



Laurea triennale in Fisica  
a.a. 2016 - 2017

# CORSO DI ASTRONOMIA

Lezione08

# PROGRAMMA

Calendario delle lezioni teoriche

- 1) martedì 11 aprile
  - 2) mercoledì 19 aprile
  - 3) mercoledì 26 aprile
  - 4) mercoledì 3 maggio
  - 5) martedì 9 maggio
  - 6) mercoledì 10 maggio
  - 7) martedì 16 maggio
  - 8) mercoledì 17 maggio
  - 9) mercoledì 24 maggio
  - 10) mercoledì 31 maggio
  - 11) mercoledì 7 giugno
  - 12) mercoledì 14 giugno
  - 13) martedì 20 giugno
  
  - 14) Serata all'Osservatorio da definire
- mercoledì 17 maggio  
martedì 23 maggio
- martedì 30 maggio**  
**martedì 6 giugno**  
**martedì 13 giugno**

# I RILEVATORI CCD

# Caratteristiche di un ccd

La performance di CCD è tra i fattori più importanti di valutazione di una camera CCD.

Essa è data da un insieme di elementi di natura diversa che caratterizzano il modo di funzionare del CCD.

Gli elementi più importanti sono:

- la *sensibilità*
- l'*efficienza quantica* (Quantum Efficiency = QE) e la *sensibilità spettrale*
- la *Full Well Capacity* (FWC)
- il *guadagno*
- la *linearità*
- la *dark current*

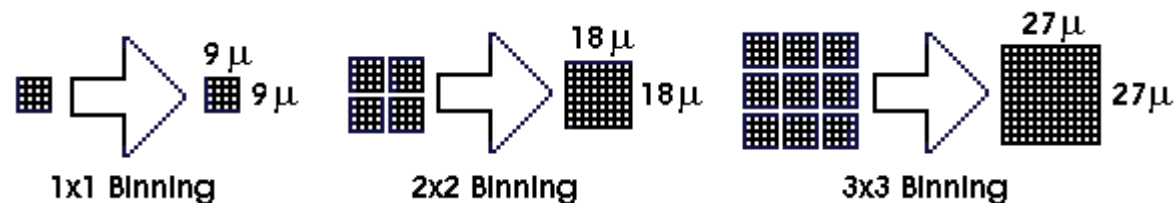
# La sensibilità

La maggior parte dei CCD hanno la capacità di leggere più pixel sia in orizzontale sia in verticale in una singola volta ovvero di leggere un "pixel super".

Questo è indicato come binning. Binning di 1x1 significa che viene letto un singolo pixel alla volta.

Binning 2x2 significa che viene lette una superficie di 4 pixel adiacenti, combinati in un pixel più grande, e così via.

In questo caso la sensibilità alla luce è stata aumentata di 4 volte, ma la risoluzione dell'immagine è stata ridotta alla metà.



# Efficienza quantica

Non tutti i fotoni incidenti sulla superficie di un pixel producono elettroni.

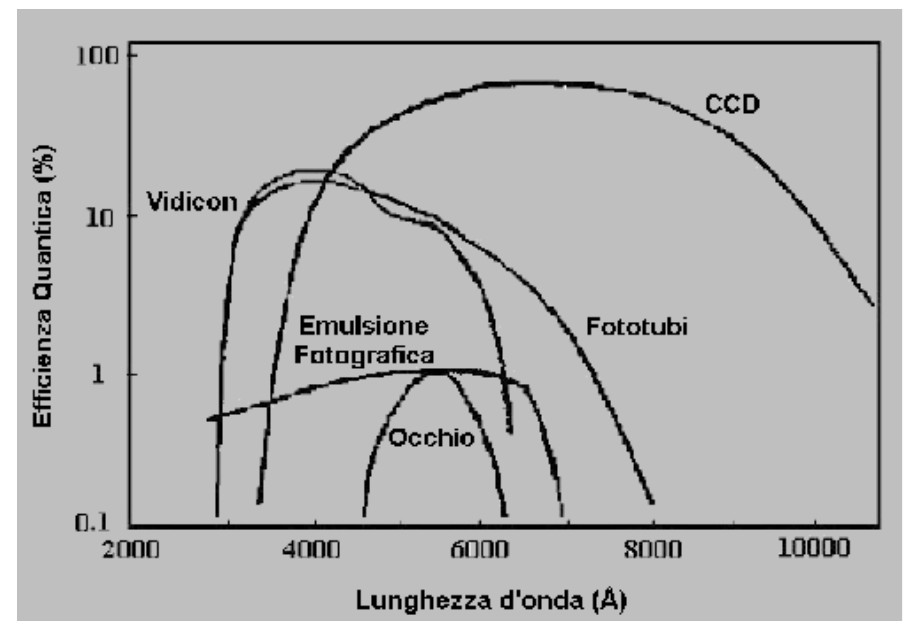
$$QE = \frac{\text{numero di elettroni prodotti}}{\text{numero di fotoni incidenti}}$$

Tale rapporto, per secondo e per singolo pixel, è un numero inferiore all'unità ed è solitamente espresso in percentuale ed indica la sensibilità teorica di un CCD.

La reale sensibilità è inferiore in funzione della qualità della camera CCD.

La sensibilità tipica di una camera CCD non professionale varia tra lo 0 e il 60%, in base alla lunghezza d'onda dei fotoni incidenti.

Misurando l'efficienza quantica per ogni valore di lunghezza d'onda in cui dividiamo lo spettro della luce incidente, possiamo costruire la curva di sensibilità spettrale di ogni sensore.



# Sensibilità spettrale

La curva di sensibilità spettrale è uno dei dati importanti della patente di un sensore.

Supponiamo di voler usare un CCD per riprendere un oggetto astronomico che emette radiazione luminosa nella banda del blu o del violetto: dobbiamo conoscerne la sensibilità in quella banda, ossia l'efficienza quantica relativa alla lunghezza d'onda del blu o del violetto.

Un valore troppo basso della sensibilità spettrale ci costringerà ad effettuare lunghe esposizioni, tipiche della fotografia tradizionale, che impiega emulsioni di sensibilità equivalente non superiore al 4%, nel migliore dei casi.

Un buon CCD deve possedere una curva spettrale abbastanza efficiente per lunghezze d'onda comprese tra i 400 e i 700 nm, con valori limite di efficienza quantica non inferiori al 50% del valore di picco. I CCD che hanno curve spettrali con picco a 530-550 nm danno generalmente ottimi risultati.

Altro fattore importante è l'uniformità dell'efficienza quantica su tutta la superficie del sensore. Variazioni di sensibilità tra pixel e pixel, a parità di lunghezza d'onda, sono causa di rumore e riducono la qualità delle immagini.

# Full Well Capacity

La capacità di accumulo delle cariche di un pixel non è illimitata.

Il valore massimo di fotoelettroni che un CCD può accumulare in un singolo pixel è una caratteristica propria di ogni sensore e viene detta Full Well Capacity.

Grandi valori di capacità elettronica di un pixel esprimono un maggior range dinamico del sensore a parità di rumore complessivo presente nel segnale.

Maggiore è la capacità elettronica per pixel di un CCD, minore è l'impatto del rumore fotonico con conseguente beneficio per le immagini planetarie.

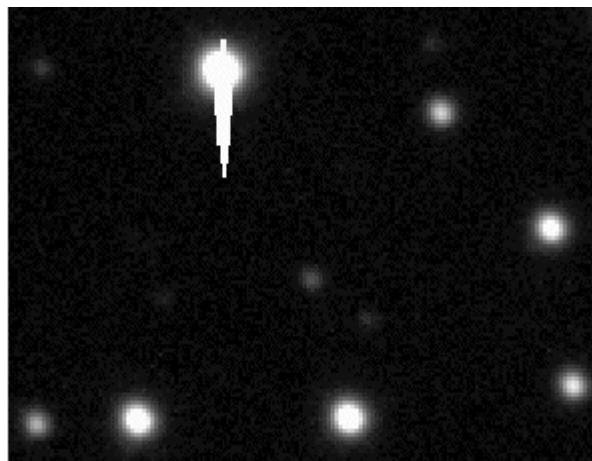
I vantaggi di una maggiore capacità elettronica sono ancor più evidenti ove si pensi che occorrerà un maggior tempo di integrazione per saturare i pixel esposti alla luce di maggior intensità incidente.



# Full Well Capacity

Una volta raggiunta la saturazione, i fotoelettroni in eccesso si spargeranno sui pixel adiacenti (preferibilmente lungo le colonne) dando luogo al noto fenomeno del *blooming*.

Molti CCD sono oggi dotati di *anti-blooming*, un dispositivo in grado di effettuare il drenaggio automatico delle cariche in eccesso, impedendo a quest'ultime di raggiungere i pixel adiacenti.



# Il guadagno

L'elettronica del CCD restituisce un numero **DN** (= *data number*), si definisce guadagno il rapporto

$$\text{guadagno} = \frac{\text{numero di elettroni prodotti}}{\text{DN}}$$

Il DN si misura in ADU (*Analog-to-Digital Unit*)

Il CCD che utilizzeremo ha  $2.2e^- / \text{ADU}$

# Linearità

Il CCD è un rivelatore lineare (la linearità è di solito migliore dello 0.01%).

In pratica ciò significa che il numero di elettroni generati in un pixel è direttamente proporzionale alla quantità di luce incidente.

Ne derivano numerosi vantaggi rispetto alla fotografia tradizionale:

- La soglia minima di rivelazione è data dal rumore medio complessivo presente nell'immagine. Se il rumore è molto basso il CCD sarà in grado di rivelare dettagli estremamente deboli.
- Il CCD manterrà la stessa sensibilità ed efficienza quantica indipendentemente dalla durata dell'esposizione.
- La linearità consente di effettuare misure dirette di luminosità degli oggetti (fotometria di precisione).

# Dark current

I sensori CCD hanno la proprietà di produrre e accumulare spontaneamente elettroni, anche quando la loro superficie è schermata dalla luce incidente (*dark current*).

A riposo il sensore continua a produrre elettroni fino a saturare completamente i livelli di capacità dei pixel. È pertanto necessario azzerare le cariche prodotte spontaneamente dal sensore prima di iniziare una nuova esposizione.

La produzione spontanea di elettroni continua però anche durante l'esposizione. Ciò significa che nei pixel si accumuleranno sia fotoelettroni prodotti dalla luce incidente sia elettroni prodotti spontaneamente.

È impossibile distinguere gli uni dagli altri.

E' però possibile valutare il numero di elettroni prodotti spontaneamente ed eliminare quasi interamente il loro effetto negativo.

# Dark current

Il fenomeno della dark current è perfettamente riproducibile.

In identiche condizioni di temperatura e di durata di una esposizione, un dato sensore genera sempre lo stesso numero di elettroni a meno di un fattore di dispersione statistica (Rumore Termico), variabile a seconda del tipo di sensore impiegato.

La quantità di cariche elettriche generate è quasi proporzionale al tempo di integrazione.

La dark current prodotta dipende fortemente dalla temperatura del sensore: la sua intensità diminuisce in genere di un fattore 2 per ogni 6°C in meno di temperatura del sensore.

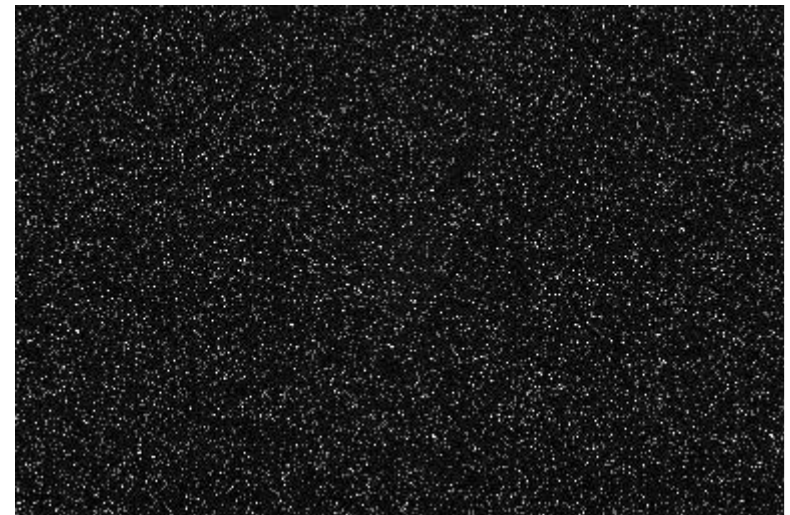
Per questa ragione essa viene anche chiamata Corrente Termica (*Thermal Current*) e le cariche prodotte si chiamano Cariche Termiche (*Thermal Charges*).

# Dark current

Possiamo quindi eliminare questo problema se operiamo in un modo appropriato.

Ecco i passi:

- Abbassare la temperatura di esercizio del sensore (i CCD sono normalmente raffreddati termoelettricamente).
- Fare un'esposizione (***Dark Frame***), con il CCD schermato dalla luce, di durata uguale a quella usata per la normale ripresa (***Light Frame***), avendo cura che la temperatura del sensore sia la stessa.
- Sottrarre il Dark Frame dal Light Frame.



# Rumore termico

La procedura non è completa e non è sufficiente per ottenere un'immagine astronomica esente dal Segnale Termico accumulatosi nei pixel durante l'integrazione.

Abbiano eliminato il Segnale Termico ma non gli effetti del Rumore Termico associato alla dispersione probabilistica delle cariche termiche, un valore pari alla radice quadrata del numero degli elettroni termici prodotti.

Il Rumore Termico non può essere eliminato.

Il suo effetto principale è quello di rendere impossibile la rivelazione di dettagli astronomici deboli la cui intensità, espressa in numero di fotoelettroni, risulti inferiore al valore del Rumore Termico presente nell'immagine.

Oggi alcuni ccd hanno una produzione di cariche termiche piuttosto bassa anche a temperatura ambiente. Questi CCD, raffreddati a  $-30^{\circ}\text{C}$ , producono meno di un elettrone al secondo, poco più di 200 elettroni in una posa di 5 minuti.

Ciò dà luogo a un Rumore Termico di meno di 15 elettroni, più o meno pari al Rumore di Lettura (*Readout Noise*) dovuto all'elettronica della camera CCD, valore piuttosto basso se confrontato con quello esibito da alcuni CCD professionali tuttora in uso.

# Bias Frame

Se leggiamo il CCD senza fare alcuna integrazione (in altre parole si pensi ad una esposizione con zero secondi di posa), ci sarà un segnale chiamato il segnale di *bias* (o offset = scostamento).

Si può pensare che il bias sia zero, ma ciò non è. Si pensi ad esso come a uno scostamento elettrico o ad un fondo.

Questo segnale deve essere misurato e sottratto dalle immagini che registriamo. Poiché c'è rumore di lettura per QUALSIASI lettura del CCD, perfino i bias frame hanno un rumore di lettura associato con essi.

Per ridurre al minimo il rumore quando sottraiamo il bias, dobbiamo riprendere molti bias frame e quindi combinarli tra loro per abbattere il rumore.



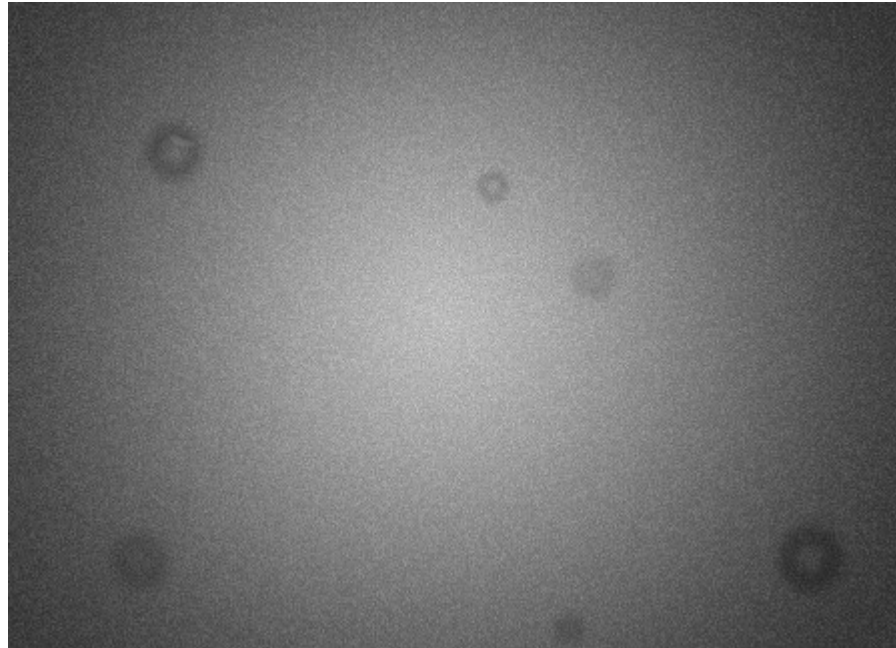
# Flat Field

In un CCD non esistono due pixel assolutamente identici.

Applicare un *flat field* ad una immagine significa riscalarla la capacità di raccogliere luce di ogni pixel.

Ottenere un flat field significa puntare il telescopio su una sorgente di luce uniforme e ottenere un'immagine al 50% - 70% della possibilità del CCD.

Poiché il flusso di fotoni è uniforme, la disparità di valori letti sarà dovuta alla non uniformità del guadagno di ogni pixel.



# LE MONTATURE PER TELESCOPI

# Montatura per telescopi

Per montatura di un telescopio s'intende la struttura meccanica che si occupa di sostenere la componente strumentale ottica e la relativa strumentazione osservativa: fotometro, spettrografo, CCD ecc.

La montatura ha anche la fondamentale funzione di compensare il moto di rotazione della Terra e dunque il moto apparente degli astri da Est verso Ovest, eseguendo un moto di rotazione in senso opposto a quello apparente del cielo.

In questo modo l'oggetto da osservare rimarrà sempre al centro del campo d'osservazione.

# Montatura per telescopi

Una montatura per essere considerata efficiente deve soddisfare i seguenti requisiti:

***MECCANICO***, la montatura deve essere rigida, esente da flessioni o vibrazioni, che mantenga una velocità costante nel suo moto di inseguimento. Deve essere costituita da una meccanica precisa ed esente da giochi meccanici che possano precludere la sua precisione.

***ELETTRONICO***, deve essere presente un controllo elettronico dei movimenti, in modo da poter gestire tramite una pulsantiera o un computer il puntamento e l'inseguimento dei corpi celesti.

***INFORMATICO***, il software che sia in grado di comunicare con l'elettronica e la meccanica dello strumento. Questo requisito consente non solo di puntare un oggetto, ma anche di annullare gli errori strumentali tramite correzioni del moto e persino la possibilità di gestire lo strumento via internet.

# Montatura per telescopi

Le montature per telescopi si dividono in due categorie principali:

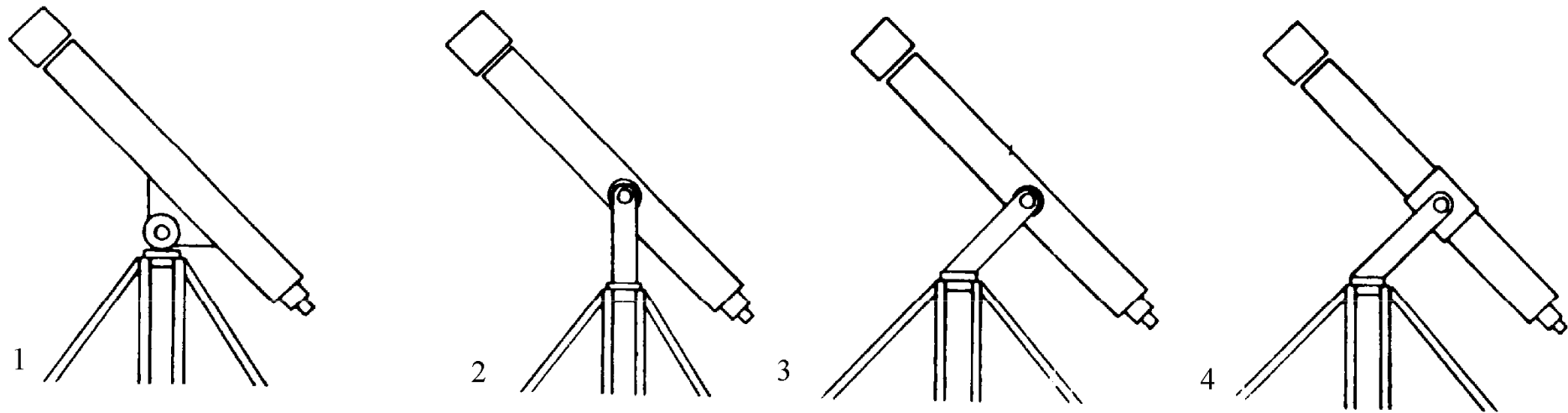
*montature altazimutali* e *montature equatoriali*.

## Montature altazimutali

È la montatura più semplice da costruire, costituita dal moto dei due assi principali azimut ed elevazione. Il telescopio, per mantenere l'oggetto osservato al centro del campo, deve eseguire dei moti nei due assi: l'orizzontale e il verticale. Inoltre è presente un altro inconveniente: la rotazione del campo. Tutto questo è risolto da un sistema di motori controllati da un computer, il quale provvede a mantenere sempre perfetto il puntamento. Questo tipo di montatura è utilizzato nei telescopi amatoriali più economici oppure per i telescopi professionali di grandi dimensioni, a causa della maggior semplicità e leggerezza della stessa: requisito indispensabile per sostenere specchi del diametro di alcuni metri, sorretti da strutture pesanti diverse tonnellate.



# Montatura per telescopi *montature altazimutali*



- 1) Montatura "a perno": la più semplice ed economica.
- 2) A forcella: il tubo mantiene il bilanciamento.
- 3) A forcella inclinata: permette il puntamento allo zenit.
- 4) A forcella inclinata con fascia: è possibile far scorrere il tubo avanti e indietro per il bilanciamento



# Montatura per telescopi

La generazione attuale di telescopi di 8-10 metri, ma anche quelli in progetto da 30 m e oltre usano montature altazimutali o, in alcuni casi, montature di derivazione altazimutale.



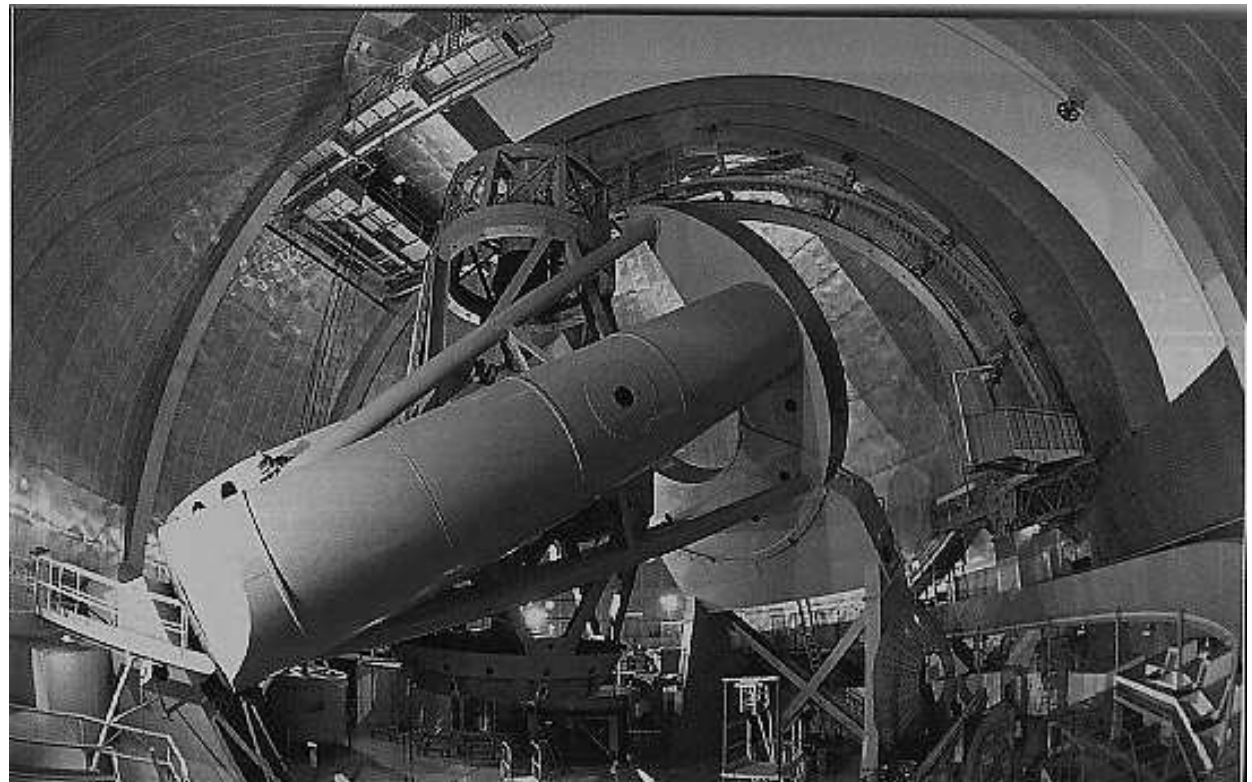
# Montatura per telescopi

## *Montature equatoriali*

Esistono diversi tipi di montature equatoriali, accomunati però dalla caratteristica fondamentale di avere uno degli assi di rotazione inclinato in funzione della latitudine del luogo. Questa inclinazione consente di "inseguire" i corpi celesti mediante un solo movimento, semplificando la modalità di inseguimento.



