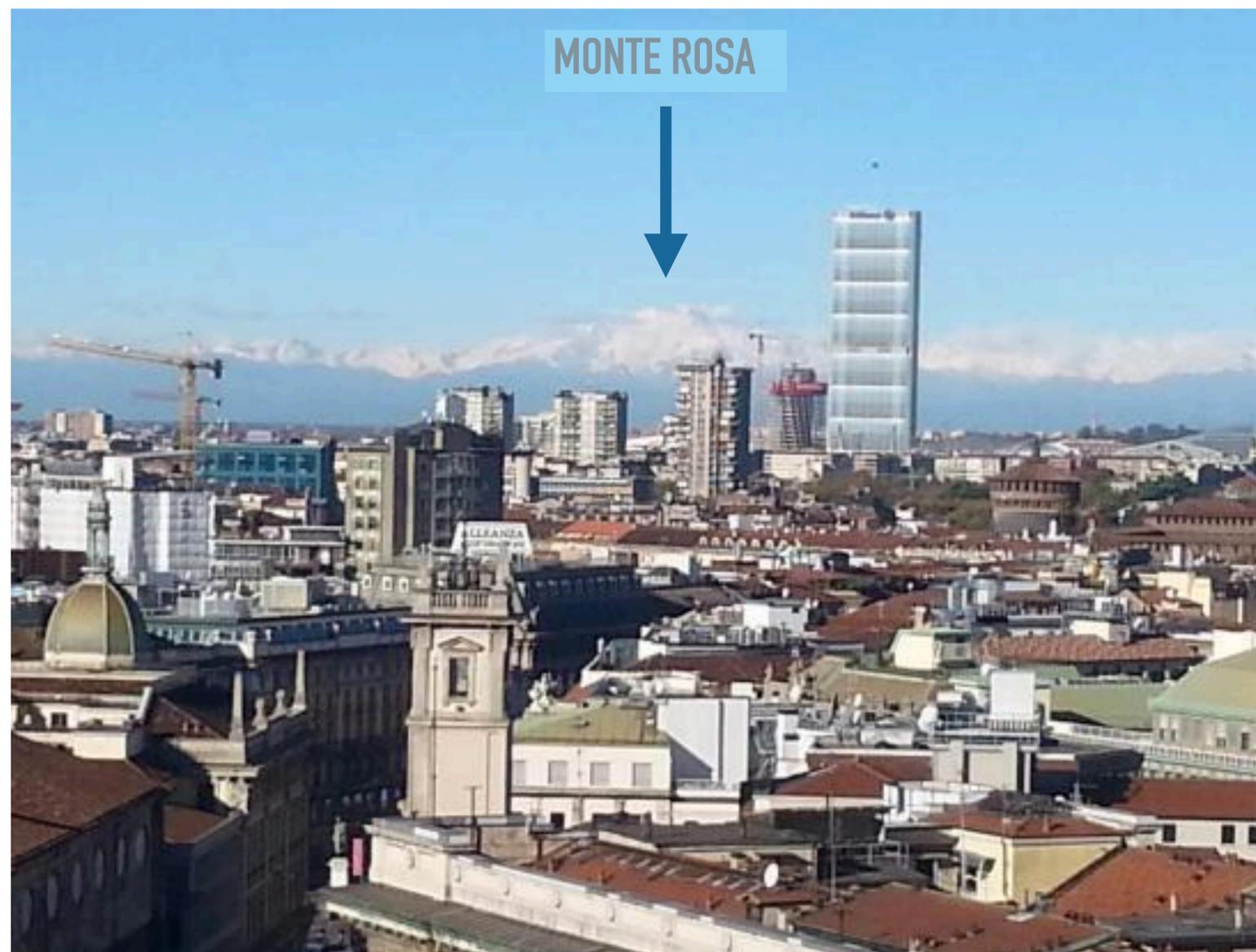


CERRO  
PARANAL,  
VLT

50



# Trasparenza del cielo





# Trasparenza del cielo





qual è secondo voi l'altro ingrediente necessario per  
un buon osservatorio?