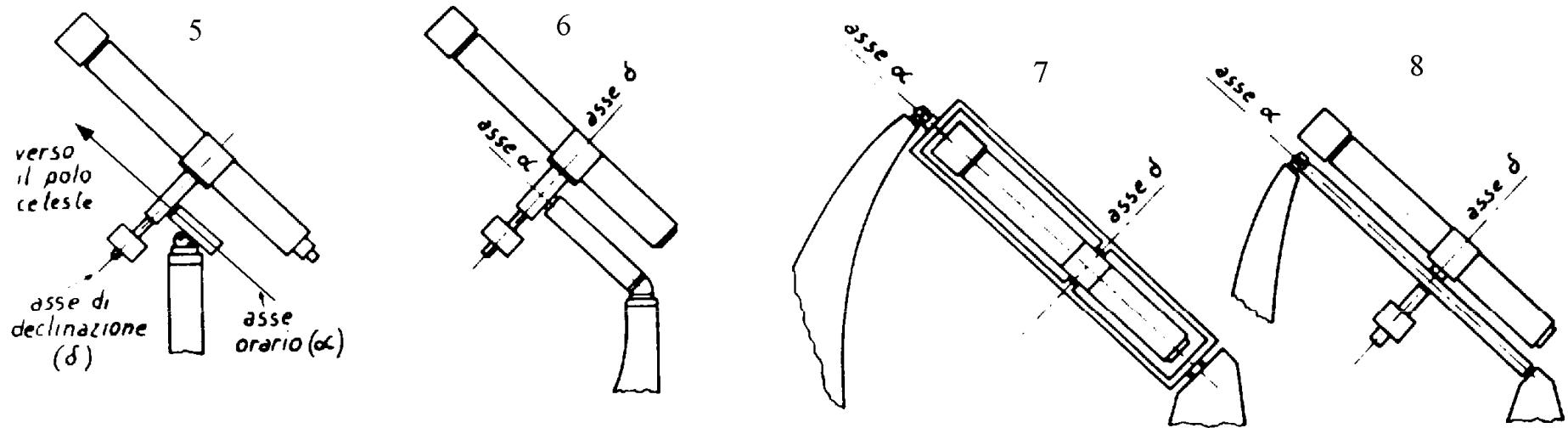
Il più grande telescopio a montatura equatoriale è il Telescopio Hale di Monte Palomar.





# Montatura per telescopi

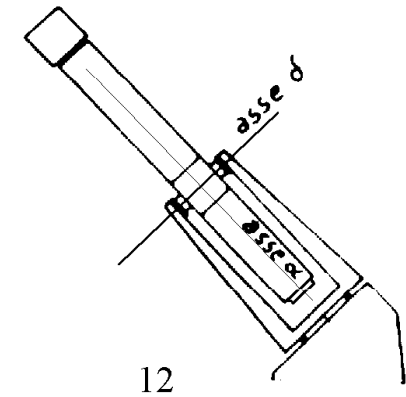
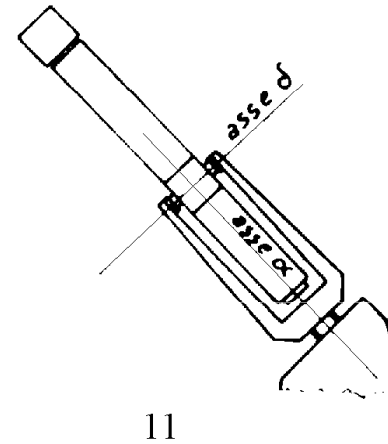
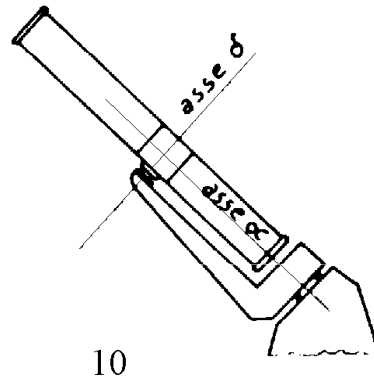
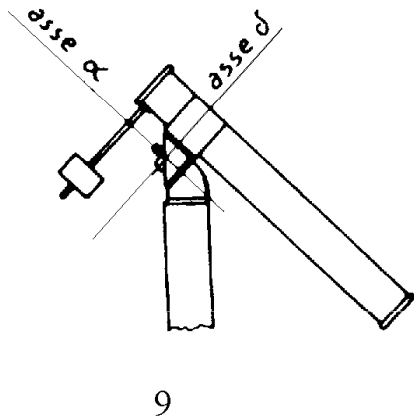
## **Montature equatoriali**



- 5) Montatura alla tedesca.
- 6) Montatura alla tedesca modificata.
- 7) Montatura a telaio (o inglese o a giogo o a culla).
- 8) Montatura inglese modificata

# Montatura per telescopi

## *Montature equatoriali*



- 9) Montatura Springfield.
- 10) Montatura con forcella ad un solo braccio.
- 11) Montatura a forcella.
- 12) montatura a disco polare.

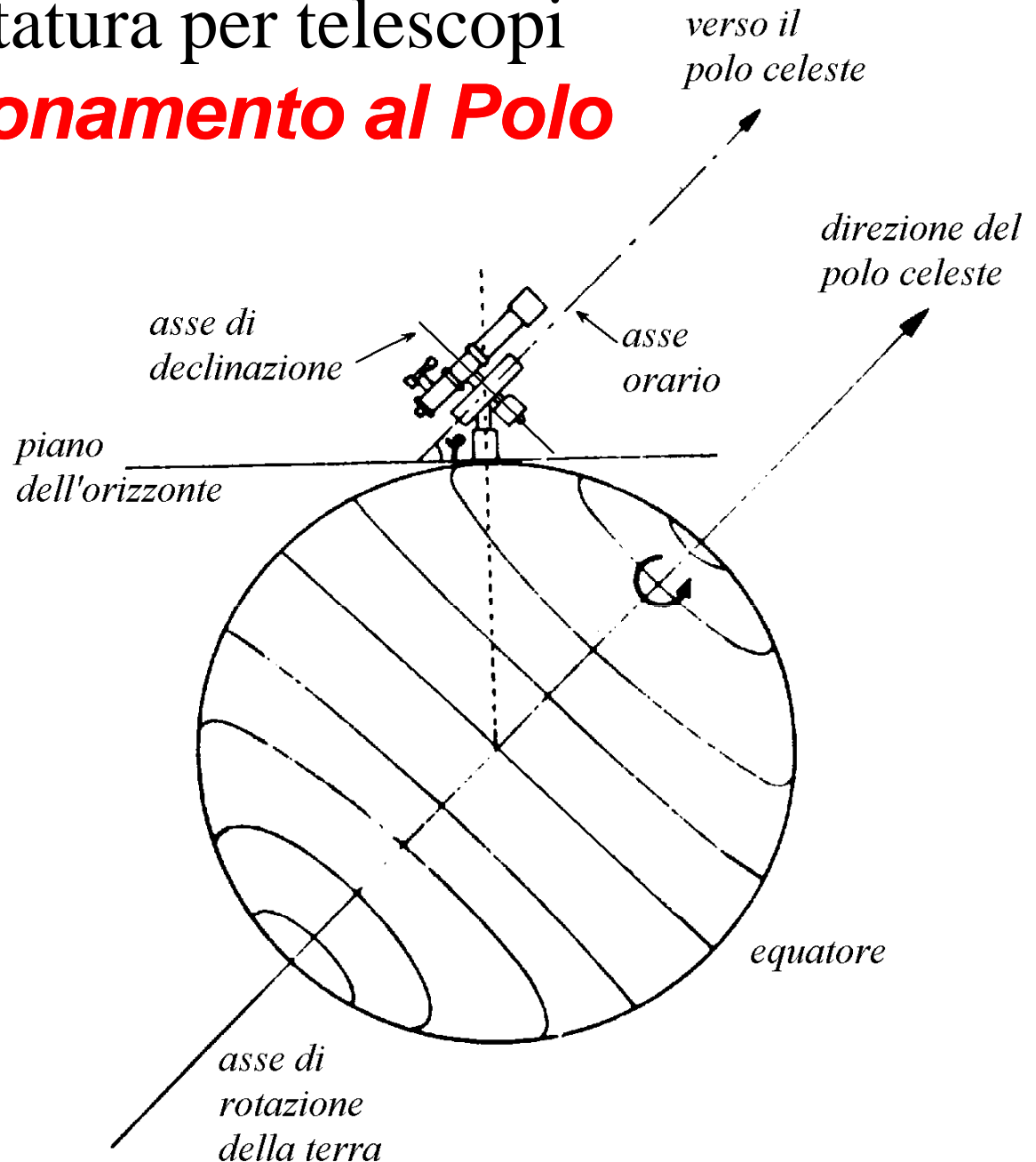
# Montatura per telescopi

## **Stazionamento al Polo**

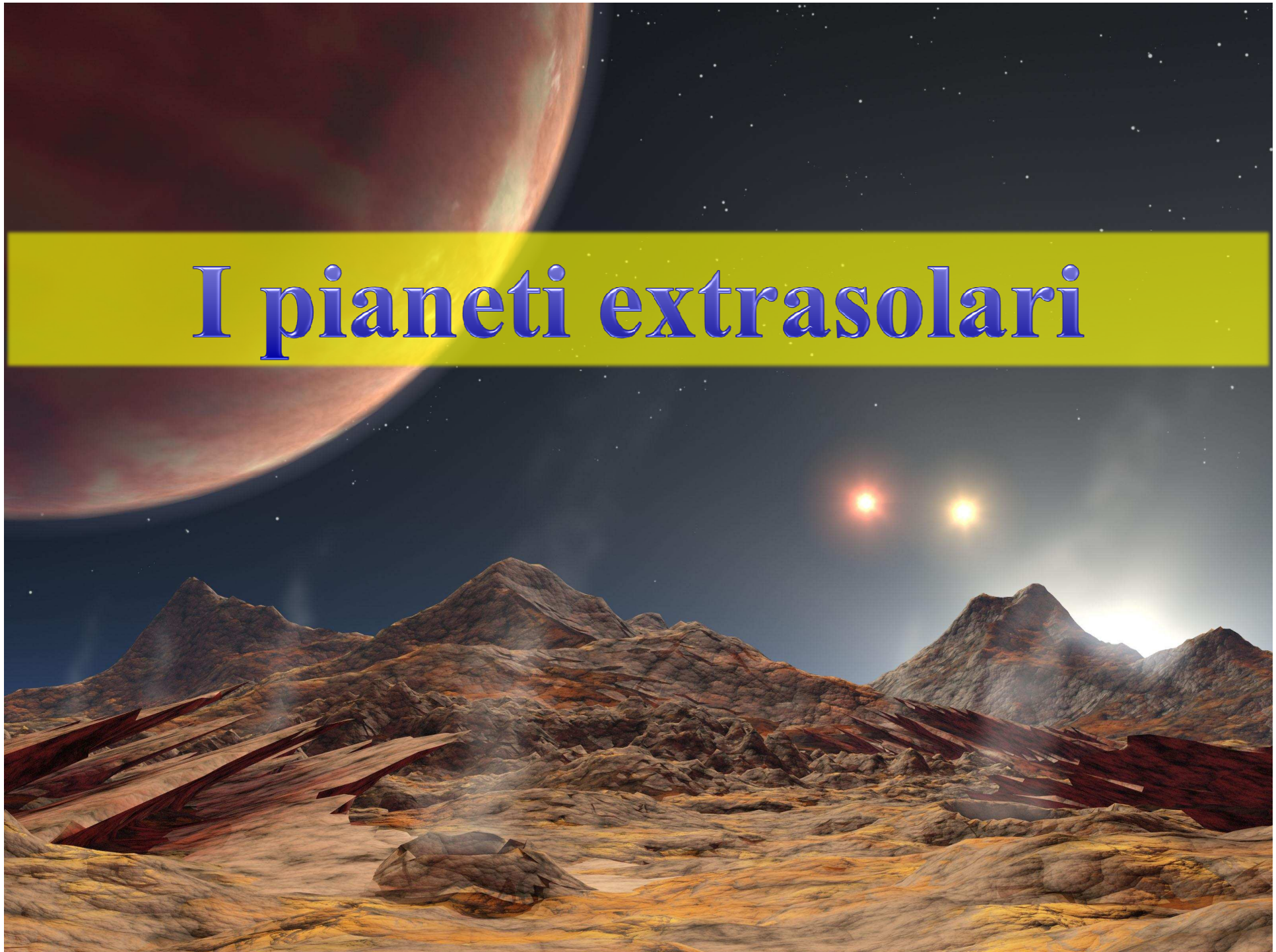
La messa in stazione di un telescopio consiste nel posizionarlo.

I telescopi con montatura equatoriale devono avere l'asse orario allineato al Polo Celeste.

Il problema maggiore legato ad uno stazionamento non ottimale è la rotazione di campo.



# I pianeti extrasolari



# I pianeti extrasolari

- Un po' di storia
- Tecniche per la rilevazione dei pianeti extrasolari
- Il metodo dei transiti

# Un po' di storia

## Che cos'è un pianeta?

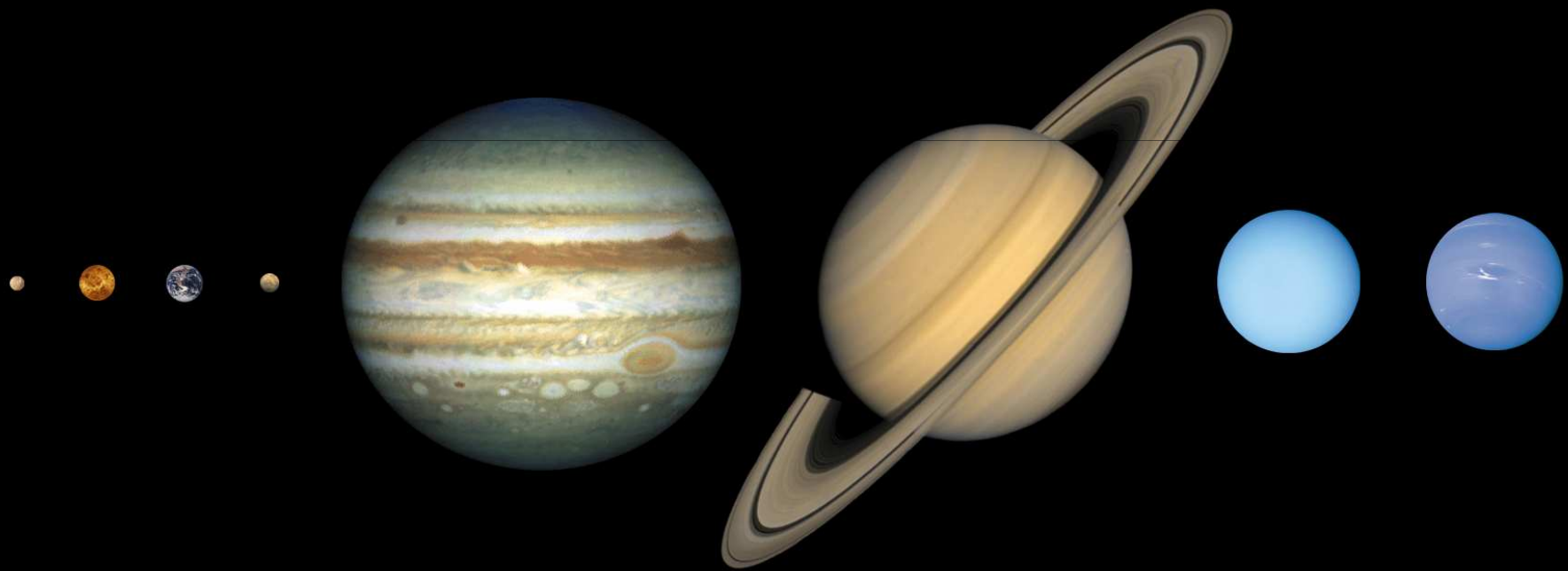
Pianeta viene dal greco e significa vagabondo; con questo termine venivano indicati quegli astri che si spostavano nel cielo rispetto alle stelle fisse, ovvero la Luna, il Sole, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Gli unici visibili a occhio nudo.

Il 24 agosto 2006 l'Assemblea Generale di Praga dell'*International Astronomical Union* (IAU) ha stabilito che un pianeta è un corpo celeste che:

- è in orbita intorno al Sole;*
- ha una massa sufficiente affinché possa assumere una forma quasi sferica;*
- ha “ripulito” le vicinanze intorno alla sua orbita.*

# Un po' di storia

I pianeti del Sistema Solare





# Un po' di storia

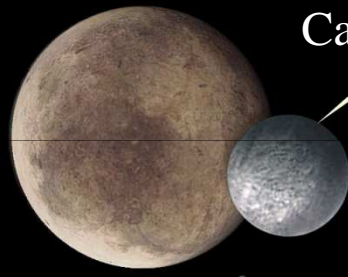
## I pianeti nani

Dysnomia



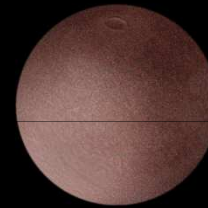
Eris

Caronte

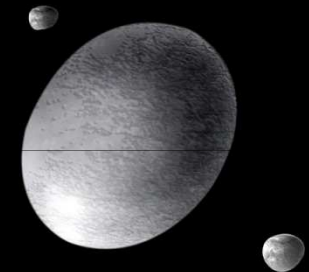


Plutone

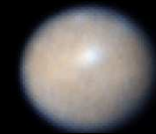
Makemake



Haumea



Cerere





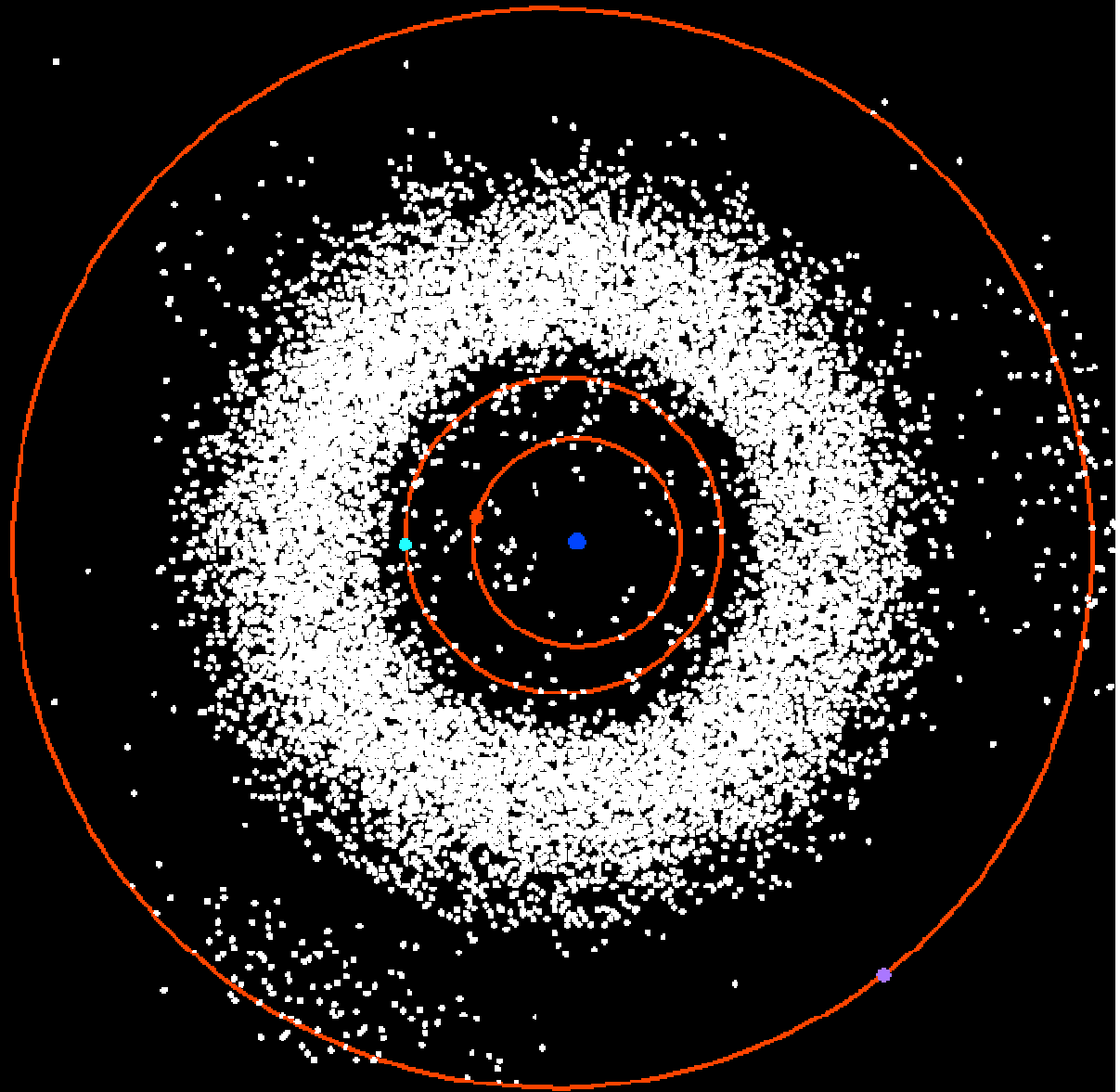
# Un po' di storia

## I Corpi Minori

Corpi minori sono tutti gli altri corpi del Sistema Solare.

Un gruppo importante di questi, detti asteroidi (o anche pianetini) si trova tra Marte e Giove.

Alcuni di essi hanno orbite che intersecano l'orbita della Terra.

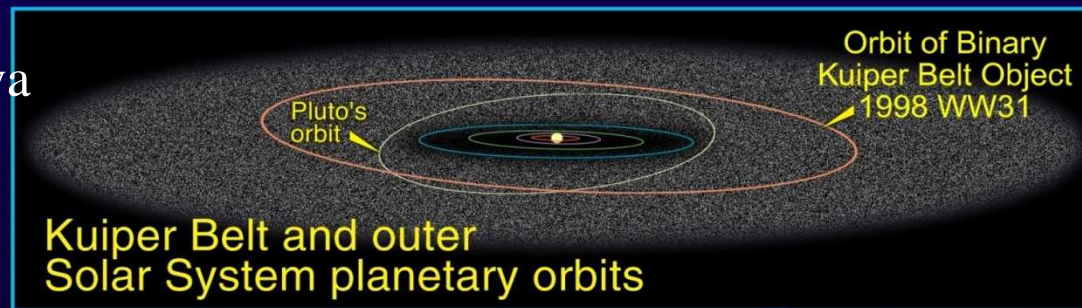


# Un po' di storia

## I Corpi Minori

Un altro importante gruppo di oggetti si trova oltre l'orbita di Nettuno (per questo sono detti **TNO = Trans-Neptunians Objects**)

Sono distribuiti in una struttura detta **cintura di Kuiper** e esternamente costituiscono la cosiddetta **nube di Oort** che si estende probabilmente fino a metà della distanza che separa il Sole dalla stella più vicina:  $\alpha$  Centauri



The Oort Cloud (comprising many billions of comets)

A large, spherical cloud of small white dots representing comets, surrounding the inner Solar System. A blue arrow points from the text box to the cloud.

Oort Cloud cutaway drawing adapted from Donald K. Yeoman's illustration (NASA, JPL)

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

I primi modelli di formazione del Sistema Solare cercarono innanzitutto di rendere conto, in modo qualitativo, dei principali dati osservativi riguardanti le orbite dei pianeti, le cui caratteristiche principali si possono così riassumere:

- si trovano approssimativamente nello stesso piano;
- sono praticamente circolari ;
- i pianeti ruotano nello stesso senso, che è pure quello di rotazione del Sole;
- le distanze eliocentriche obbediscono alla legge empirica di Titius-Bode.

Verso la fine del XIX secolo, inoltre, assunse molta rilevanza il problema del momento angolare: il Sole contiene il 99% della massa del Sistema Solare, ma possiede solo il 3% del momento angolare totale.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

Dalla metà del XX secolo le nuove teorie riguardanti la formazione stellare, insieme alla determinazione delle età dei vari corpi minori (come le meteoriti), fornirono nuovi elementi di riflessione per le nuove e più moderne teorie cosmogoniche.

Questo insieme di conoscenze portò a costruire diversi modelli, riassumibili in quattro teorie principali:

quella della *formazione turbolenta*,  
quella *mareale*,  
quella di *cattura*  
quella della *teoria nebulare*.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *I modelli basati sulla turbolenza*

René Descartes (1596-1650) fu il primo che cercò di dare una spiegazione scientifica dell'esistenza del Sistema Solare e che introdusse l'idea di evoluzione.

Nella sua opera *Teoria dei vortici* (1644), avanza l'ipotesi che l'Universo sia costituito da materia ed etere e sia pieno di vortici di diverse dimensioni.

Non è però chiaro il meccanismo fisico tramite il quale dai “vortici” si siano poi prodotti i pianeti.

Il modello è soltanto qualitativo ed uno dei suoi maggiori difetti è che non spiega la complanarità delle orbite planetarie: esso venne abbandonato dopo la scoperta delle leggi della gravità di Newton.

Il concetto di turbolenza fu però ripreso e riconsiderato da numerosi autori nel XX secolo (von Weizsäcker, ter Haar, Kuiper, Whipple e McCrea).

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *Le teorie mareali*

La prima versione della teoria si deve al conte di Buffon che ipotizzò che il materiale che ha formato i pianeti fosse stato “strappato” al Sole da una cometa entrata in collisione con esso, circa 70000 anni fa.

La credibilità di questa teoria era legata al fatto che, a quei tempi, la natura delle comete era completamente sconosciuta e che non si avevano criteri attendibili per una stima delle età dei corpi celesti.

Bickerton (1880) e Chamberlain (1901) sostituirono la cometa con una stella massiccia, rendendo l'ipotesi fisicamente verosimile.

Avvicinandosi al Sole la stella avrebbe strappato parte del suo materiale producendo filamenti con elevato momento angolare, che poi si sarebbero condensati sul piano dell'eclittica.

Rimane però difficile spiegare la formazione dei pianeti giganti esterni, anche se vengono risolte due delle maggiori obiezioni che hanno a lungo reso la vita difficile al modello originale di Kant e Laplace: il problema del momento angolare e la diversa composizione chimica dei pianeti rispetto al Sole.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *Le teorie di cattura*

Nel 1964 M. Woolfson presentò una variante dell'ipotesi mareale, detta teoria della cattura. Il materiale che ha formato i pianeti sarebbe il risultato dell'interazione mareale tra il Sole e una protostella, di massa ridotta e ancora in contrazione, che passò vicino alla nostra stella.

Neppure questa teoria gode di largo credito.

Le obiezioni più importanti (che mettono in difficoltà anche le teorie mareali) sono:

- a) il materiale caldo strappato al Sole si disperderebbe con grande facilità nello spazio anziché formare pianeti;
- b) incontri ravvicinati con stelle massicce sono rarissimi (e i sistemi planetari, a quanto pare, no);
- c) non si riesce a spiegare la presenza della nube di Oort e della fascia di Edgeworth-Kuiper;
- d) il fatto che Sole e pianeti abbiano la stessa età ( $4,55 \pm 0,05$  miliardi di anni) costituirebbe una coincidenza troppo speciale.



# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Nel 1755 il filosofo Immanuel Kant suggerì che il Sistema Solare si fosse formato dal collasso di una nube di gas. Nel 1796 il matematico P. S. de Laplace riprese l'idea dal punto di vista matematico, includendo anche l'effetto della rotazione. Nel 1854 R. Roche discusse il problema del momento angolare (non ancora del tutto risolto).

La rotazione fa appiattare la nube e si forma un disco, nel quale poi condensano i futuri pianeti.

La teoria spiegava tutti i dati osservativi conosciuti al suo tempo, e per questo ebbe da subito successo: nell'Ottocento conobbe un periodo di crisi, perché non riusciva (nella sua forma originale) a spiegare la distribuzione di momento angolare e le differenze di composizione chimica tra il Sole e i pianeti. Quest'ultima obiezione è ormai pienamente superata; per quanto riguarda il momento angolare, è ormai stato compreso il meccanismo fisico che consentito il suo trasferimento dal Sole verso l'esterno.

I dettagli del processo, tuttavia, non sono stati completamente chiariti a causa della sua enorme complessità..



# Un po' di storia

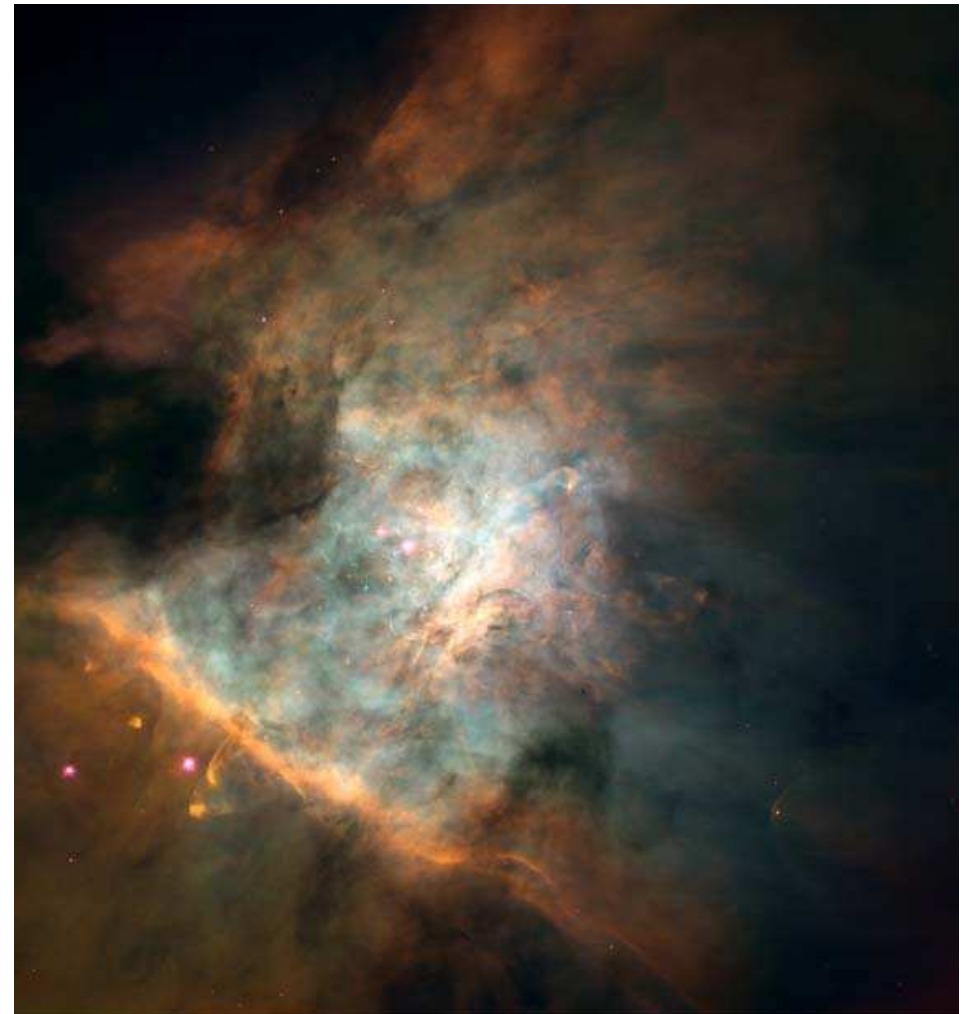
## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Riassumiamo i dettagli più significativi ipotizzati per il processo di formazione del Sistema Solare.

Nel centro del disco, tra 5 e 4,6 miliardi di anni fa, si è formato il Sole, con quasi tutta la massa della nube.

I pianeti nascono attraverso un processo molto complicato, in un'area estesa a gran parte del disco e su un periodo di tempo piuttosto lungo (da migliaia a milioni di anni, a seconda del pianeta).



*La nebulosa di Orione*

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Dapprima grani solidi di “polvere” si condensano dal gas nebulare, con un meccanismo chimico complesso: poi i grani si accrescono progressivamente dando vita ai planetesimi attraverso un processo ugualmente complicato, ma di tipo dinamico-collisionale.

Infine anche i planetesimi si urtano in modo catastrofico e si fondono: nascono i protopianeti, che inglobando il materiale residuo formano i pianeti.

Il parametro fondamentale per la condensazione è la temperatura: essa è naturalmente più alta verso il centro del disco, dove la protostella si sta formando, mentre diminuisce progressivamente andando verso l'esterno.

Dalla temperatura dipende il tipo di composti chimici che possono condensare dal gas.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Sotto i 2000 K circa condensano silicati e ossidi metallici: per la condensazione di composti organici e di ghiacci di vario tipo – di acqua, di metano, di ammoniaca, di azoto – bisogna scendere sotto i 270 K, fino verso lo zero assoluto.

Questa differenziazione chimica è alla base della dicotomia esistente tra i pianeti interni (o terrestri) e pianeti esterni (o gassosi).

I primi sono caratterizzati da: dimensioni ridotte (la Terra è il più grande), nuclei ferrosi, mantelli rocciosi, grande densità, crosta rocciosa solida e atmosfere sottili: i secondi hanno invece nucleo misto (roccia e ghiaccio), grandi dimensioni, densità bassa e atmosfere molto estese.

Il secondo gruppo si può ulteriormente suddividere: da una parte Giove e Saturno (più massicci), dall'altra Urano e Nettuno.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Si può scrivere un'equazione approssimata per l'andamento della temperatura, al variare della distanza, nella nebulosa protosolare:

$$T \text{ (K)} \simeq \frac{631}{R^{0,77}}$$

R è espresso in unità astronomiche (UA).

La zona della nebulosa dove il vapore acqueo può solidificare ( $T \leq 273 \text{ K}$ , cioè  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) si trova a circa 3 UA dal Sole (linea del ghiaccio), nella regione oggi occupata dalla fascia degli asteroidi.

A distanze maggiori i nuclei planetari si accrescono rapidamente (perché aumenta il materiale disponibile) e possono catturare anche il gas della nebulosa; ciò spiega le atmosfere di idrogeno ed elio dei pianeti gassosi – infatti il gas nebulare è composto quasi al 98% di questi gas.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Il processo di condensazione accresce la propria efficacia grazie ai grani di polvere. La “polvere” doveva probabilmente essere un insieme di silicati molto refrattari, grafite, composti metallici e forse altri composti organici complessi.

La fase successiva alla condensazione, detta accrescimento, è caratterizzata dalle collisioni tra grani, che aderiscono l'uno all'altro ingrandendosi progressivamente.

I meccanismi fisici sono due: *collisione geometrica* e *collisione gravitazionale*.

Nella prima l'accrescimento riguarda soltanto i grani che possono scontrarsi direttamente (il concetto portante è quello di sezione d'urto, cioè la superficie disponibile per un impatto: per un grano sferico di raggio  $r$  essa è l'area del cerchio massimo,  $\pi r^2$ ), mentre nella seconda l'influenza gravitazionale esercitata dalla particella è in grado di attirare anche del materiale che non le sarebbe finito direttamente addosso.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Poiché la gravità di un oggetto dipende dalla sua massa, la collisione gravitazionale è all'inizio trascurabile, ma non appena la massa dei grani cresce fino ad un certo valore critico di soglia, il meccanismo di cattura gravitazionale diventa dominante.

Una discussione matematica del modello mostra che, se abbiamo a che fare con particelle di raggio  $r$ , l'efficienza della collisione geometrica dipende da  $r^2$ , mentre quella della collisione gravitazionale dipende da  $r^4$ .

Il processo, di crescita esponenziale, porta in brevissimo tempo le dimensioni degli oggetti all'interno della nebulosa protosolare da un metro ad alcuni km: i cosiddetti *planetesimi*.

I planetesimi continuano ad accrescersi, sia per mutue collisioni sia per cattura di particelle più piccole e raggiungono dimensioni paragonabili a quelle della Luna o a anche di Marte: a questo punto sono diventati *protopianeti*.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Per i pianeti di tipo terrestre gli stadi finali dell'accrescimento devono essere violenti e drammatici.

I protopianeti hanno collisioni più rare rispetto agli stadi precedenti, ma catastrofiche: è solo attraverso tale processo che si possono formare pianeti come Venere o la Terra. Si ritiene che esistano alcune testimonianze residue di questa fase:

**a) Formazione della Luna** a causa dell'impatto di un protopianeta grande come Marte contro la Terra;

**b) Rotazione retrograda di Venere.** L'asse di rotazione di questo pianeta è inclinato di  $177,4^\circ$  sul piano orbitale, e il periodo di rotazione (243 giorni!) è più lungo del periodo di rivoluzione attorno al Sole (225 giorni). L'ipotesi più attendibile è che un impatto abbia rallentato la rotazione iniziale di Venere.

**c) Anomalie di Urano.** L'asse di rotazione è inclinato di  $97,9^\circ$  sul piano orbitale e questo potrebbe essere spiegato da un altro impatto:

**d) La "sottigliezza" del mantello di Mercurio.** Le misure di densità e del campo magnetico indicano che il nucleo di questo pianeta è sproporzionatamente grande e ciò potrebbe essere stato prodotto da un impatto.

# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

La fascia degli asteroidi comprende un enorme numero di corpi le cui dimensioni sono tipiche dei planetesimi: la loro evoluzione si è infatti arrestata allo stadio dell'accrescimento, perché Giove si è formato con grande rapidità (le grandi masse hanno un'evoluzione molto accelerata, perché catturano con maggiore efficacia) e ha perturbato le traiettorie dei planetesimi vicini ad esso, accelerandoli e innescando un meccanismo distruttivo di collisioni che ha frantumato gli asteroidi anziché aggregarli insieme. Il processo continua ancora oggi: la massa totale della fascia è stimata in circa  $5 \cdot 10^{21}$  kg, ovvero circa un quindicesimo della massa della Luna (rispetto all'inizio la fascia ha perso una parte notevole della sua massa).

I pianeti esterni devono essersi formati in maniera più semplice rispetto a quelli interni.

Le massicce quantità di ghiaccio disponibili oltre le 3 UA di distanza dal Sole si sono unite ai grani preesistenti in grandi nuclei misti (roccia + ghiaccio), capaci di catturare e trattenere grandi involucri di gas della nebulosa protosolare.



# Un po' di storia

## Come si è formato il Sistema Solare?

### *L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace*

Per Giove sono stati stimati i seguenti dati: massa del nucleo di roccia/ghiaccio: ~ 35 masse terrestri, massa totale del pianeta ~ 318 masse terrestri. Dunque la maggior parte della massa di Giove è nell'involuppo di idrogeno ed elio, e lo stesso vale per Saturno, Urano e Nettuno.

Va comunque detto che questo resta un punto debole del modello, perché il Sole all'inizio della sua vita ha attraversato una fase detta fase T-Tauri, caratterizzata da un vento stellare molto intenso e da una forte emissione ultravioletta; in tale situazione tutto il materiale non ancora aggregato nei pianeti doveva essere spazzato via dal Sistema Solare.

Il problema è che i modelli di evoluzione stellare prevedono che per il Sole la fase T-Tauri debba iniziare al massimo dieci milioni di anni dopo la sua formazione: come hanno fatto a formarsi Urano e Nettuno?

La domanda non ha ancora ottenuto una risposta convincente.

# Un po' di storia

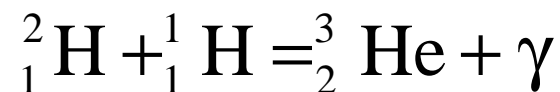
## Che cos'è un pianeta extrasolare?

Il *Working Group on Extrasolar Planets* (WGESP) dell'IAU dà la seguente definizione di pianeta extrasolare

(è una definizione di lavoro, quindi suscettibile a revisioni) :

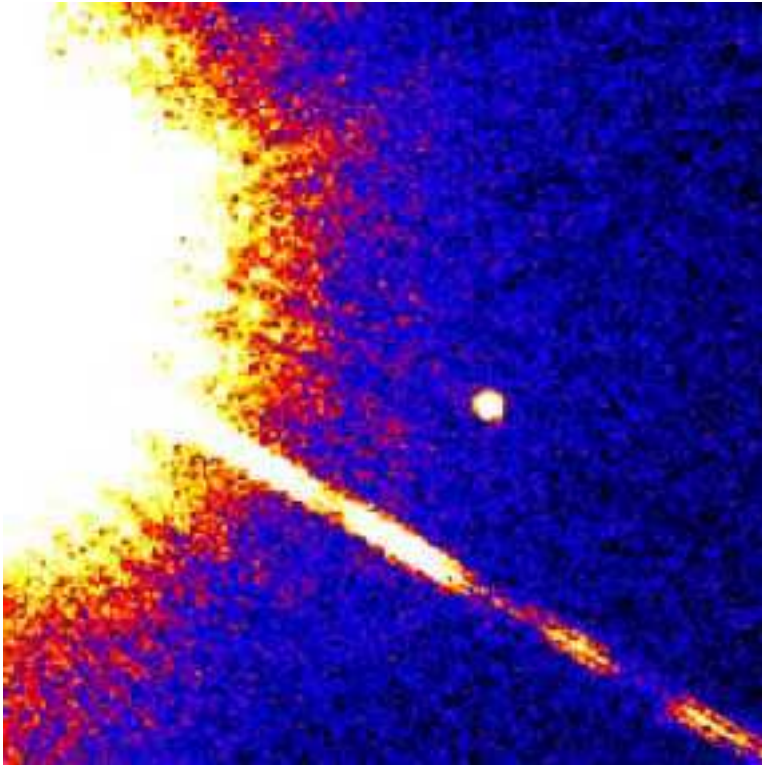
*Oggetti con massa inferiore alla massa limite per la fusione termonucleare del deuterio che orbitino intorno a stelle o resti di stelle (non importa come si siano formati) e superiore al minimo di massa che si usa nel Sistema Solare (Mercurio  $M=3.3 \cdot 10^{23}$  kg).*

Attualmente il limite per la fusione del deuterio è stimata pari a 13 volte la massa di Giove [ $M_J=1,9 \cdot 10^{27}$  kg] per gli oggetti di metallicità solare.



# Un po' di storia

Che cos'è un pianeta extrasolare?



*Gliese 229 A e B. A sinistra, molto più brillante, la nana rossa Gliese A, al centro la nana bruna Gliese B.*

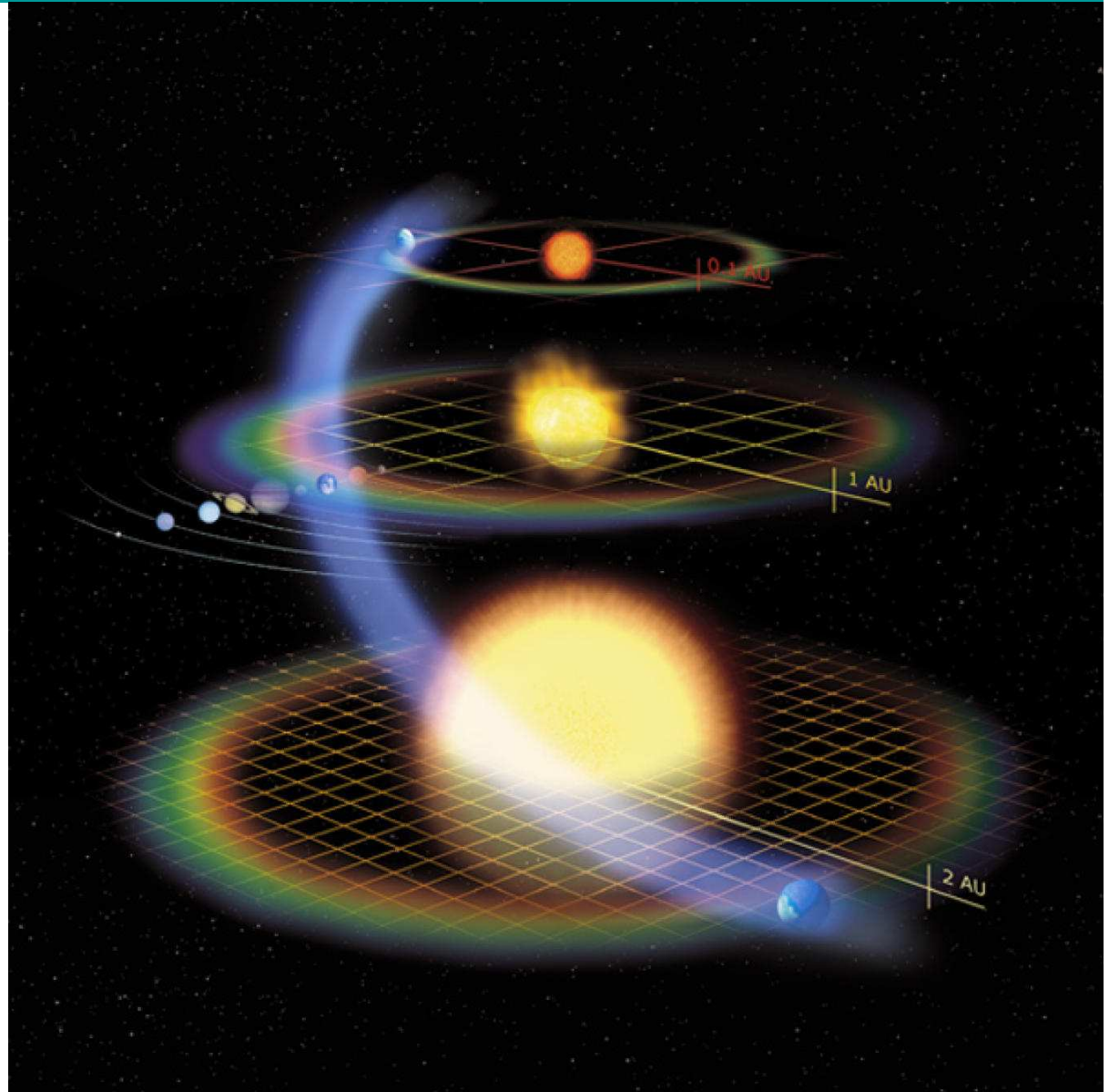
Oggetti con massa minore di  $70 M_J$  ( $\sim 7\% M_S$ ), ma superiore a  $13 M_J$  sono “nane brune”, non importa come si siano formate, nè dove si trovino.

Oggetti liberi in ammassi di stelle giovani con massa inferiore a  $13 M_J$  non sono pianeti, ma “sotto-nane brune”.

# Un po' di storia

## La zona di abitabilità

Nella ricerca di pianeti extrasolari riveste un particolare interesse quelli che si trovano nella cosiddetta *zona di abitabilità di un sistema planetario*, ossia nell'intervallo di distanze dalla stella in cui, su di un pianeta roccioso, è possibile trovare acqua allo stato liquido.



# Un po' di storia

## La zona di abitabilità

1959-1960	Huang	<b>Zona abitabile</b> : come la zona intorno ad una stella in cui può esistere un pianeta abitabile
1964	Dole	<b>Ecosfera</b> : zona intorno ad una stella entro cui su un pianeta almeno il 10% della superficie ha una
1966	Skhlovski & Sagan	Temperatura compresa tra i -10 e 30 C
1970	Rasool & DeBergh	
1978	Hart	<b>Zona abitabile</b> : come la zona intorno ad una stella in cui può esistere un pianeta sulla cui superficie si
1988	Kasting	abbia acqua liquida
1991	Whitmire	
1992	Fogg	<b>Zona Biocompatibile</b> : come la zona intorno ad una stella in cui può esistere un pianeta sulla cui superficie si abbia acqua liquida e <b>Zona Abitabile</b> quella compresa entro cui sia possibile la vita umana

# Un po' di storia

## La zona di abitabilità

### Definizioni:

- *Zona Abitabile (HZ)* – è la regione intorno ad una stella in cui un pianeta di tipo terrestre può mantenere, in qualche istante di tempo, l'acqua allo stato liquido.
- *Zona continuamente abitabile (CHZ)* – la regione in cui un pianeta può rimanere abitabile per uno specifico periodo di tempo (per esempio 4.6 Gy)

# Un po' di storia

La zona di abitabilità

Limiti della zona abitabile

$$\sqrt{\frac{L_{\text{stella}}}{1,1}} < d < \sqrt{\frac{L_{\text{stella}}}{0,53}}$$

( $d$  in UA)

Tom E. Morris  
Division of Natural Sciences  
Fullerton College, Fullerton, CA, USA  
<http://planetarybiology.com>  
[tmorris@fullcoll.edu](mailto:tmorris@fullcoll.edu)  
October 2010

# Un po' di storia

## Perché cercare pianeti extrasolari?

La ricerca dei pianeti extrasolari è una recentissima branca dell'astronomia che sta assumendo sempre più un ruolo fondamentale per le sue rilevanti implicazioni in ambito sia culturale sia filosofico.