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

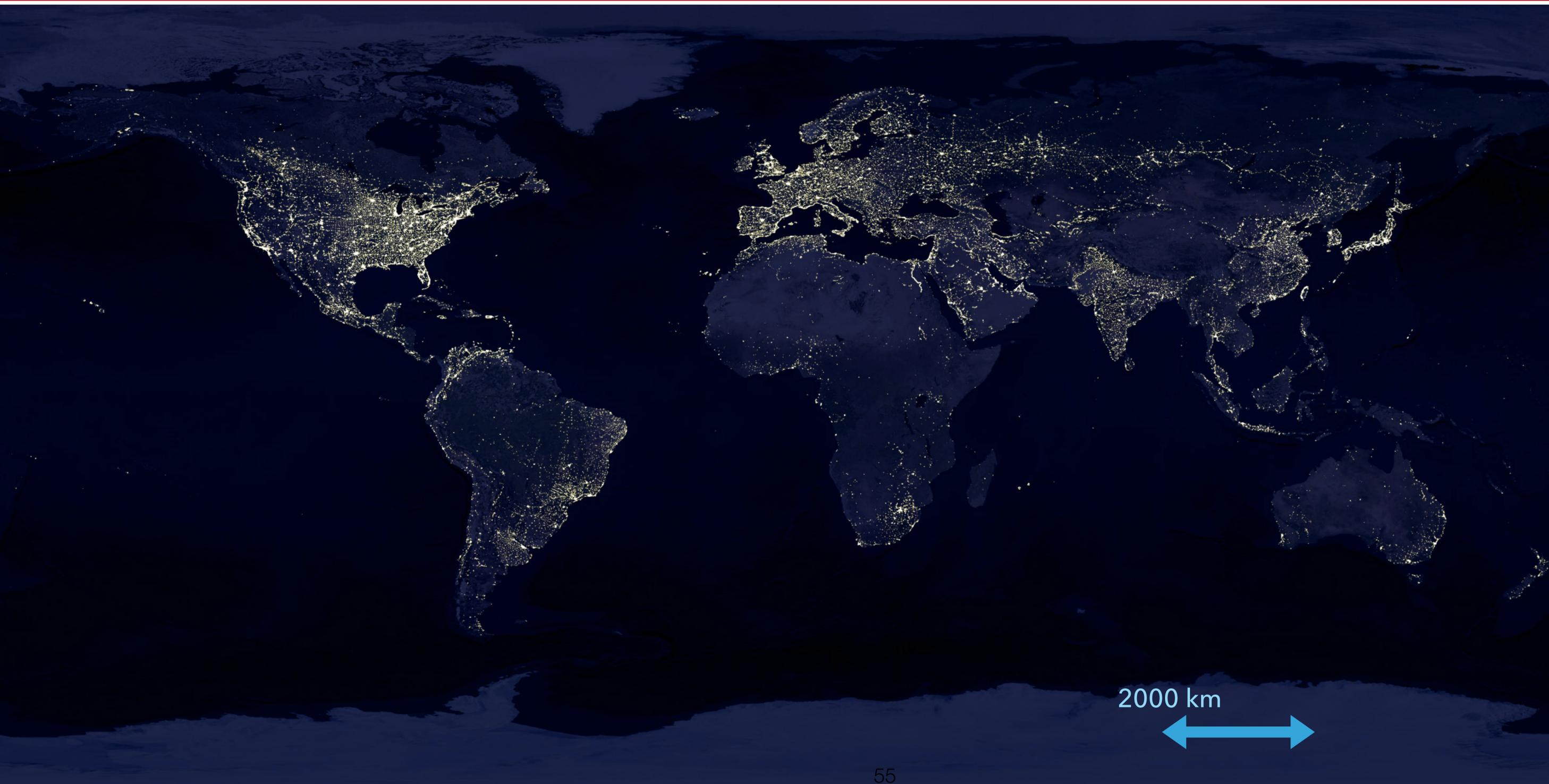
## 3. cielo oscuro





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

mondo





# Mediterraneo



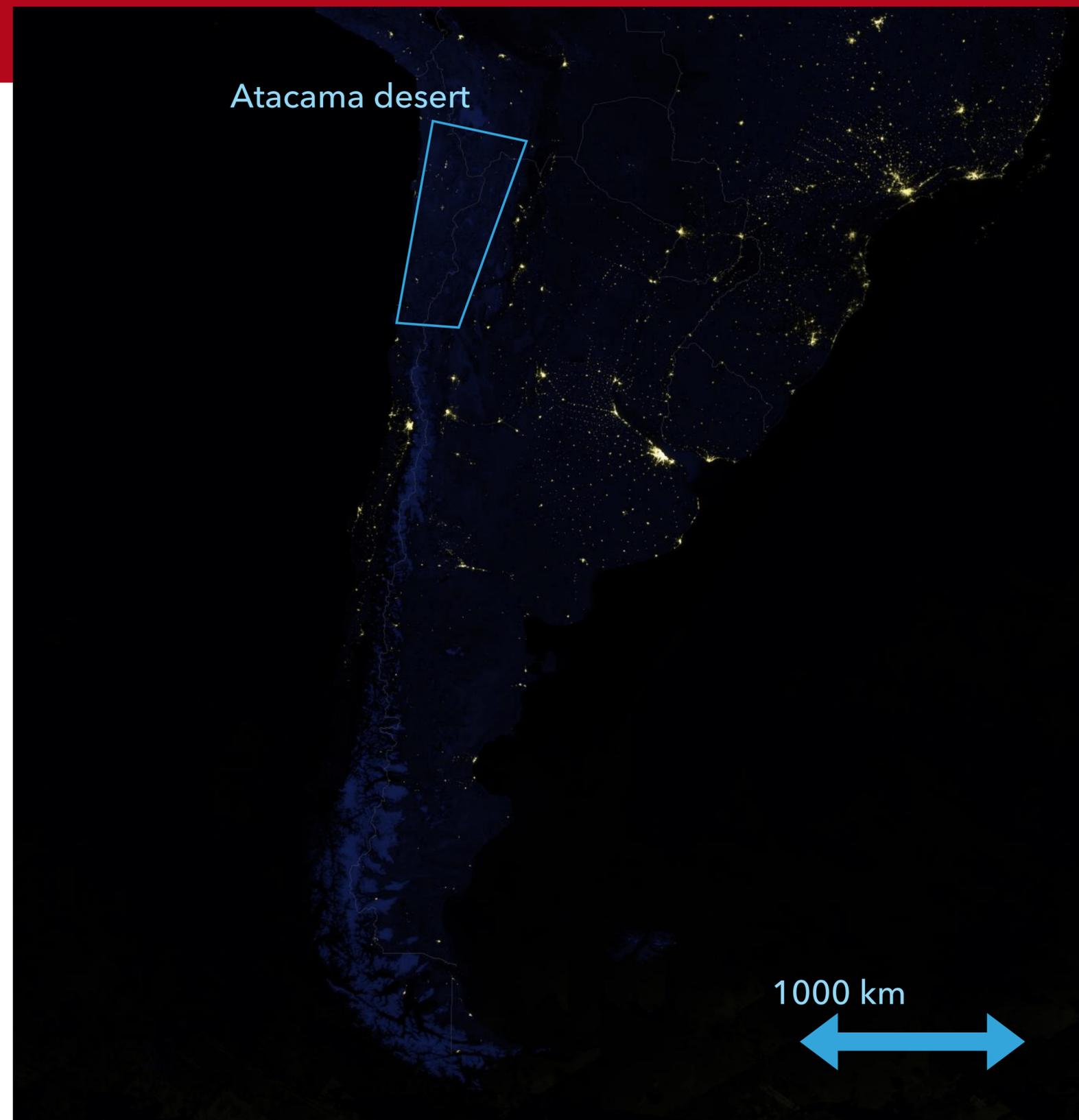
1000 km

Non ci sono luoghi che non abbiano sorgenti di luce notturna a più di 100 km



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# America del sud





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Cile: capitale mondiale dell'astronomia

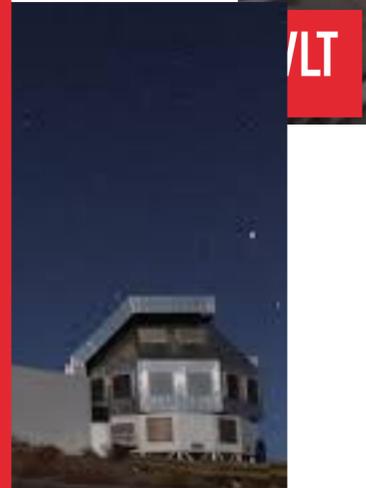


ALMA



GEMINI-S

**CILE: 70% DEI  
TELESCOPI OTTICI  
DEL MONDO NEL  
2024**



GEMINI-LT



GMT (2020)



E-ELT (2024)



LSST (2020)