È da lì che potrebbe giungere una risposta, forse in un futuro neppure troppo lontano, ad una delle domande cruciali per l'umanità:

*nell'Universo esistono altre forme di vita,  
altri mondi abitati?*



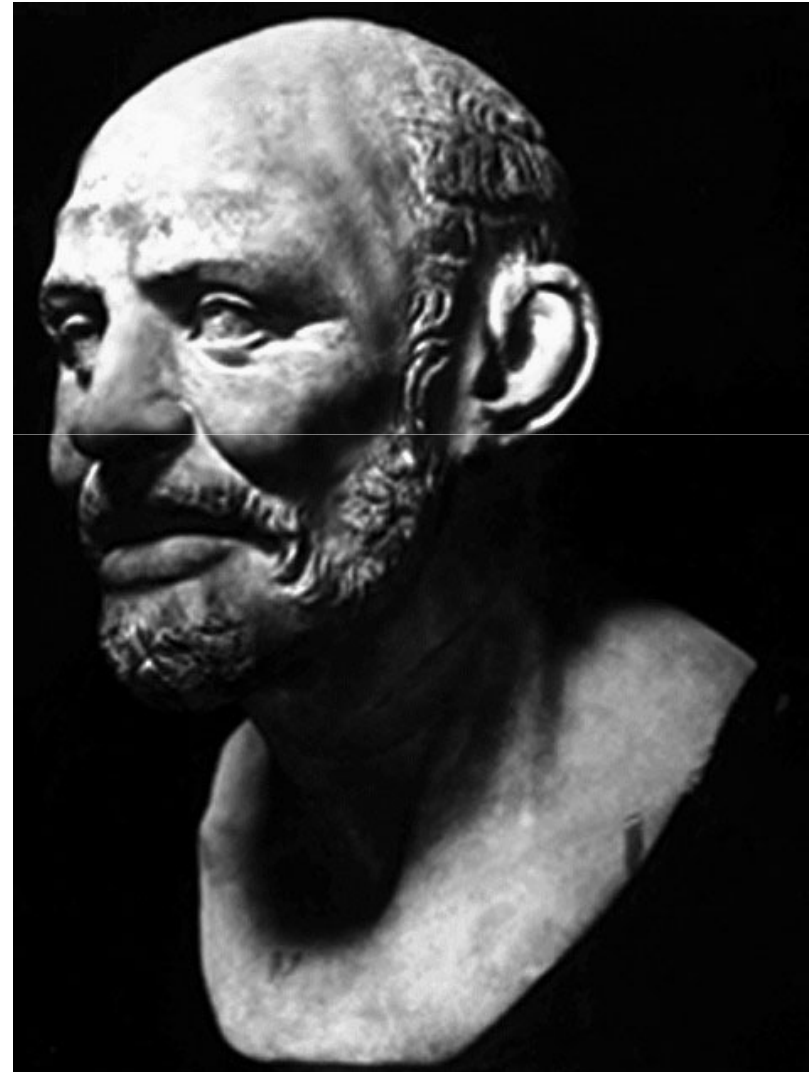
# Un po' di storia

## Gli inizi

*In alcuni mondi non ci sono né Sole né Luna, in altri essi sono più grandi che nel nostro, in altri più numerosi. [..]*

*Vi sono alcuni mondi privi di creature viventi o piante e di qualsiasi umidità.*

*Democrito ~460 - 370 a. C.*

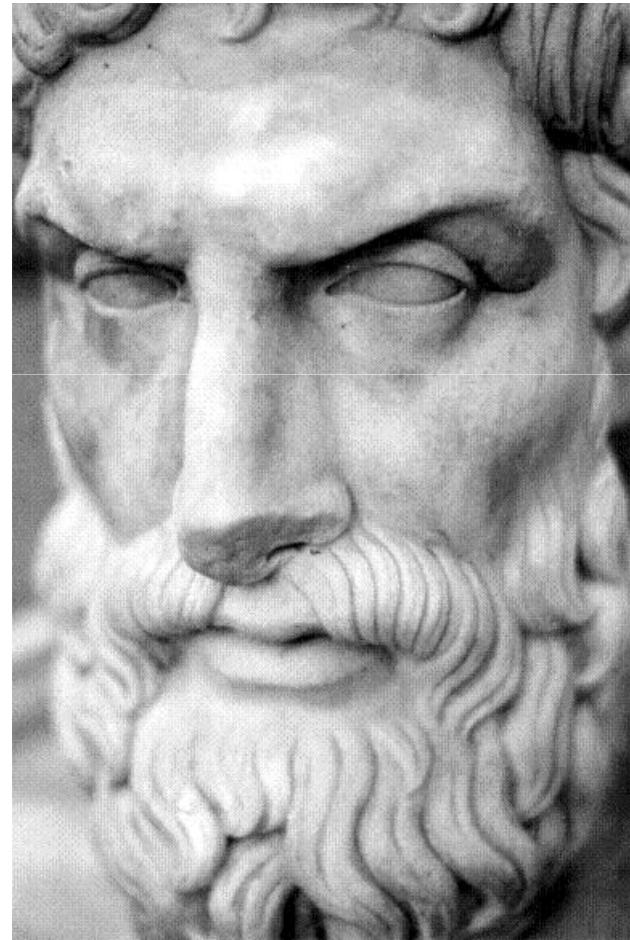


# Un po' di storia

## Gli inizi

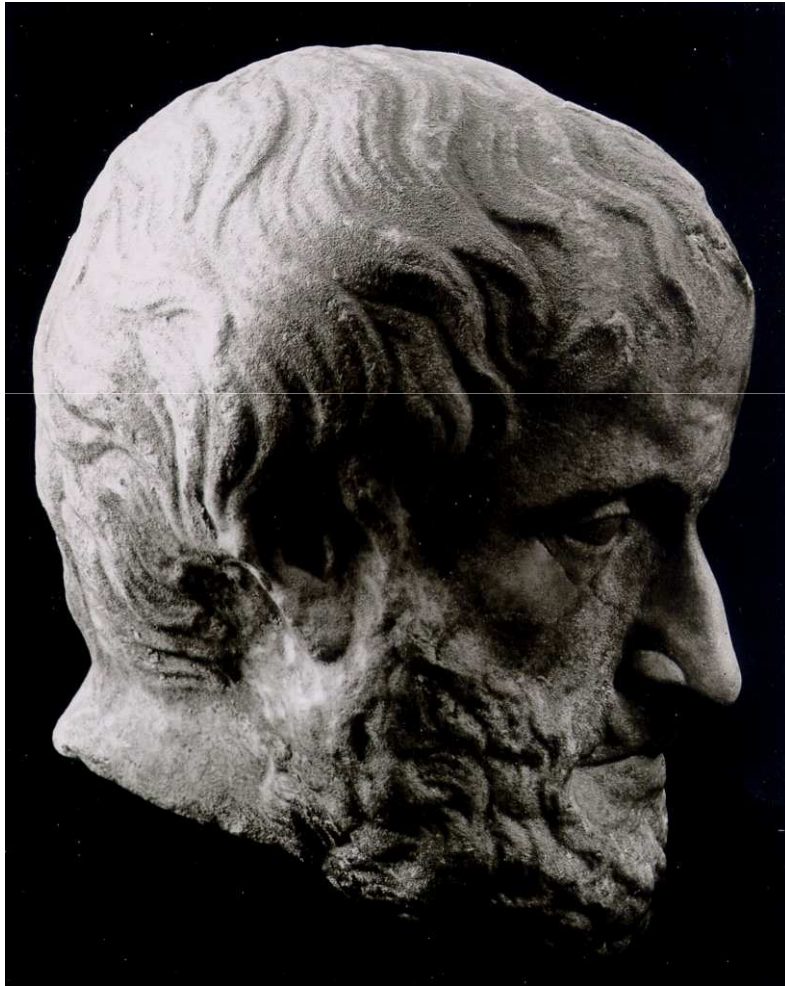
*Vi sono infiniti mondi, sia simili  
che differenti dal nostro. Poiché gli  
atomi sono infiniti in numero [...],  
non vi è ostacolo all'esistenza di  
infiniti mondi.*

*Epicuro 341 - 270 a. C.*



# Un po' di storia

Gli inizi



*Non possono esserci altri mondi  
oltre al nostro.*

*Aristotele 384 – 322 a.C.*

# Un po' di storia

## Gli inizi

*[...] Il solo infinito è perfetto e di esso nulla può essere più importante e migliore, il Dio come sola natura intera e universale.*

*Universo è sinonimo di verità, unità e bontà; per questo l'infinito viene chiamato universo. Dio è glorificato non in uno ma in innumerevoli Soli, non in un'unica Terra, ma in un'infinità di mondi.*

*Giordano Bruno (1548-1600)*



# Un po' di storia

## Gli inizi

[...]

*quante saranno le stelle e i loro mondi.*

*Giacomo Leopardi (1798 – 1837) – Operette  
moralì: Il Copernico*

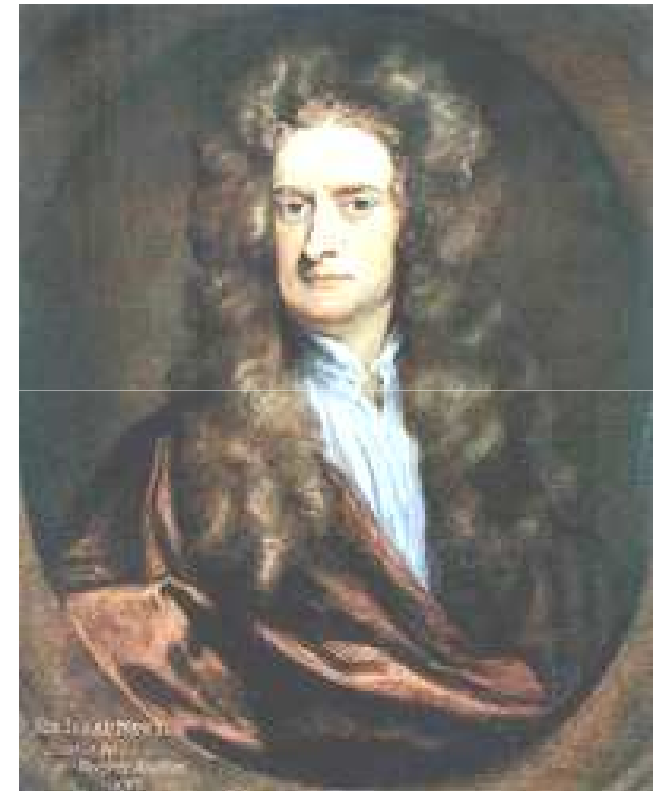


# Un po' di storia

## Gli inizi

Nel campo scientifico, anche Newton ipotizzava l'esistenza di esopianeti e la sua statura scientifica fu senz'altro uno stimolo per la loro ricerca.

Ma per tutto il XIX secolo vi furono solo falsi annunci di scoperte.



La ricerca scientifica dei pianeti extrasolari inizia nel XX secolo e porta a dei risultati solo nell'ultima dozzina di anni.



# Un po' di storia

Il XX secolo

Nel 1952, Otto Struve (1897 – 1963) accenna all'osservabilità dei pianeti extrasolari, immaginando sia il fenomeno dei transiti che l'osservazione delle velocità radiali.



# Un po' di storia

## Il XX secolo

### Previsioni di Otto Struve

(The Observatory, 72, 199-200 (1952))

#### PROPOSAL FOR A PROJECT OF HIGH-PRECISION STELLAR RADIAL VELOCITY WORK

By Otto Struve

With the completion of the great radial-velocity programmes of the major observatories, the impression seems to have gained ground that the measurement of Doppler displacements in stellar spectra is less important at the present time than it was prior to the completion of R. E. Wilson's new radial-velocity catalogue.

I believe that this impression is incorrect, and I should like to support my contention by presenting a proposal for the solution of a characteristic astrophysical problem.

One of the burning questions of astronomy deals with the frequency of planet-like bodies in the galaxy which belong to stars other than the Sun. K. A. Strand's<sup>1</sup> discovery of a planet-like companion in the system of 61 Cygni, which was recently confirmed by A. N. Deitch<sup>2</sup> at Poulkovo, and similar results announced for other stars by P. Van de Kamp<sup>3</sup> and D. Reuhl and E. Holmberg<sup>4</sup> have stimulated interest in this problem. I have suggested elsewhere that the absence of rapid axial rotation in all normal solar-type stars (the only rapidly-rotating G and K stars are either W Ursae Majoris binaries or T Tauri nebular variables,<sup>5</sup> or they possess peculiar spectra<sup>6</sup>) suggests that these stars have somehow converted their angular momentum of axial rotation into angular momentum of orbital motions of planets. Hence, there may be many objects of planet-like character in the galaxy.

But how should we proceed to detect them? The method of direct photography used by Strand is, of course, excellent for nearby binary systems, but it is quite limited in scope. There seems to be at present no way to discover objects of the mass and size of Jupiter; nor is there much hope that we could discover objects ten times as large in mass as Jupiter, if they are at distances of one or more astronomical units from their parent stars.

But there seems to be no compelling reason why the hypothetical stellar planets should be more numerous than is the case. It is possible that there are a few such planets around parent stars, but it is not possible to test whether there are any.

### Velocità Radiali

We know that stellar companions can exist at very small distances. It is not unreasonable that a planet might exist at a distance of 1/50 astronomical unit, or about 3,000,000 km. Its period around a star of solar mass would then be about 1 day.

We can write Kepler's third law in the form  $V^3 \sim \frac{1}{P}$ . Since the orbital velocity of the Earth is 30 km/sec, our hypothetical planet would have a velocity of roughly 200 km/sec. If the mass of this planet were equal to that of Jupiter, it would cause the observed radial velocity of the parent star to oscillate with a range of  $\pm 0.2$  km/sec—a quantity that might be just detectable with the most powerful Coudé spectrographs in existence. A planet ten times the mass of Jupiter would be very easy to detect, since it would cause the observed radial velocity of the star to oscillate with  $\pm 2$  km/sec. This is correct only for those orbits whose inclinations are  $90^\circ$ . But even for more moderate inclinations it should be possible, without much difficulty, to discover planets of 10 times the mass of Jupiter by the Doppler effect.

There would, of course, also be eclipses. Assuming that the mean density of the planet is five times that of the star (which may be optimistic for such a large planet) the projected eclipsed area is about 1/50th of that of the star, and the loss of light in stellar magnitudes is about 0.02. This, too, should be ascertainable by modern photoelectric methods, though the spectrographic test would probably be more accurate. The advantage of the photometric procedure would be its fainter limiting magnitude compared to that of the high-dispersion spectrographic technique.

Permitted transits of such planets would be a very convenient and reliable standard of velocity, and should help in establishing at once whether one (or both) members are spectroscopic binaries of the type here considered.

### Fenomeno dei Transiti

Berkeley Astronomical Department,  
University of California.  
1952 July 24.

#### References

1. *A. J.*, 51, 12, 1944; *Pub. A.S.P.*, 55, 29, 1952.
2. *Izvestia Gl. Astr. Obs., Poulkovo*, 18, No. 146, 1951.
3. *A. J.*, 51, 7, 1944.
4. *Ap. J.*, 97, 41, 1943.
5. See G. Herbig's paper presented at the Victoria 1952 meeting of the A.A.S. and A.S.P.
6. See P. W. Merrill's note on HD 117555 in *Pub. A.S.P.*, 60, 382, 1948.

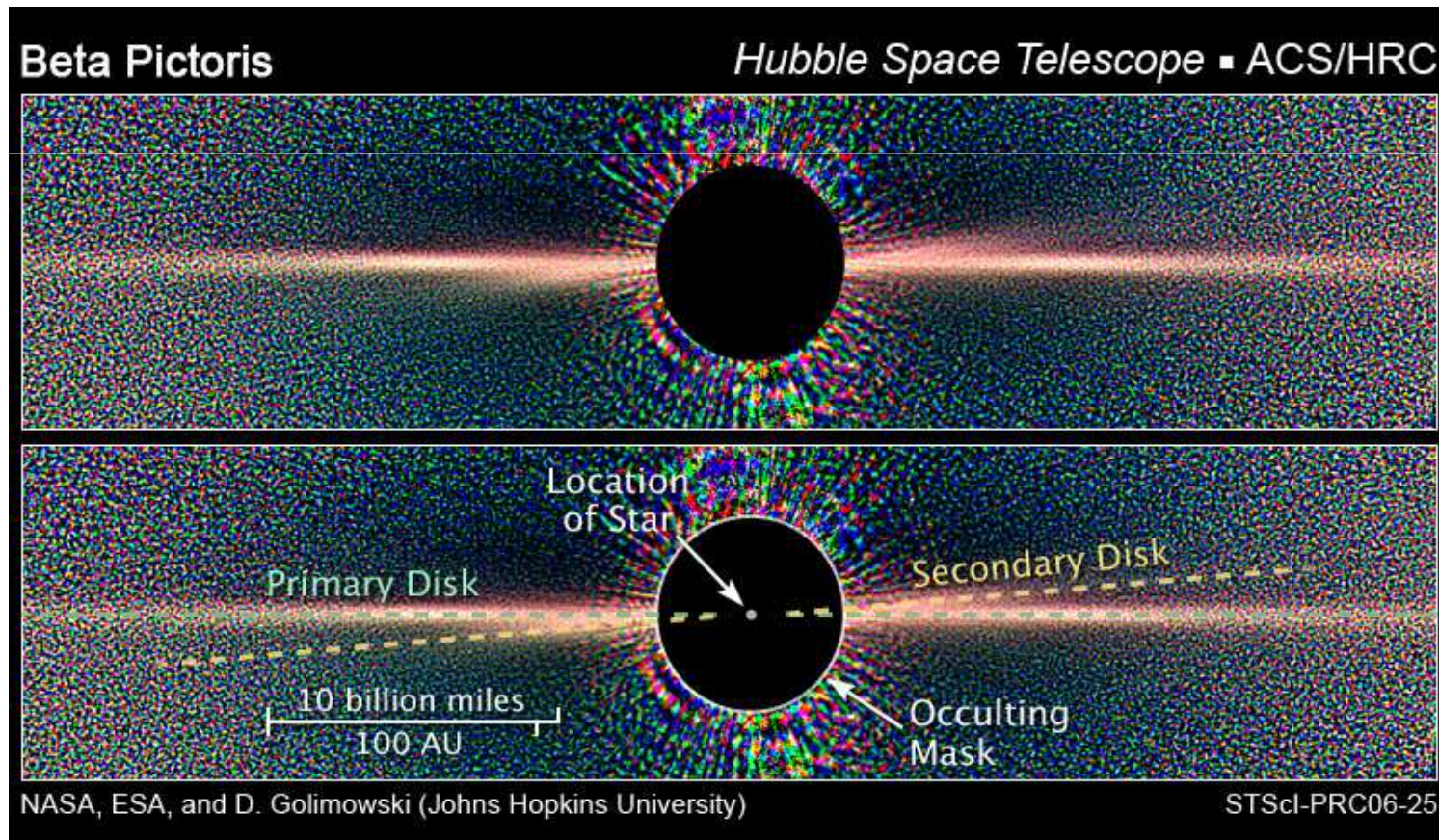


# Un po' di storia

Il XX secolo

Nel 1984 avviene la scoperta che inizia ad aprire un nuovo orizzonte:

*attorno alla stella  $\beta$  Pictoris c'è un disco di materia !*



# Un po' di storia

## Il XX secolo

Negli anni successivi vengono fatti diversi annunci di scoperte.

Nel 1989 Latham scopre un corpo di massa non inferiore a  $11 M_J$  in orbita attorno alla stella HD 114762.

Nel 1991 Alexander Wolszczan e Dale Frail identificano due pianeti di massa paragonabile alla massa terrestre, ma in orbita attorno ad una pulsar (PSR 1257+12).

Nel 1993 Gordon Walker sostiene l'ipotesi che le oscillazioni della velocità radiale della stella  $\gamma$  Cephei potrebbero essere dovute alla presenza un pianeta di circa  $2 M_J$ .

Sono troppo “strani” e le tecniche ancora non sufficientemente precise; la comunità scientifica non prende troppo sul serio questi eventi.

# Un po' di storia

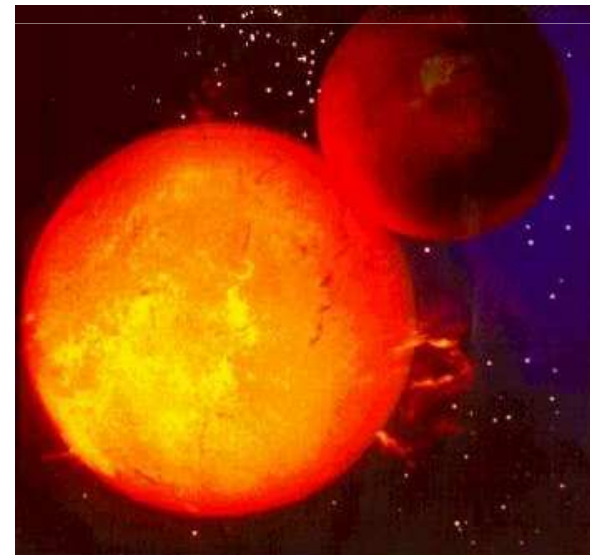
Il XX secolo

Il 6 ottobre 1995, a Firenze, venne annunciata la scoperta di un pianeta attorno alla stella 51 Pegasi, molto simile al Sole, distante 50 anni luce.

Il pianeta è circa 160 volte più massiccio della Terra e orbita attorno alla sua stella in poco più di 4 giorni a 7,5 milioni di km.



*Gli scopritori: Michel Mayor e Didier Queloz dell'Osservatorio di Ginevra*



*Rappresentazione artistica di 51 Pegasi*

# Un po' di storia

Oggi

Il 6 ottobre 1995 può essere considerata la data che ha segnato l'inizio della ricerca sistematica e convinta di pianeti extrasolari.

Anche se qualcosa si era già trovato prima.

*Al 22 maggio 2017 , sono confermati 3610 pianeti  
extrasolari intorno a 2704 stelle.*

*610 sono sistemi multipli.*

*Più 2410 pianeti in 2238 sistemi planetari di cui 148  
multipli da confermare*

[[exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)]

# Un po' di storia

ANNO DELLA SCOPERTA	METODI							TOTALE PIANETI	SISTEMI	SISTEMI MULTIPLI
	Transito	Velocità radiale	Microlensing	Pulsar	Imaging	Astrometry	TTV			
1988	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
1989	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
1990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	3	0	0	0	3	1	1
1993	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1995	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
1996	0	6	0	1	0	0	0	7	7	0
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	0	8	0	0	0	0	0	8	6	2
1999	1	10	0	0	0	0	0	11	10	1
2000	0	19	0	1	0	0	0	20	19	1
2001	1	12	0	0	0	0	0	13	13	0
2002	1	29	0	0	0	0	0	30	29	1
2003	0	26	0	1	0	0	0	27	25	2
2004	7	22	1	0	1	0	0	31	30	1
2005	2	25	3	0	3	0	0	33	32	1
2006	7	21	0	0	1	0	0	29	26	2
2007	18	38	0	1	3	0	0	60	58	2
2008	17	31	5	1	7	0	0	61	51	7
2009	10	67	1	2	3	0	0	83	73	9
2010	51	53	2	1	8	1	0	116	104	7
2011	79	96	1	6	9	0	0	191	152	25
2012	107	35	6	1	2	0	1	152	106	36
2013	127	40	8	0	14	0	0	189	136	37
2014	771	52	7	3	4	0	3	840	407	313
2015	97	38	8	1	8	0	3	153	115	23
2016	1374	64	10	1	8	0	1	1465	1373	78
2017	15	16	5	0	1	0	0	37	29	5
	2685	710	57	24	72	1	8	3562	2805	554



# Tecniche per la rilevazione

## Metodi

***DIRETTI*** (82)

***OSSERVAZIONE DIRETTA*** (82)

***INDIRETTI*** (3538)

***METODI DINAMICI:*** – Metodo astrometrico (1)  
– Metodo della velocità radiale (712)  
– Metodo del Pulsar Timing (24)

***METODI FOTOMETRICI:*** – Metodo di microlensing (56)  
– Metodo del transito (2719)  
– Metodo TTV (8)

***METODI ALTERNATIVI:*** (18) – Tracce di dischi di polveri  
– Emissione radio  
– Emissione di onde gravitazionali



# Tecniche per la rilevazione

## Metodi diretti

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

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

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

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

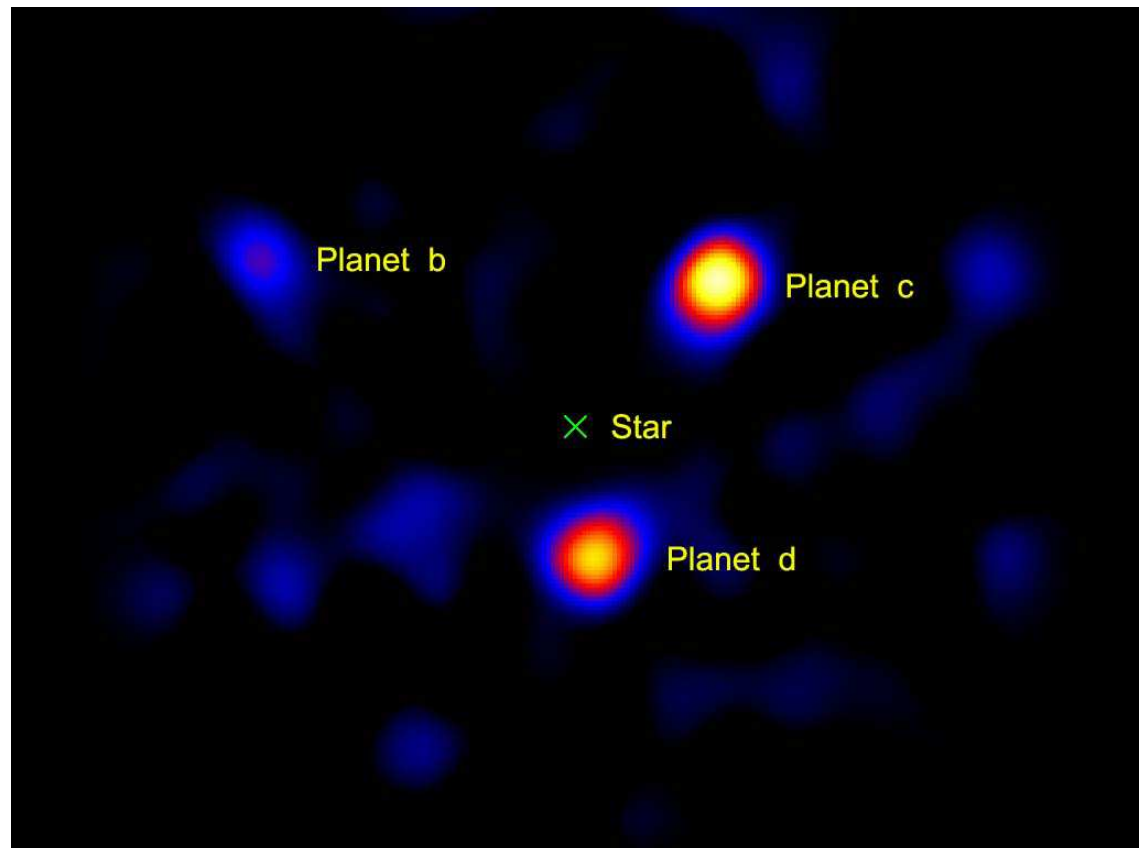


# Tecniche per la rilevazione

## Metodi diretti

È estremamente difficile con i telescopi attuali riuscire a vedere direttamente un pianeta intorno ad una stella perché questa è molto più luminosa del pianeta.

*A circa 16 anni  
luce di distanza, il  
Sole è un  
miliardo di volte  
più luminoso di  
Giove.*



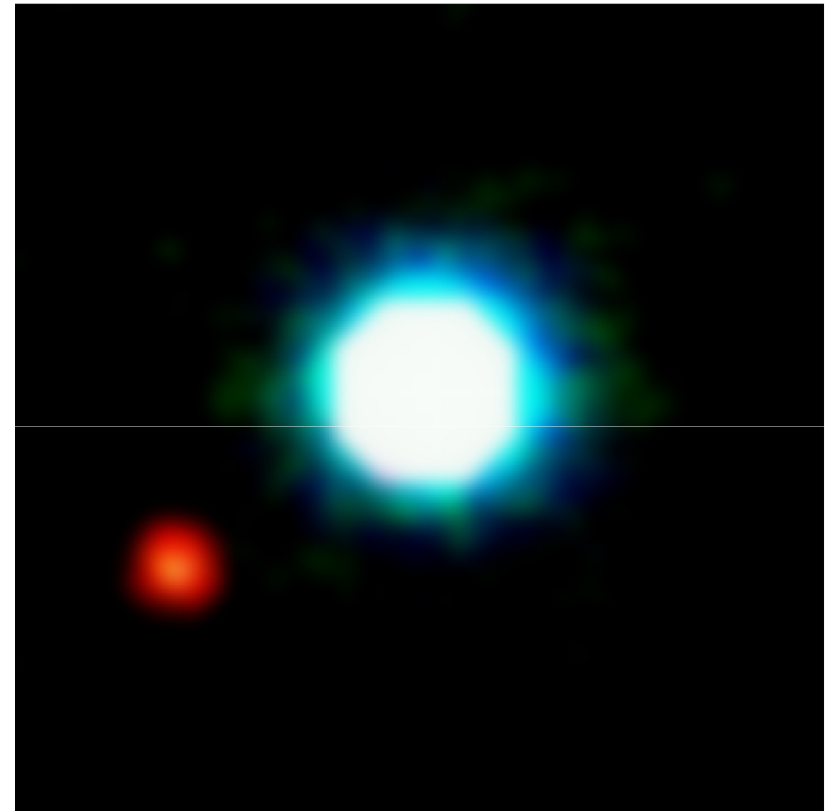
# Tecniche per la rilevazione

## Metodi diretti

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

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

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



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

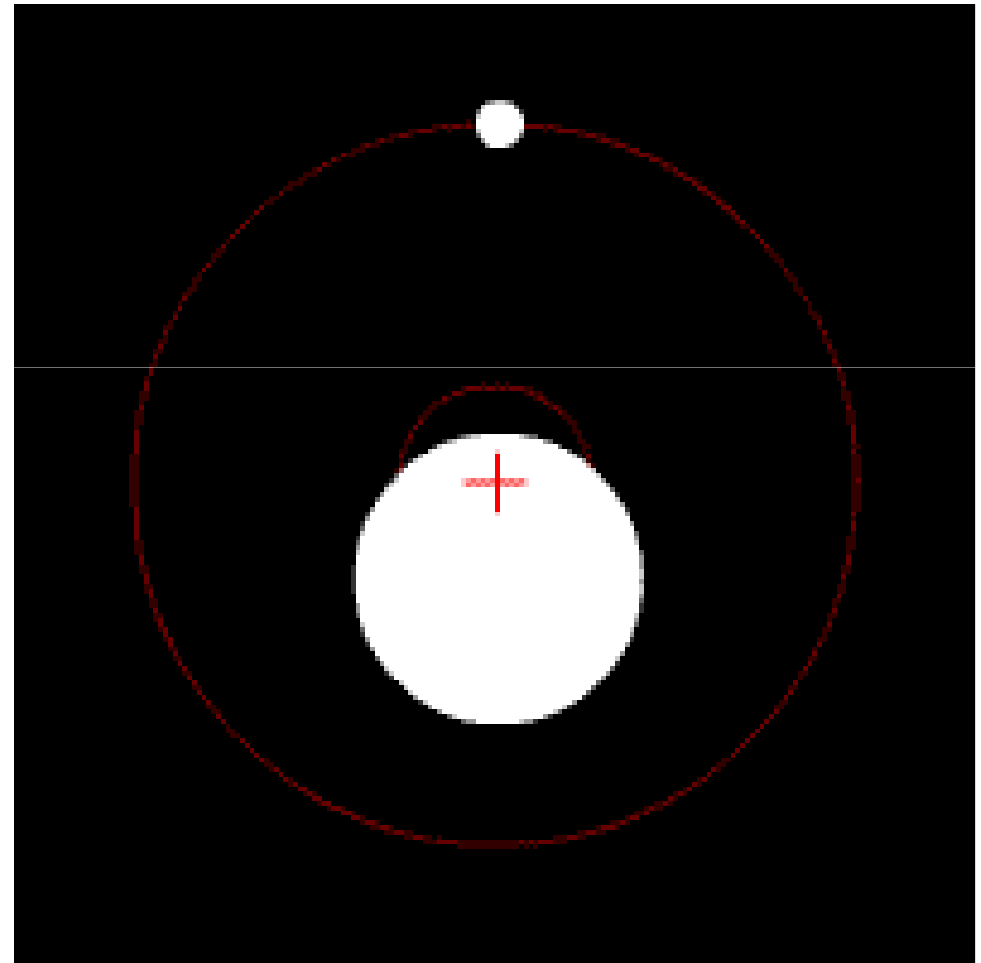
*La stragrande maggioranza dei pianeti extrasolari viene scoperta con metodi indiretti*

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

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

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



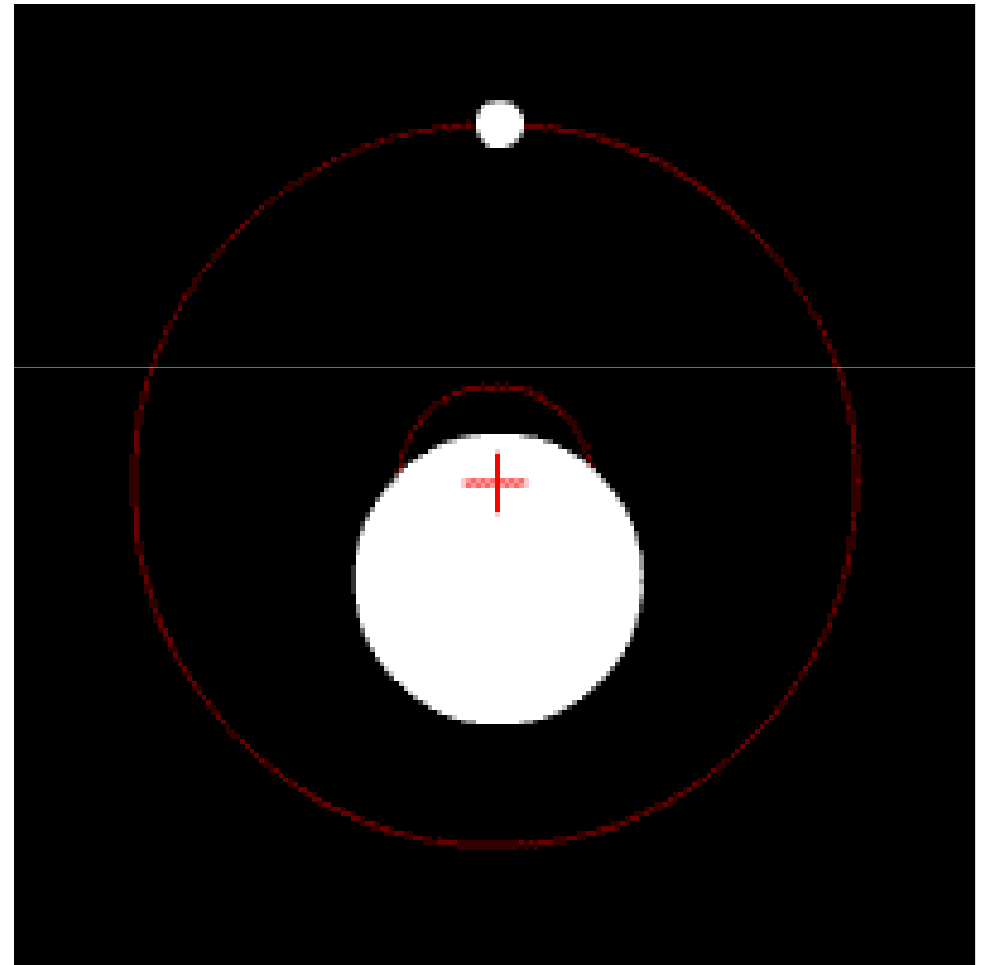
# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

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

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

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



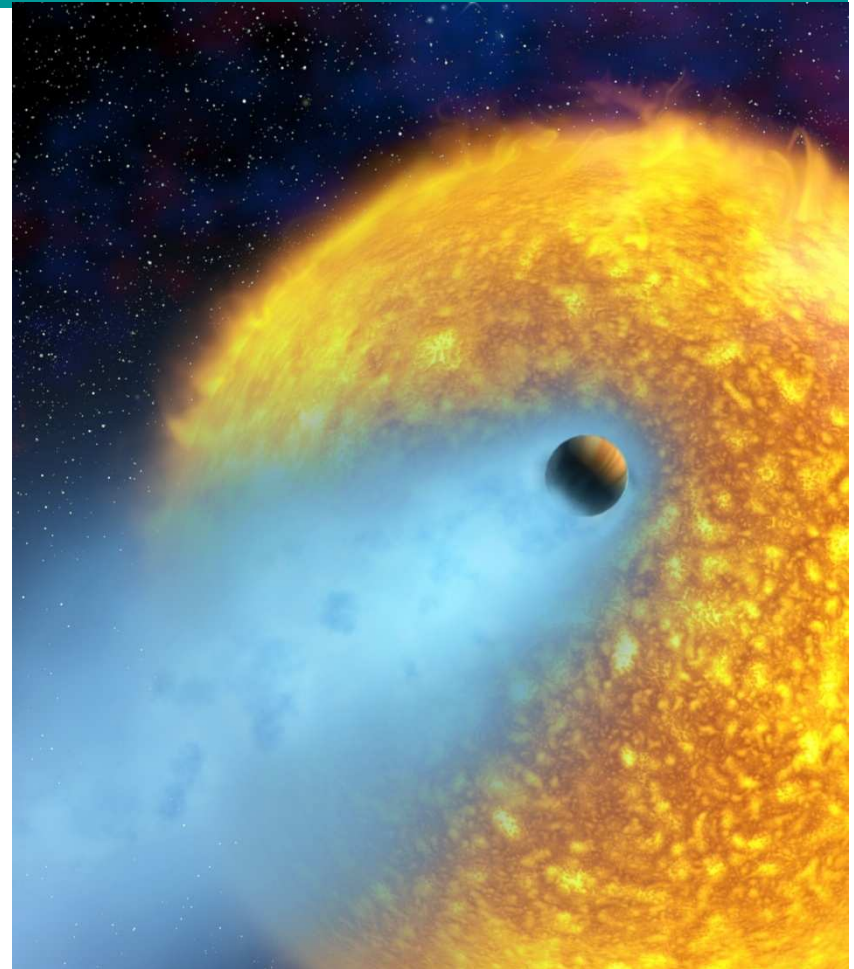
# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

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

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

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



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

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo astrometrico

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

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

La sonda è stata lanciata il 19 dicembre 2013.

Il satellite occupa un'orbita attorno a L2.



*Rappresentazione artistica della missione dell'ESA GAIA*

# Tecniche per la rilevazione

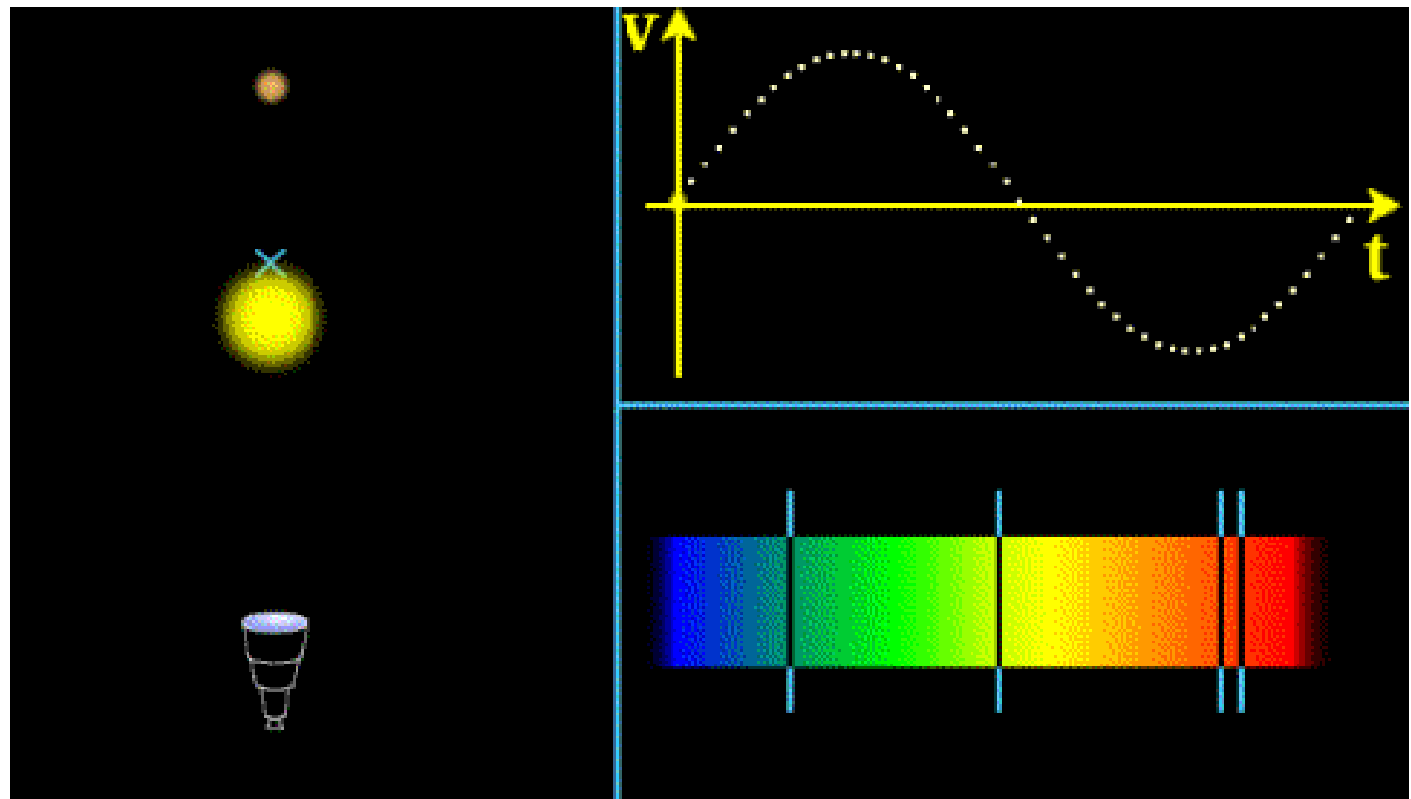
## Metodo della velocità radiale

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

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

*Gli spostamenti dello spettro sono molto piccoli!*

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

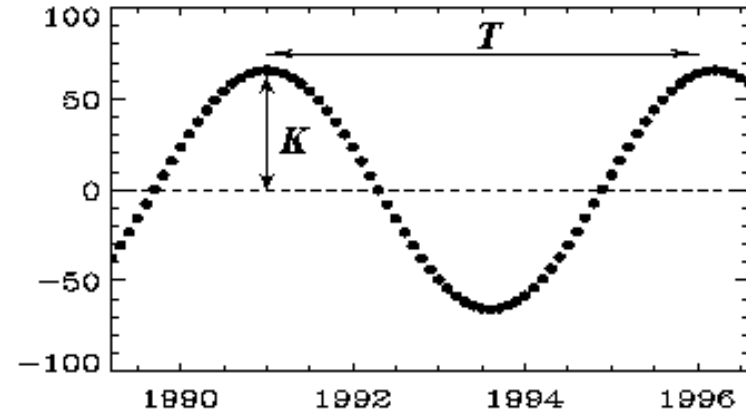




# Tecniche per la rilevazione

## Metodo della velocità radiale

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



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

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



# Tecniche per la rilevazione

## Metodo della velocità radiale

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

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

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

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo della velocità radiale

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

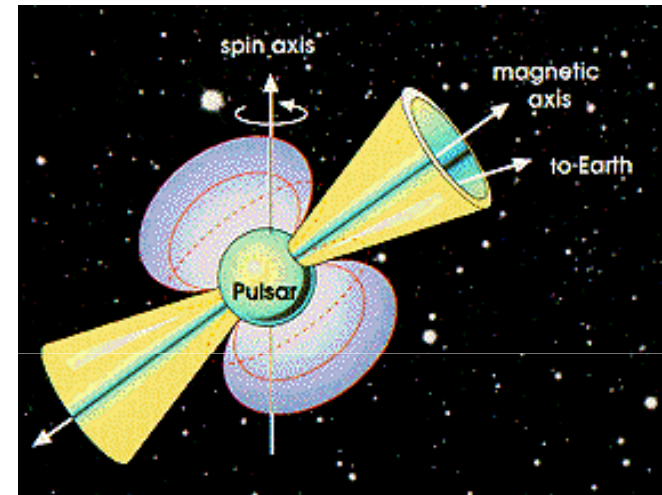
- la velocità del centro di massa del sistema (detta *velocità sistemica*)
- la semiampiezza della velocità
- il periodo orbitale (e quindi il semiasse maggiore)
- l'epoca del passaggio al periastro
- l'eccentricità
- l'argomento del periastro.

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo del Pulsar Timing

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

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



Essenzialmente esistono due tipi di pulsar:

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

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo del Pulsar Timing

Le Millisecond Pulsar hanno un periodo di rotazione oltre che molto breve anche molto stabile nel tempo. L'ordine di variazione è di un secondo in  $10^{19}$  s, contro i  $10^{15}$  delle Normal Pulsar.

Piccole anomalie negli intervalli delle emissioni possono essere usate per tracciare cambiamenti nel moto della pulsar, causati dalla presenza di uno o più pianeti.

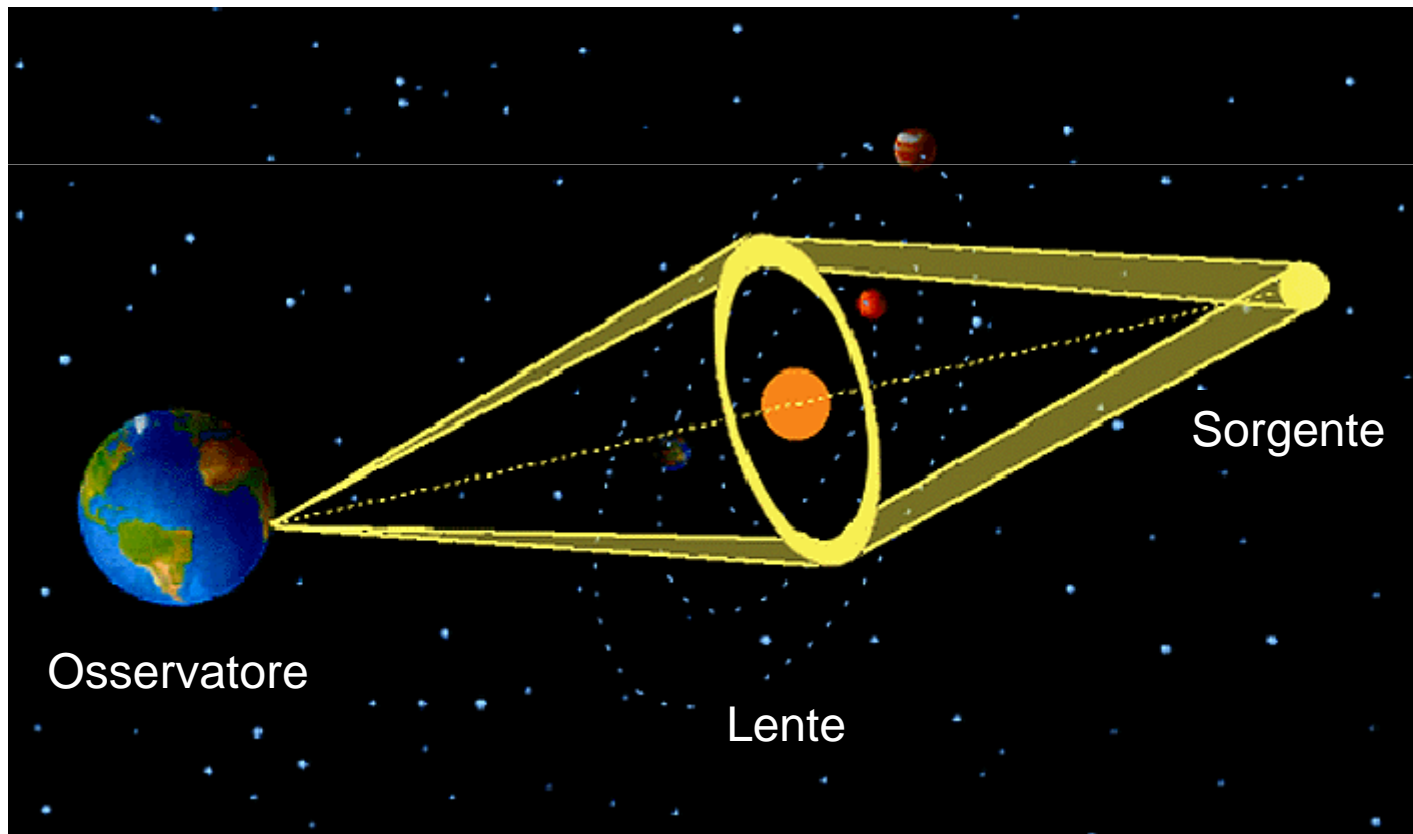
Grazie alla precisione delle attuali misure nelle radiofrequenze si può apprezzare una variazione della frequenza d'arrivo dell'ordine  $\Delta v/v \approx 10^{-11}$  che equivale ad una velocità radiale di 1 cm/s.

Ciò permette di rilevare pianeti con masse inferiori a quelle della Terra.

# Tecniche per la rilevazione

## Metodo di microlensing

Quando la luce proveniente da una stella lontana passa in prossimità di una stella più vicina viene incurvata producendo un aumento di luminosità (*effetto lente gravitazionale*).

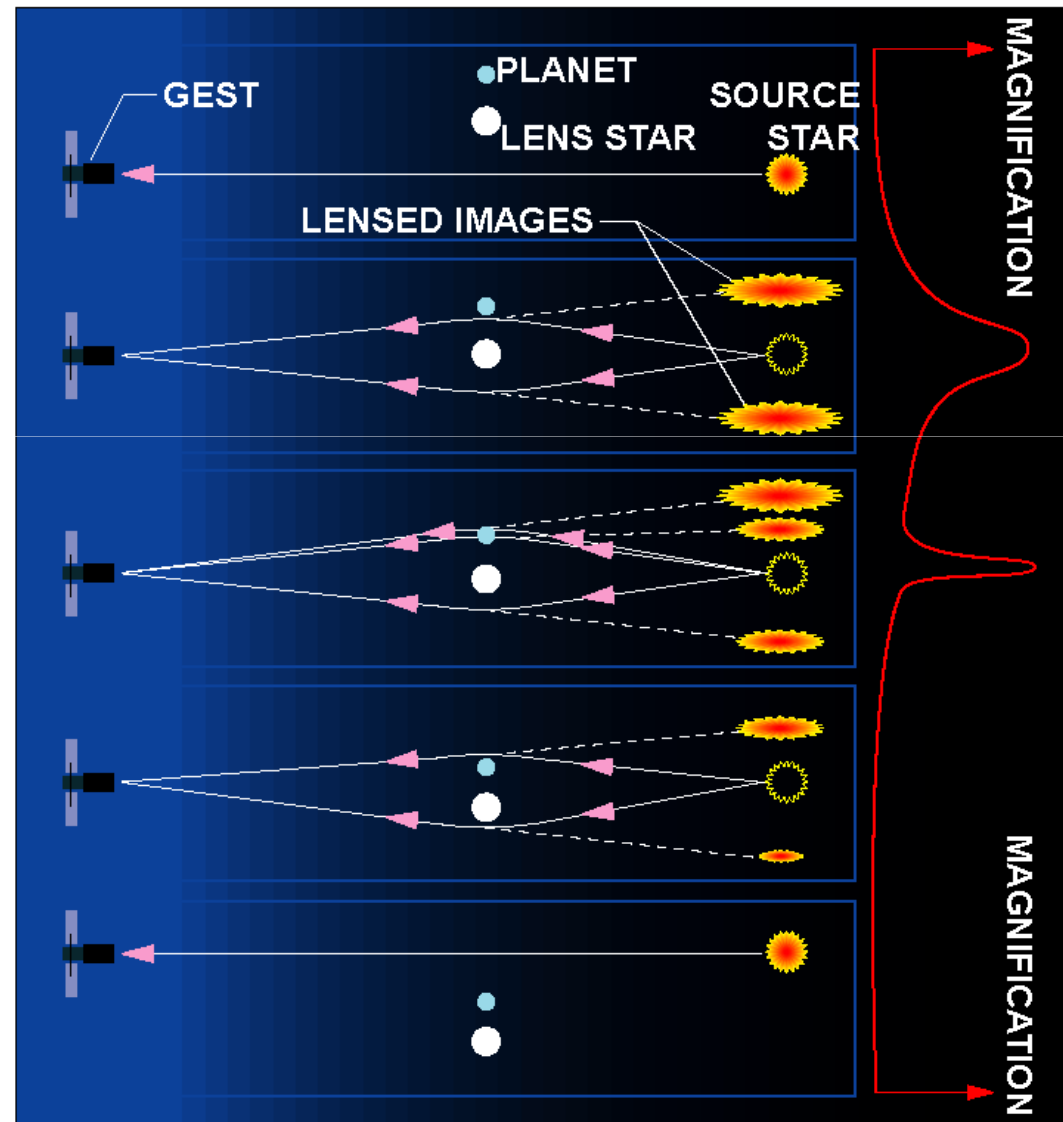


# Tecniche per la rilevazione

## Metodo di microlensing

La geometria della lente porta ad un aumento di magnitudine della stella misurabile.

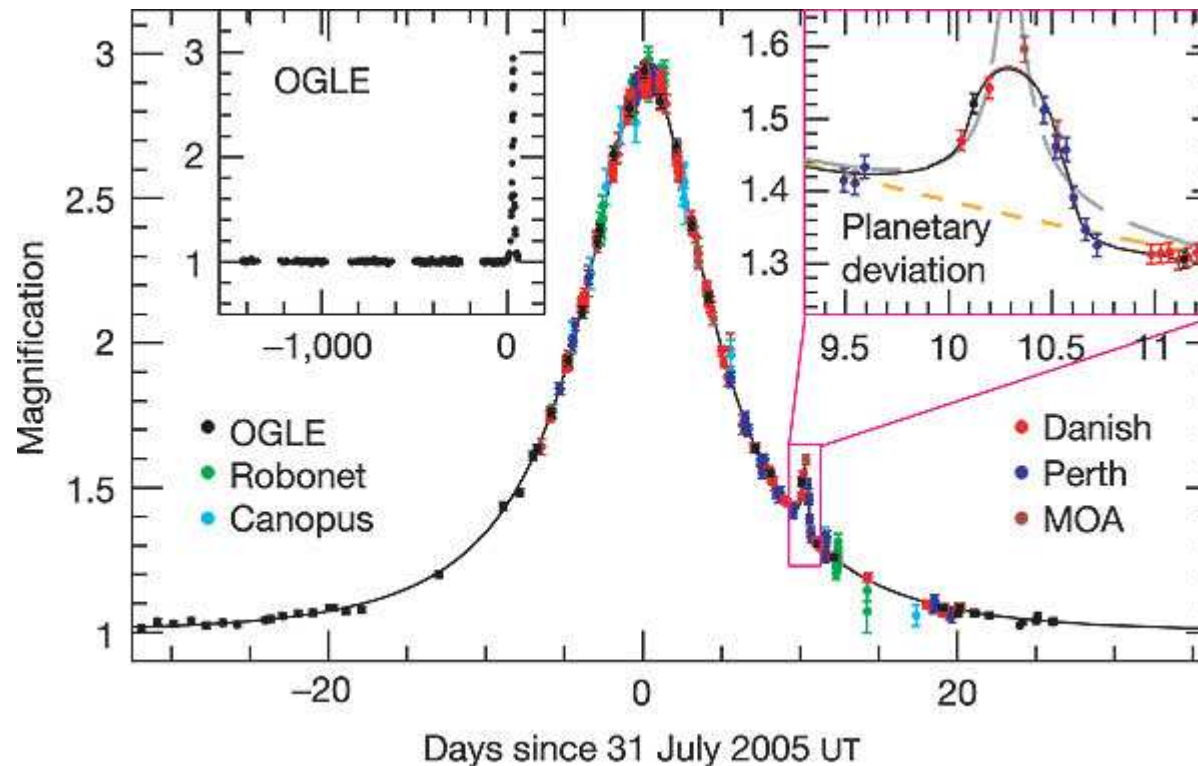
Quando si scopre un evento di microlensing si analizza la curva di luce della stella alla ricerca di difetti della lente dovuti alla presenza di un pianeta



# Tecniche per la rilevazione

## Metodo di microlensing

Se la stella vicina ha un pianeta si produce un secondo picco di luminosità.



*Tipica curva di luce di un evento di microlensing con la presenza di un pianeta.*

# Tecniche per la rilevazione

## Tracce di dischi di polveri

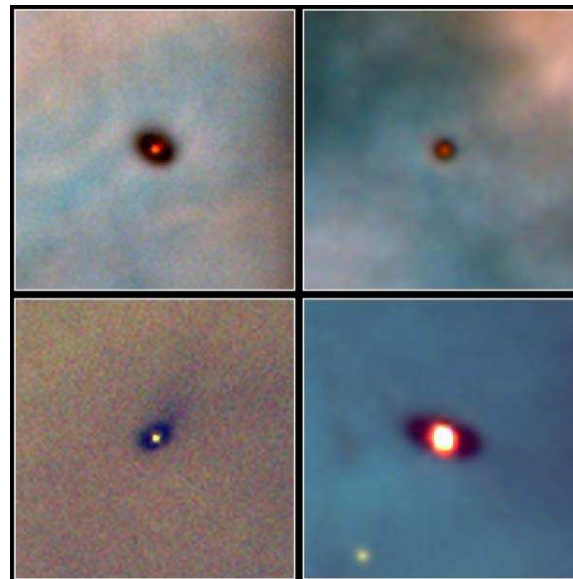
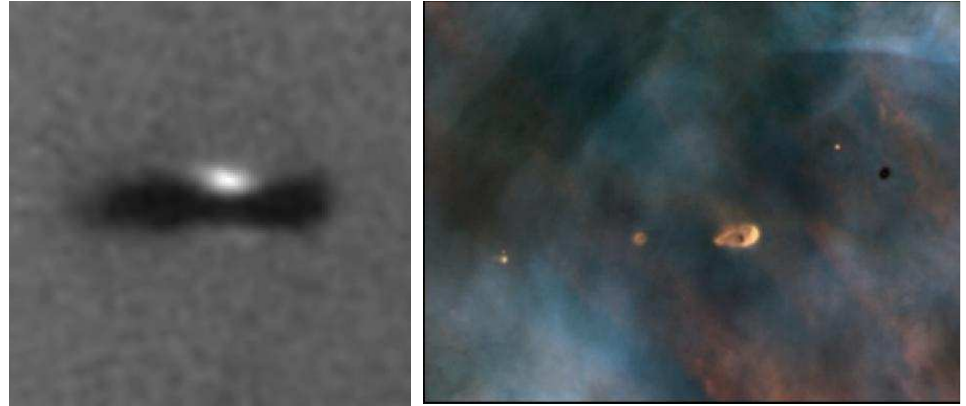
Un approccio recente consiste nello studio delle nubi di polveri.

Molti sistemi solari contengono una quantità notevole di polvere, la cui presenza è dovuta a passaggi di comete e di collisioni tra asteroidi e pianeti.

Questa polvere forma un disco attorno alla stella, assorbe una parte della sua radiazione e la riemette come

***radiazione infrarossa.***

La pressione di radiazione esercitata dalla stella spingerebbe le particelle di polvere nello spazio interstellare in un tempo scala relativamente breve.



*Dischi  
protoplanetari  
nella nebulosa  
di Orione*

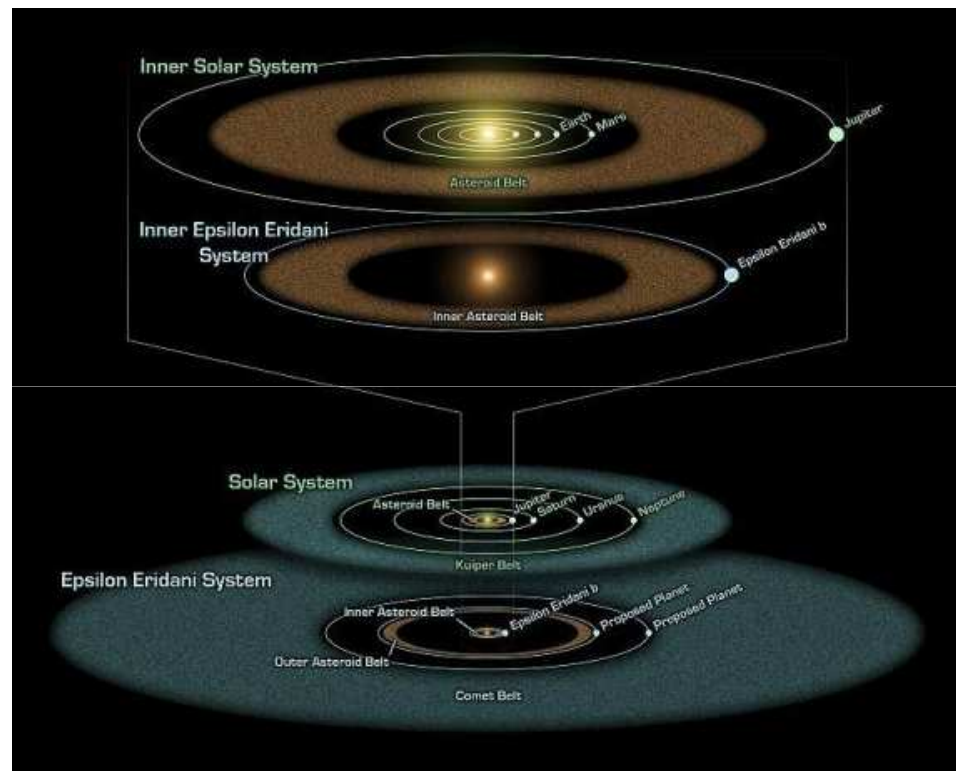


# Tecniche per la rilevazione

## Tracce di dischi di polveri

La rilevazione di polvere indica una continua formazione di tale materiale dovuto a nuove collisioni, e fornisce una evidenza indiretta della presenza di piccoli oggetti quali comete ed asteroidi che orbitano attorno alla stella madre.

Il rilevamento di una eventuale cavità centrale nel disco è compatibile con l'ipotesi dell'esistenza di un pianeta che sta spazzando la polvere presente nella propria orbita, mentre la presenza di un "grumi" potrebbe essere determinata dall'influenza gravitazionale di un pianeta.



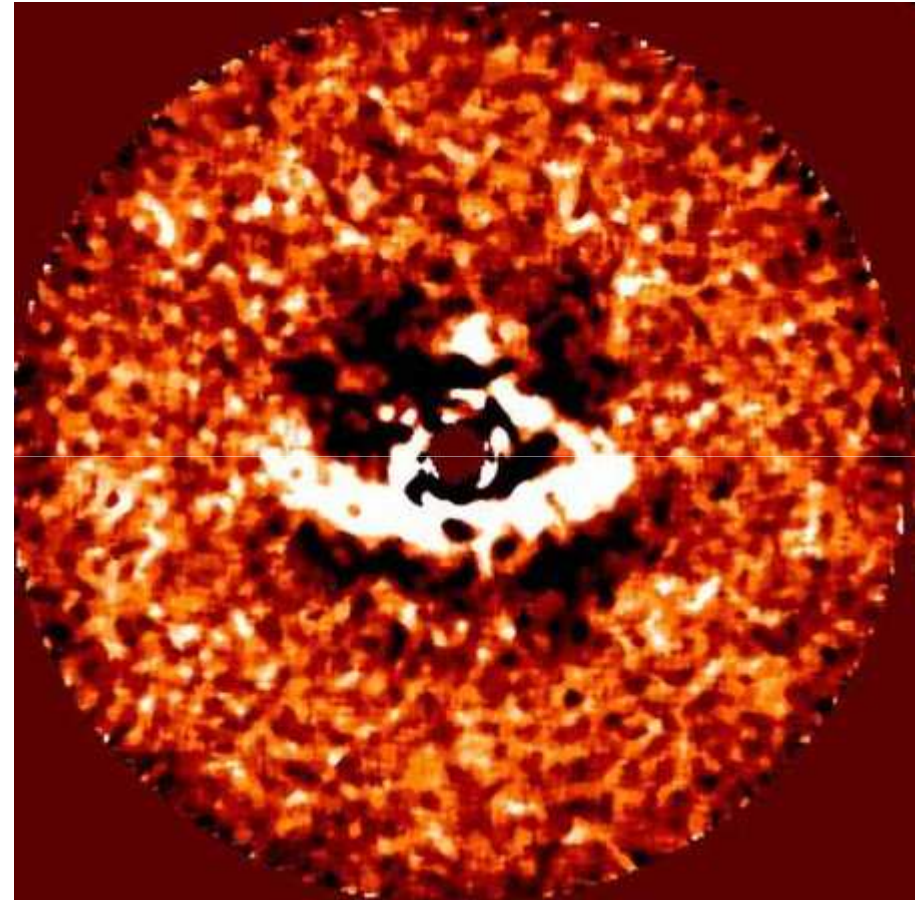
Entrambe queste caratteristiche sono presenti nel disco di polvere che circonda  $\epsilon$  Eridani e suggeriscono la presenza di un pianeta con un raggio orbitale di circa 40 UA.

# Tecniche per la rilevazione

## Tracce di dischi di polveri

Il nostro Sistema Solare contiene una quantità di polvere pari ad un decimo della massa della Luna; questa quantità è insignificante nel totale della massa, ma il volume è così elevato che, da grandi distanze, l'emissione infrarossa della polvere sarebbe 100 volte più intensa di quella di tutti i pianeti.

Questo metodo può oggi essere utilizzato anche da Terra, ma le osservazioni migliori vengono dallo spazio.

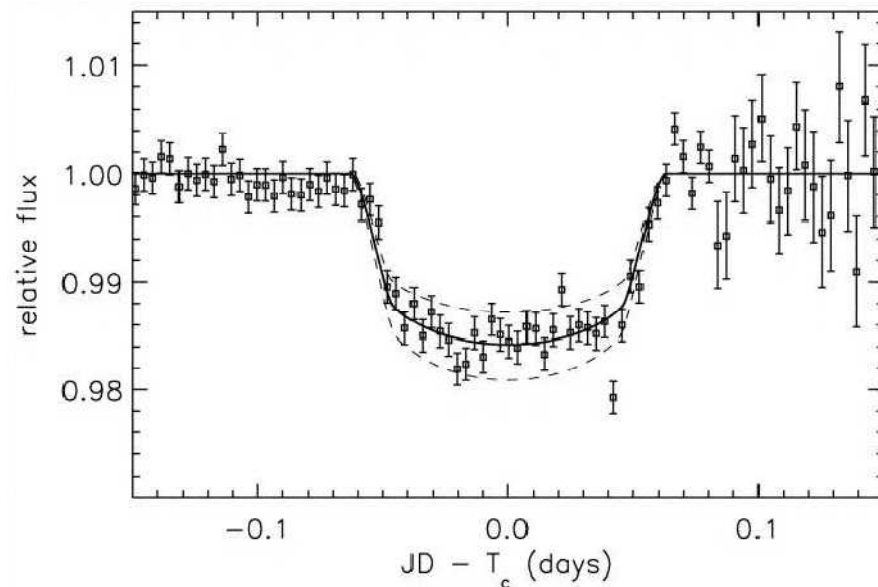


*Immagine del Telescopio Subaru del disco protoplanetario intorno alla stella LkCa 15, una stella di pochi milioni di anni, situata a circa 450 a.l. Precedenti osservazioni avevano rilevato la presenza di un vuoto al centro del disco; le nuove immagini mostrano una forte luce brillare dalla superficie del disco che evidenzia il bordo di tale vuoto, così grande che potrebbe contenere il sistema solare. Ha una forma ellittica, ma non è centrato nella stella; ciò fa ipotizzare la presenza di uno o più pianeti.*

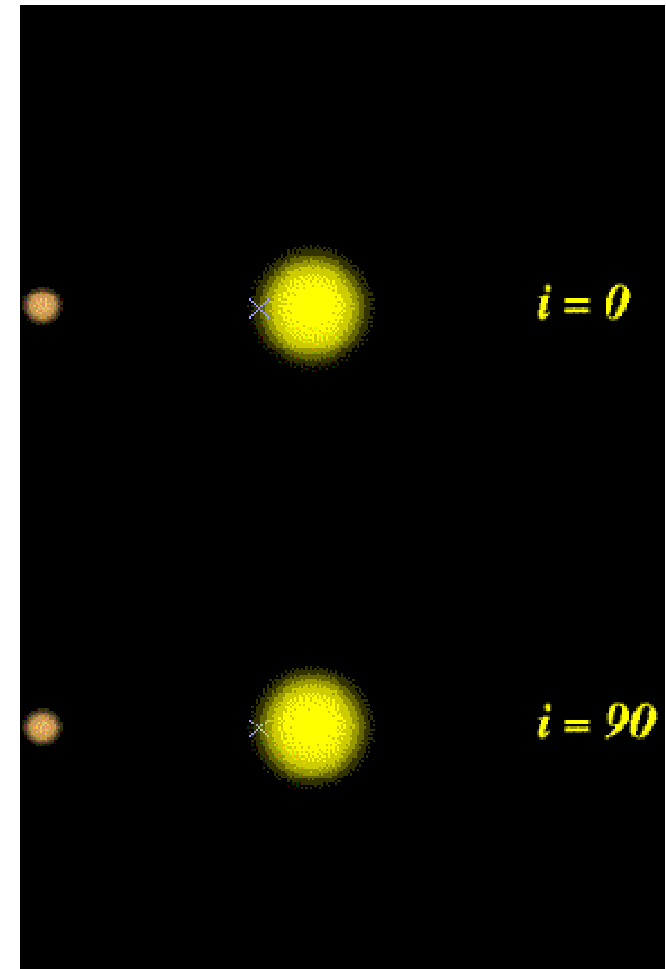
# Tecniche per la rilevazione

## Metodo del transito

Se un pianeta passa davanti alla sua stella provoca una piccola eclisse e la luminosità della stella diminuisce leggermente.



*La curva di luce di HD 209458: il primo transito planetario osservato.*



# Metodo del transito

## Metodo TTV

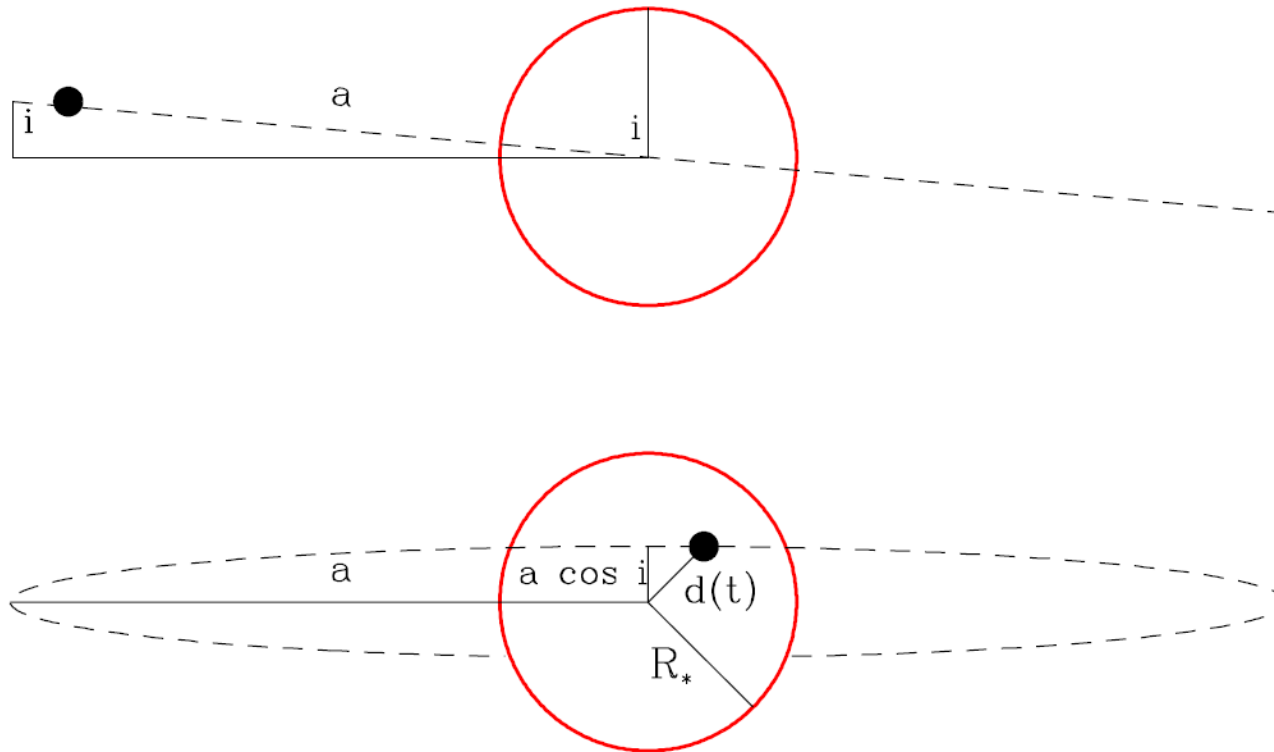
Se in un sistema in cui c'è un pianeta rilevato con il metodo del transito, la presenza di un TTV (Transit Time Variation), ossia la presenza di una variazione nel timing del transito permette di rilevare ulteriori pianeti di taglia terrestre.

La prima scoperta di un pianeta non transitante con la tecnica TTV venne compiuta dal telescopio Kepler nel 2010 nel sistema di Kepler 19b che mostrava un TTV di 5 minuti con un periodo di 300 giorni.

La presenza di un TDV (Transit Duration Variation) comporta il sapere se vi sono variazioni nella durata del transito. Tali variazioni possono indicare la presenza di esolune.

# Metodo del transito

## Geometria del transito



Geometria di un evento di transito di inclinazione  $i$  e raggio orbitale  $a$  come vista di lato (in alto) e dal punto di vista dell'osservatore (in basso) in un momento in cui il pianeta si trova a distanza proiettata  $d(t)$  dal centro stellare.

# Metodo del transito

## Probabilità del transito

Si consideri un pianeta di raggio  $R_p$  orbita attorno ad una stella di raggio  $R_*$ , massa  $M_*$  e di raggio orbitale  $a$ .

Un transito del disco stellare sarà visto da un osservatore esterno solo se il piano orbitale è sufficientemente inclinato rispetto al piano del cielo. In particolare, l'inclinazione  $i$  deve soddisfare

$$a \cos i \leq R_* + R_p$$

Si dimostra che, per un insieme di sistemi planetari con arbitrario orientamento rispetto all'osservatore, la probabilità che l'inclinazione soddisfa il criterio geometrico per un transito è:

$$P_{transito} = \frac{\int_0^{(R_*+R_p)/a} d(\cos i)}{\int_0^1 d(\cos i)} = \frac{R_* + R_p}{a} \simeq \frac{R_*}{a}$$

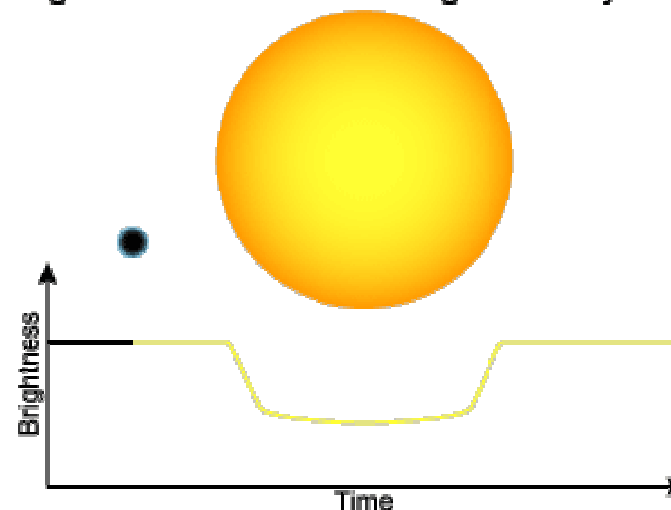
# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

Se  $F_{\lambda,*}$  è il flusso della stella alla lunghezza d'onda  $\lambda$ ,  $\Delta F_{\lambda,*}$  la variazione del flusso durante il transito, la massima variazione frazionale nel flusso osservato è dato da:

$$\max \frac{\Delta F_{\lambda,*}}{F_{\lambda,*}} = \frac{\pi F_{\lambda,*} R_P^2}{\pi F_{\lambda,*} R_*^2 + \pi F_{\lambda,P} R_P^2} \simeq \left( \frac{R_P}{R_*} \right)^2$$

Light Curve of a Star During Planetary Transit



La forma del profondità del transito dipenderà l'angolo di inclinazione, il rapporto tra del pianeta e le dimensioni della stella e il grado di oscuramento al bordo nella banda di osservazione.

# Metodo del transito

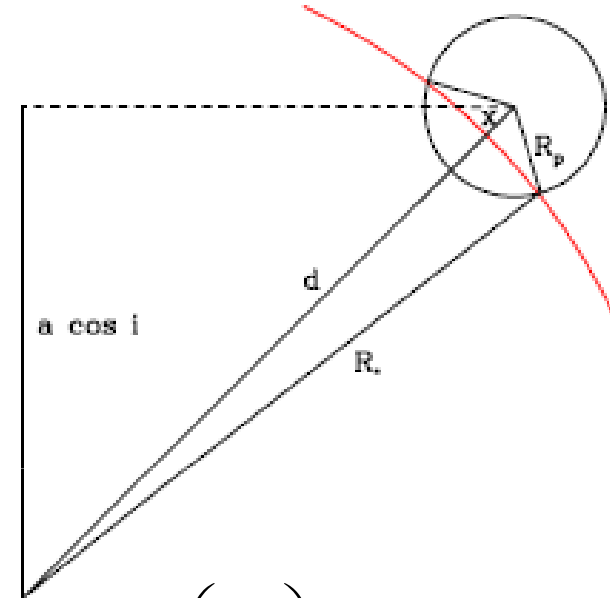
## Parametri del pianeta

Se consideriamo una stella di luminosità uniforme (senza oscuramento al bordo) sulla quale transita un piccolo pianeta, in ogni istante, il bordo stellare può essere approssimato con una corda attraverso il pianeta. Integrando rispetto ad un sistema di coordinate fissato sul centro del pianeta, si può determinare l'area della stella eclissata:

$$A_{\varepsilon} \simeq \int_x^{R_p} r_p dr_p \int_{-\arccos(x/r_p)}^{+\arccos(x/r_p)} d\phi_P = 2 \int_x^{R_p} r_p \arccos\left(\frac{x}{r_p}\right) dr_p$$

Dove  $x = d - R_*$ ,  $d$  è la proiezione della distanza tra i centri della stella e del pianeta e  $x$  varia tra  $-R_p < x < R_p$ .

$$A_{\varepsilon} \simeq R_p^2 \arccos\left(\frac{x}{R_p}\right) - R_p x \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R_p}\right)^2}$$





# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

Per pianeti grandi conviene integrare rispetto ad un sistema di coordinate fissato sul centro della stella

$$A_{\varepsilon}(t) \simeq 2 \int_{\max(0, d(t) - R_p)}^{\min(R_*, d(t) + R_p)} r_* \arccos[\Theta(t)] dr_* \quad (1)$$

Dove

$$\Theta(t) = \begin{cases} \frac{d^2(t) + r_*^2 - R_p^2}{2r_*d(t)} & r_* > R_p + d(t) \\ \pi & \text{altrove} \end{cases}$$

# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

La curva di luce risultante dalla occultazione di una sorgente luminosità uniforme da parte di un pianeta di arbitrari dimensione, raggio orbitale e inclinazione orbitale,

Può essere costruito sostituendo nella equazione (1)

$$d(t) = a \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 i \cos^2 \omega t}$$

Dove  $\omega = \frac{2\pi}{P}$   $P$  è il periodo del pianeta.

La curva di luce del transito, in forma differenziale, è data da:

$$\frac{F(t)}{F_0} = 1 - \frac{A_\epsilon(t)}{\pi R_*^2}$$

# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

La variazione di luminosità per la Terra sarebbe  $\Delta F_{\lambda,*} / F_{\lambda,*} = 8,4 \cdot 10^{-5}$ ,  
Per Giove  $\Delta F_{\lambda,*} / F_{\lambda,*} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ .

Il Sole, nei tempi scala tipici di un transito (che va da poche ore a un giorno), ha variazioni di luminosità  $\Delta F_{\lambda,*} / F_{\lambda,*} \approx 10^{-5}$ .

Calcoli più precisi (Gilliland, 1993) dimostrano che il limite per l'osservazione di pianeti di tipo terrestre è  $\Delta F_{\lambda,*} / F_{\lambda,*} \approx 8 \cdot 10^{-4}$ .

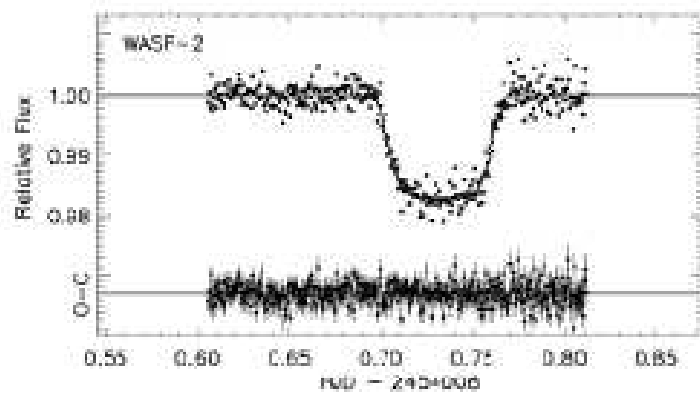
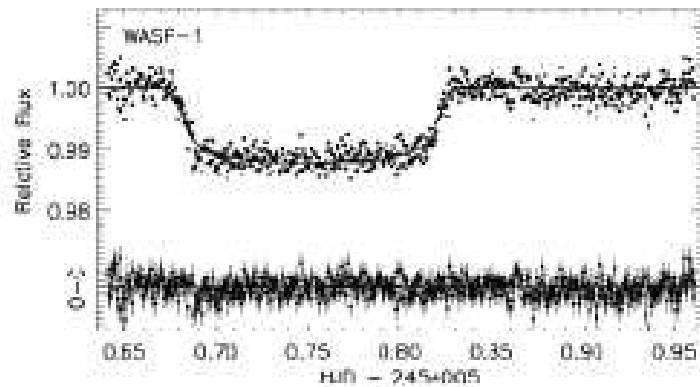
***È praticamente impossibile rilevare transiti di pianeti di taglia terrestre da Terra!***

***I transiti di pianeti di taglia gioviana sono rilevabili anche con strumentazione amatoriale.***

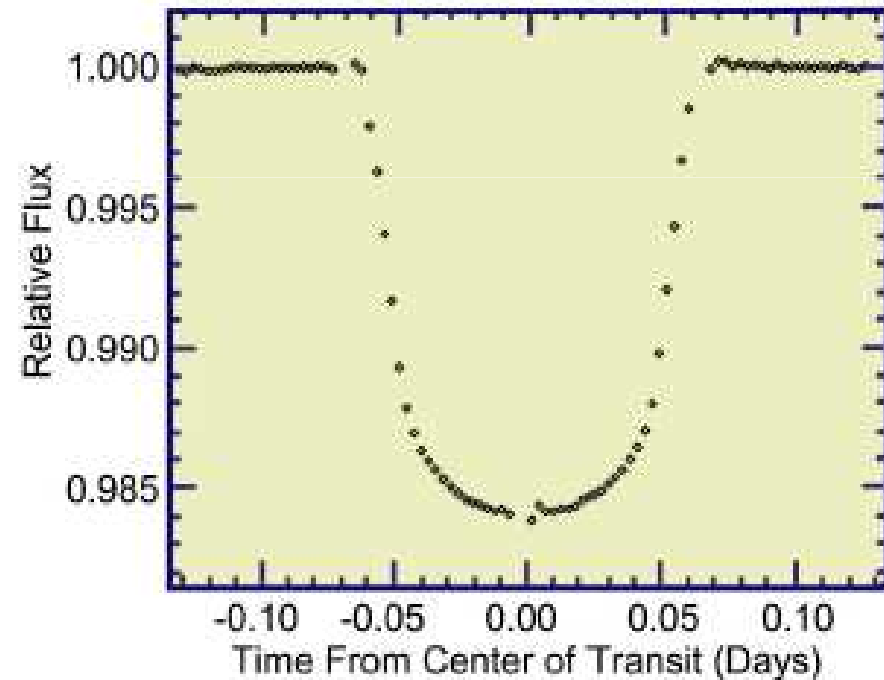
# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

Sistemi basati a Terra



Sistemi nello spazio

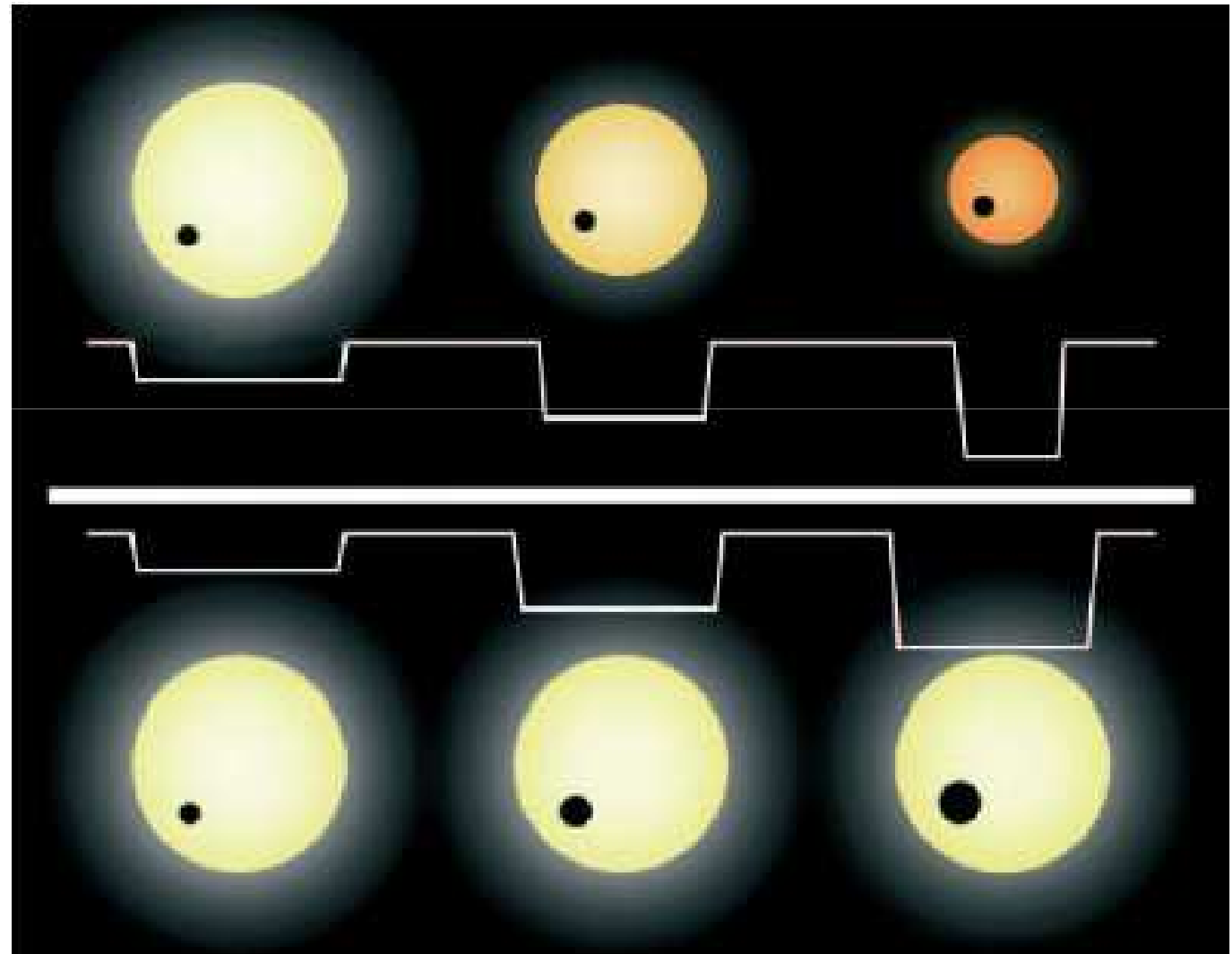


A8834\_084

# Metodo del transito

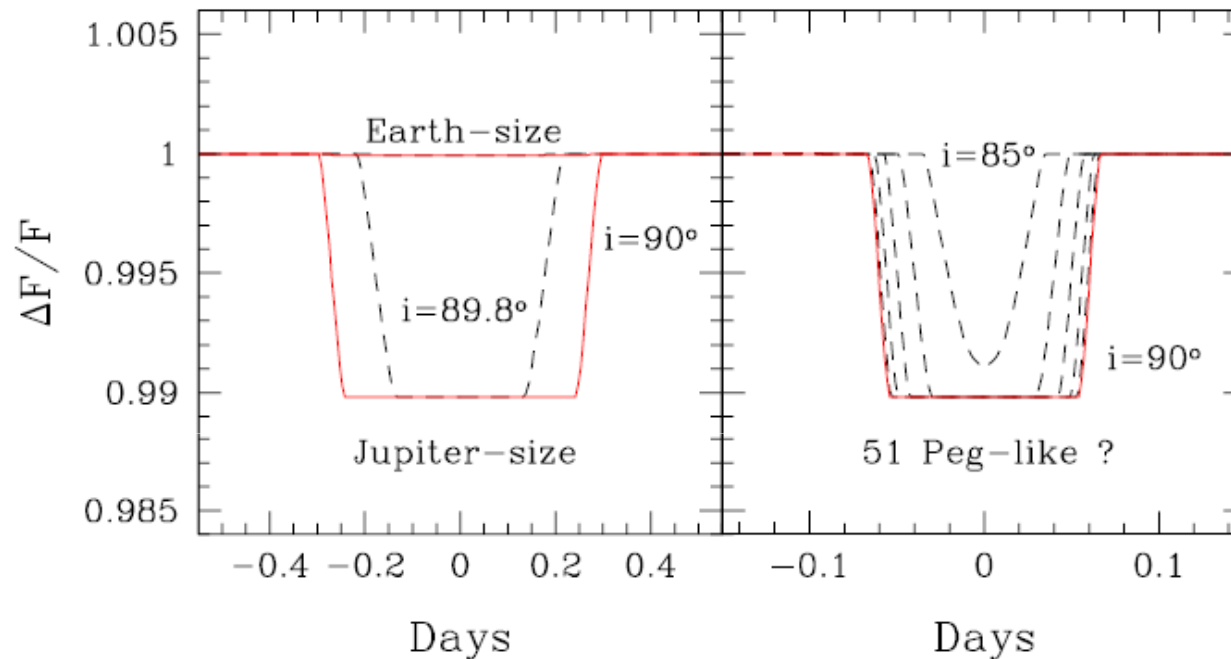
## Parametri del pianeta

La forma della curva di luce del transito dipenderà l'angolo di inclinazione, dal rapporto tra le dimensioni del pianeta e quelle della stella e il grado di oscuramento nella banda di osservazione.



# Metodo del transito

## Parametri del pianeta



A sinistra: curve di luce per pianeti delle dimensioni della Terra e di Giove, in orbita intorno ad una stella di tipo solare a 1 UA.

A destra: un pianeta delle dimensioni di Giove in orbita attorno ad una stella di tipo solare ad una distanza orbitale di 0,05 AU (ad esempio, 51 Peg), con inclinazioni che vanno da  $85^\circ$  a  $90^\circ$ .

Si assume che la luminosità della stella sia uniforme.

Notare il cambiamento nella scala dei tempi tra le due figure.

# Metodo del transito

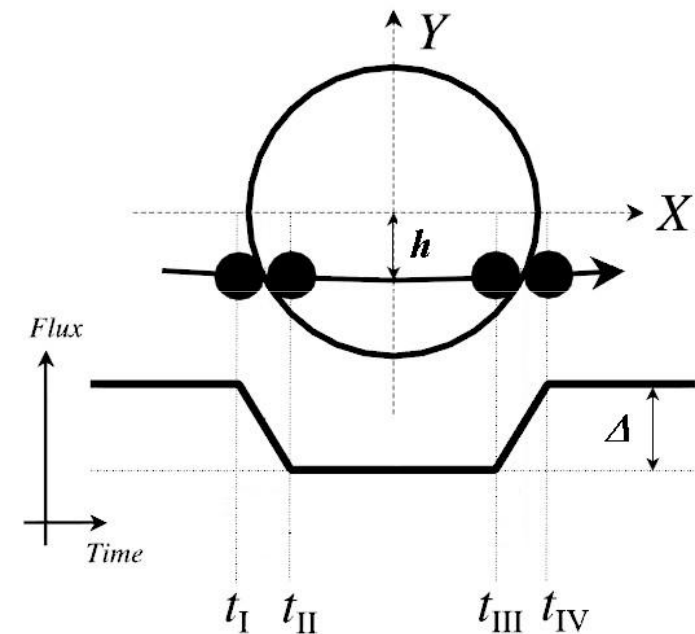
## Parametri del pianeta

La durata e la frequenza dei transiti previsti determinerà la strategia osservativa di un programma di occultazione.

La frequenza è semplicemente uguale al periodo orbitale  $P$ .

Se per un dato sistema possono essere misurati due o più transiti e può essere confermato che siano dovuti allo stesso pianeta, allora si possono determinare il periodo  $P$  e raggio orbitale  $a$  dalla terza legge di Keplero.

$$P = \sqrt{\frac{4\pi^2 a^3}{GM_*}}$$



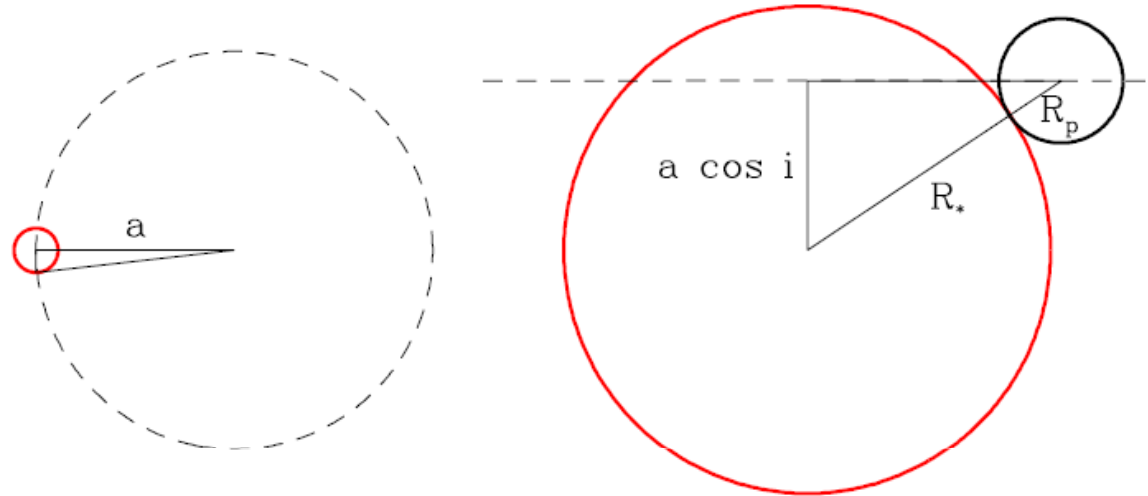
$h$  è il **parametro di impatto**



# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

La durata del transito sarà pari alla frazione del periodo orbitale durante la quale la distanza  $d$  della proiezione della distanza tra i centri della stella e del pianeta è minore della somma dei loro raggi  $R_{*+} + R_p$ . Riferendosi alla figura abbiamo



$$t_T = \frac{2P}{2\pi} \arcsen \frac{\sqrt{(R_* + R_p)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a}$$

Che per  $a \gg R_* \gg R_p$  diventa

$$t_T = \frac{P}{\pi} \sqrt{\left(\frac{R_*}{a}\right)^2 - \cos^2 i} \leq \frac{PR_*}{\pi a}$$

# Metodo del transito

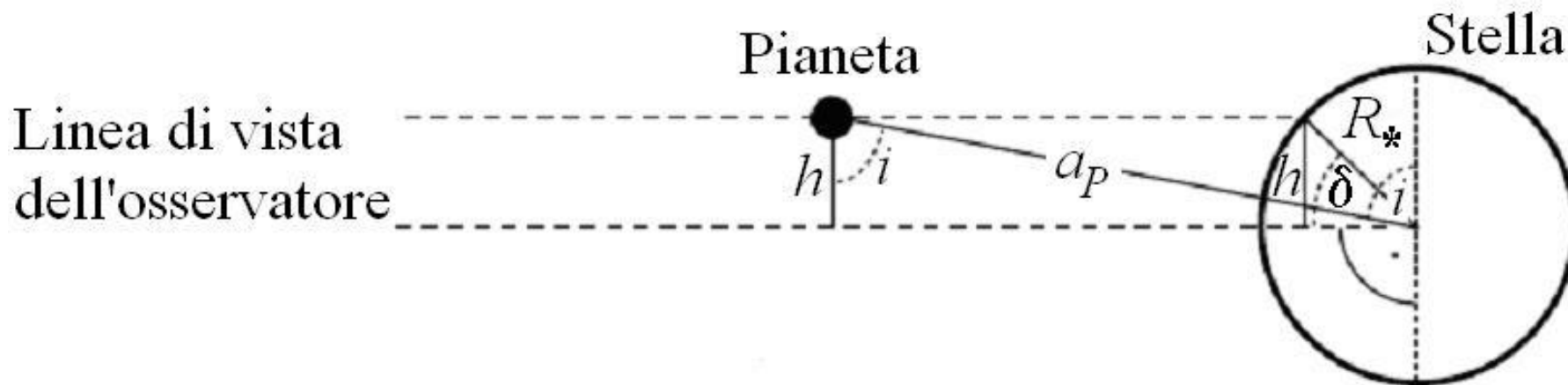
## Parametri del pianeta

In linea di principio il rapporto tra la durata del transito per la durata totale può essere utilizzato per determinare l'inclinazione del piano orbitale, se è noto il raggio stellare.

Infatti, se  $\delta$  è la latitudine del transito attraverso la stella centrale si ha:

$$\sin \delta = \frac{h}{R_*}$$

$$\cos i = \frac{h}{a_p}$$



# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

Noto il raggio della stella (per esempio dalla classificazione spettroscopica), allora si può determinare il raggio del pianeta.

Dalla durata del transito si può stimare la latitudine dello stesso e ciò permette di ottenere l'inclinazione  $i$  del piano orbitale del pianeta.

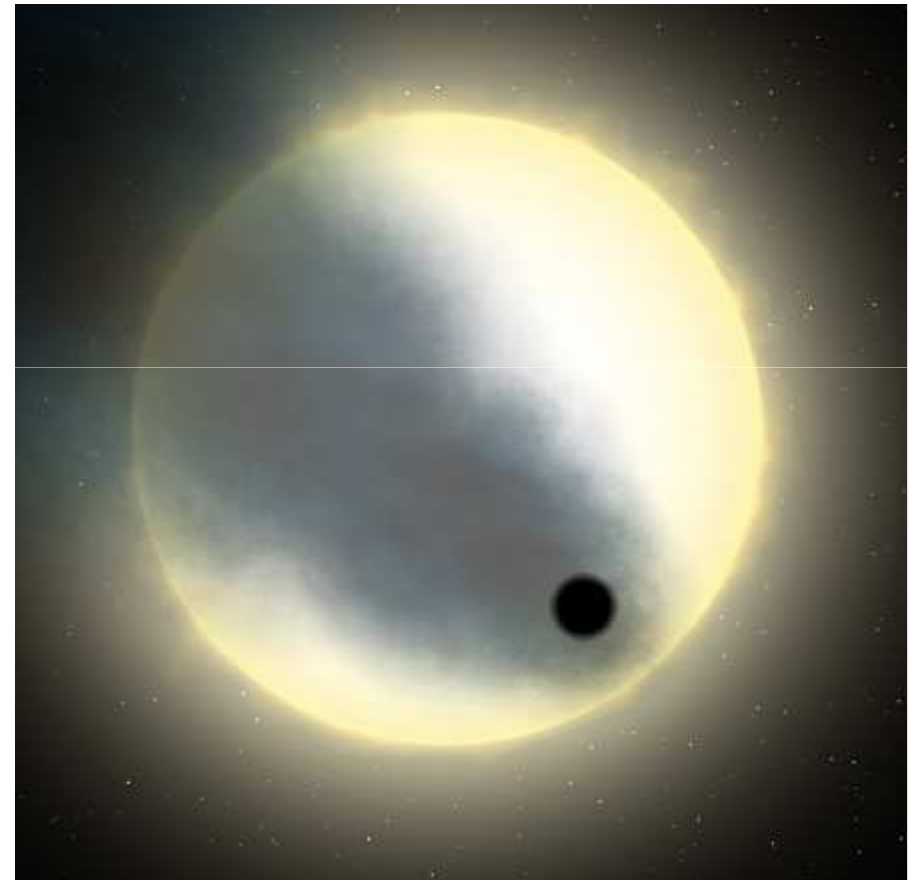
$$\cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_P}$$

# Metodo del transito

## Parametri del pianeta

Nel caso il pianeta abbia un antitransito (passi cioè dietro la sua stella), utilizzando tecniche spettroscopiche è possibile individuare una eventuale atmosfera del pianeta e i gas che la compongono.

Basta confrontare gli spettri della stella durante il transito e durante l'antitransito.



*Ancora una rappresentazione artistica di HD 209458b.*

# Metodo del transito

## Un po' di storia

- Struve (1952). Prima proposta di utilizzo del metodo
- Rosenblatt, F. (1971). Prima discussione approfondita dei requisiti necessari per individuare pianeti mediante fotometria di transito.
- Borucki & Summers (1984). Discussione sulla necessità di rivelatori di alta precisione, per osservazioni fuori dell'atmosfera, e monitoraggio di migliaia di stelle.
- Borucki, Scargle, & Hudson (1985). Prima discussione delle limitazioni fotometriche a causa della variabilità stellare.
- Borucki et al (1987-1988). Test di rivelatori a semiconduttore di silicio per fotometria di transito e prove di un fotometro multicanale basata su fibre ottiche.
- Wolszczan & Frail (1992). Prima scoperta di un sistema planetario extrasolare.
- Robinson et al (1995). Prova dei limiti dei CCD per fotometria differenziale. Prima dimostrazione di rivelatori di precisione per rilevare pianeti simili alla Terra.

# Metodo del transito

## Un po' di storia

- Mayor & Queloz(1995). Prima scoperta (RV) di un pianeta extrasolare intorno ad una stella di sequenza principale.
- Charbonneau et al (2000). Prima osservazione con la fotometria di transito di un pianeta extrasolare
- Charbonneau et al (2002). Spettroscopia di transito usata per analizzare l'atmosfera dei pianeti extrasolari.
- CoRoT (2006) è un satellite in orbita a 900 km di altezza. Il 5 maggio 2007 viene annunciata la prima scoperta.
- Kepler (2009) è un telescopio spaziale per la ricerca di pianeti extrasolari in transito.
- Kepler (2010) Primo pianeta roccioso di taglia terrestre ( $1.4 M_T$ )

# Metodo del transito

## Sistemi basati a terra

Sistemi robotici

Sistemi a campo stretto, grandi telescopi

- Monitoraggio di ammassi stellari
- Monitoraggio di singole stelle; spesso a seguito delle scoperte con il metodo della velocità radiale

Sistemi a largo campo

- Monitoraggio di un gran numero di stelle

Svariati sistemi in funzione:

ASP, BEST, GITPO, HATnetwork, MONET, OGLE III, PASS, PISCES, STARE, STELLA, Super WASP, STEPSS, TennAuto Photo Tel, Transitsearch.org, TrES, USTAPS, UNSWEPS, Vulcan, WHAT, XO project.

# Metodo del transito

## Sistemi basati a terra

Survey for Transiting Extrasolar Planets in Stellar Systems (STEPSS)

Strumentazione: aperture: 1.3m e 2.4m

Campo di vista: 46x46 e 25x25 arcmin; 0,17 e 0,6 gradi<sup>2</sup>

Membri del progetto: Christopher Burke, Scott Gaudi, Joshua Pepper, Darren DePoy, Jennifer Marshall, Richard Pogge

Obiettivi: valutare la frequenza di pianeti extrasolari intorno a stelle della sequenza principale in numerosi ammassi aperti.





# Metodo del transito

## Sistemi basati a terra

Vulcan photometer; Lick Observatory

### TELESCOPIO:

Apertura: 10 cm di lunghezza

focale: 30 cm

Campo visivo:  $7 \times 7^\circ$

Detector: 4096x4096 CCD ( $9 \mu\text{m}$ )



### OBIETTIVI:

Monitoraggio continuo di 10.000 stelle per periodi di almeno 6 settimane

Rilevare pianeti di tipo gioviano in orbite di breve periodo

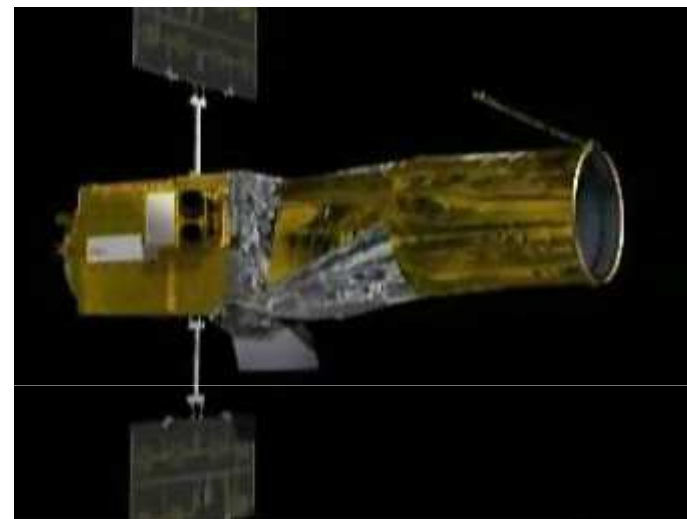
Utilizzare le misure di velocità Doppler per determinare la massa e la densità

# Metodo del transito

CoRoT

COROT (CONvection ROTation and planetary Transits) è una missione dell'agenzia spaziale francese (CNES) in cooperazione con Agenzia Spaziale Europea.

Gli obiettivi principali della missione sono: l'esecuzione di misure di astrosismologia, utili per ricavare informazioni sulla struttura interna delle stelle; la ricerca di pianeti extrasolari, in particolare di pianeti di tipo terrestre, con il metodo dei transiti.



Entrambi gli studi sono condotti valutando minime variazioni nella luminosità della stella oggetto di osservazione.

Per eseguire tali misurazioni la sonda monta un telescopio da 27 cm di diametro con quattro CCD.

Il satellite, piazzato su un'orbita ad un'altezza di 869 km.

Dal novembre 2012 la sonda ha perso il contatto con la Terra e la missione è stata dichiarata conclusa nel giugno 2013.

# Metodo del transito

## Kepler

La Missione Kepler è un programma della NASA.

È stato lanciato da Cape Canaveral il 7 marzo 2009.

Il 15 maggio 2013 la NASA ha annunciato un guasto ai giroscopi tale da compromettere il sistema di puntamento del telescopio. Nell'agosto seguente sono cessati gli studi volti a recuperare la piena funzionalità del telescopio.

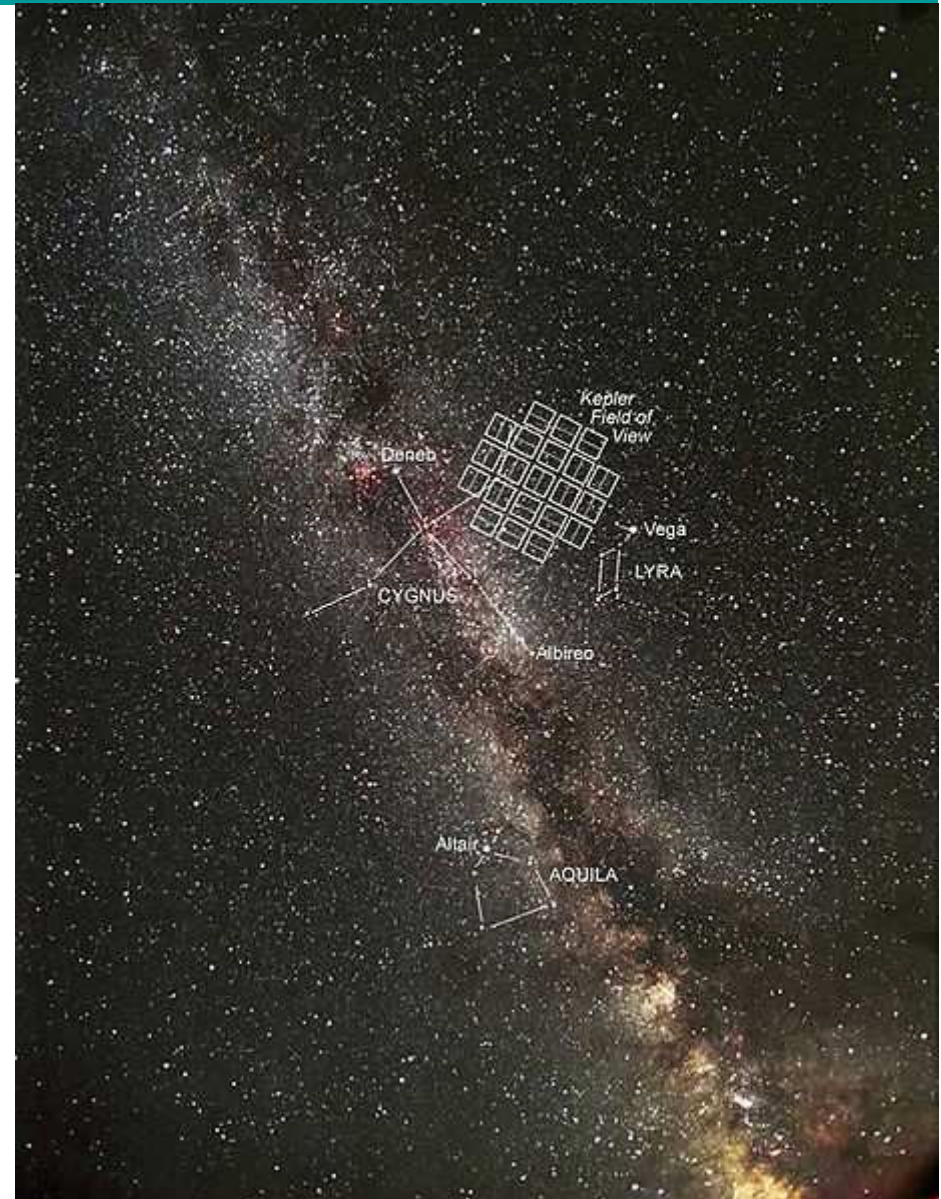


# Metodo del transito

## Kepler

La Missione Kepler è costituita da un satellite artificiale, chiamato Kepler, con a bordo un fotometro che monitora costantemente circa 145 000 stelle di sequenza principale in una regione del cielo presso le costellazioni del Cigno, della Lira e del Drago.

L'obiettivo è la ricerca di pianeti extrasolari di taglia terrestre e nella zona di abitabilità della stella, con il metodo del transito.



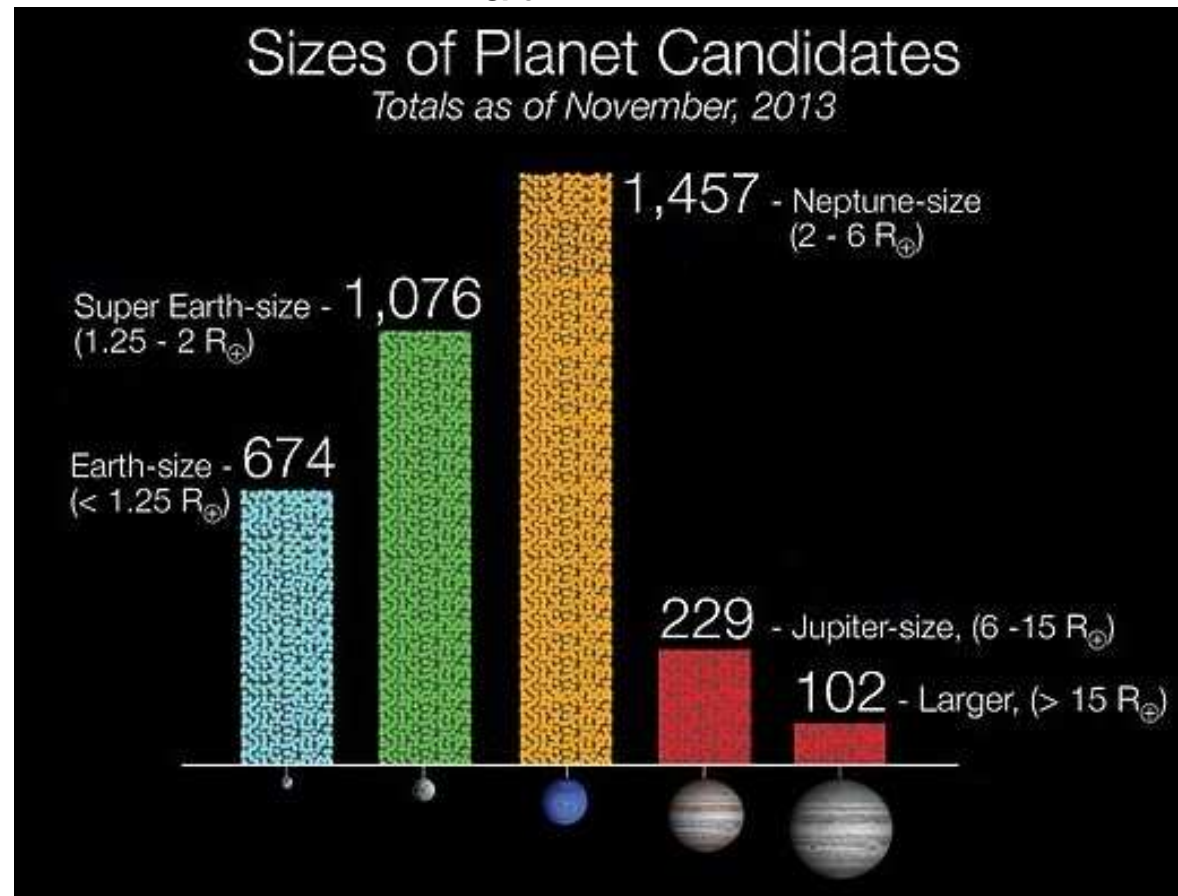


# Metodo del transito

## Kepler

Nel gennaio 2013 un gruppo di astronomi dell'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics ha stimato dai dati di Kepler che nella Via Lattea risiedono "almeno 17 miliardi" di esopianeti simili alla Terra.

Nell'aprile 2013 il team di Kepler aveva individuato 2 740 candidati pianeti e confermato altri 121.



# Metodo del transito

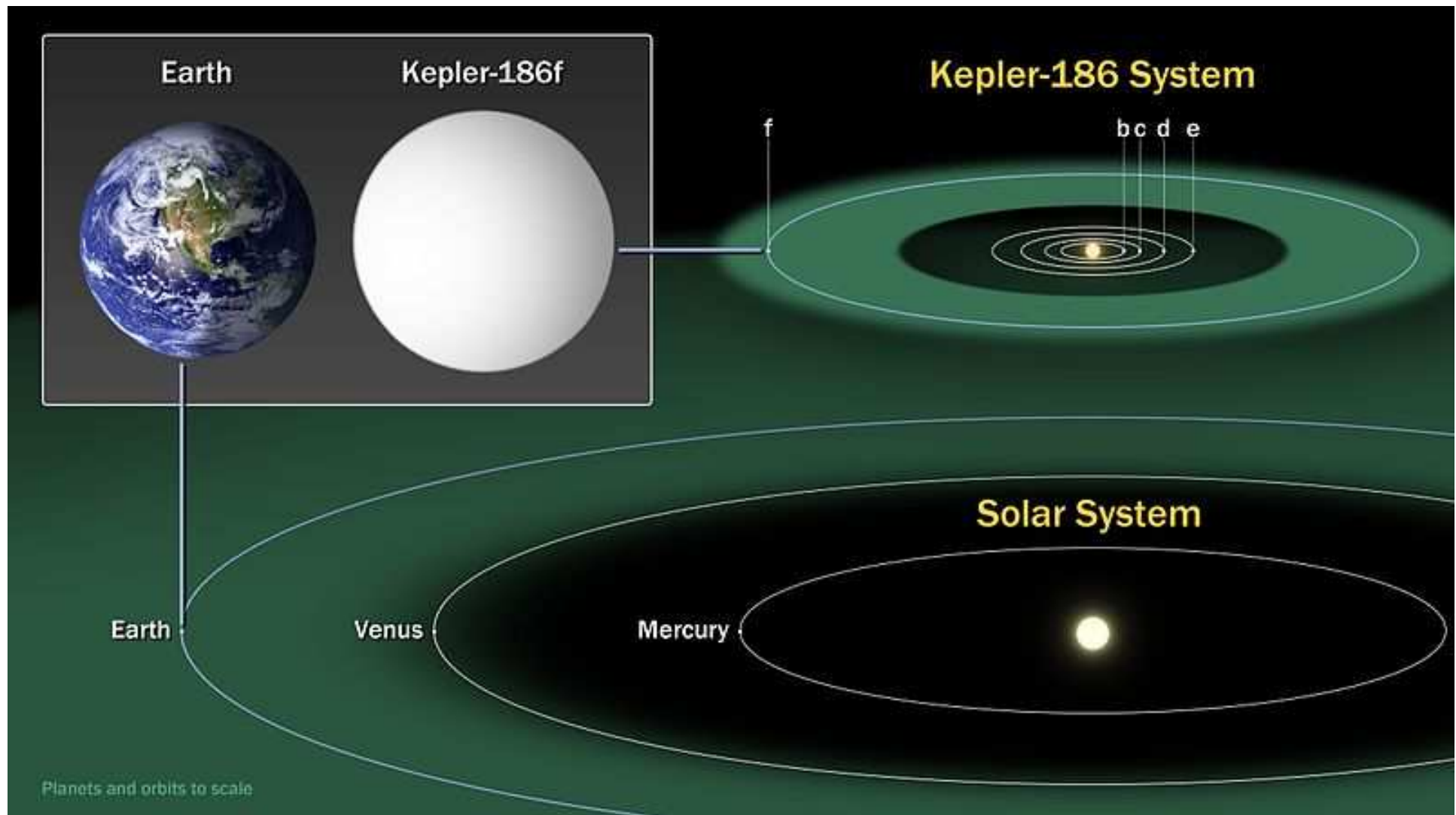
## Kepler

Il 26 febbraio 2014 viene annunciata la scoperta di 715 nuovi pianeti intorno a 305 stelle; quattro di questi orbitano nella zona abitabile.

Il 17 aprile 2014 viene annunciata la scoperta del pianeta più simile alla Terra finora scoperto a cui viene dato il nome di Kepler-186f. Questo è più grande del 10% rispetto al nostro pianeta ed orbita intorno ad una nana rossa distante circa 500 anni luce da noi. Il pianeta dista dalla sua stella circa 58 milioni di chilometri e compie un'orbita in 130 giorni. Tutti questi fattori hanno spinto i ricercatori della NASA ad ipotizzare che questo pianeta abbia le caratteristiche per mantenere l'acqua allo stato liquido in superficie, così da poter consentire la nascita della vita.

# Metodo del transito

Kepler-186f



# Metodo del transito

## Kepler

Con l'ultimo annuncio della NASA del 12 maggio 2016, il numero dei pianeti extrasolari confermati è aumentato almeno del 60 per cento.

Grazie alla missione Kepler sono stati convalidati altri 1 284 nuovi mondi.

Tra questi, 550 sarebbero rocciosi di cui 9 posizionati all'interno della zona abitabile della loro stella e potrebbero sostenere la vita come la conosciamo.

L'analisi è stata effettuata nel catalogo di 4.302 pianeti candidati a partire da luglio 2015.

Per questi nuovi mondi la possibilità di essere un pianeta è superiore al 99%.



# I risultati attuali

## Considerazioni

I pianeti gioviani caldi hanno reso necessaria una revisione del modello di formazione dei sistemi planetari che si basano sulle conoscenze del Sistema Solare.

# I risultati attuali

## Considerazioni

Si definisce **migrazione orbitale** un'alterazione significativa dei parametri orbitali di un pianeta o di un satellite naturale (tipicamente il semiasse maggiore) rispetto ai valori che aveva inizialmente al momento della sua formazione.

Numerosi processi possono essere alla base di un simile evento.

La teoria attualmente più accettata sulla formazione ed evoluzione del Sistema Solare prevede che i pianeti non possano formarsi troppo vicino alla loro stella madre in quanto non c'è sufficiente massa a disposizione nel disco e la temperatura è troppo alta per consentire la formazione di planetesimi ghiacciati o rocciosi.

Pianeti di massa simile alla Terra possono subire una migrazione centripeta se si formano quando il disco di gas è ancora presente. Questo fenomeno può influenzare la formazione del nucleo dei pianeti giganti (cioè con massa di circa dieci masse terrestri).

La migrazione orbitale appare la spiegazione più probabile per i periodi orbitali di pochi giorni dei pianeti gioviani caldi.

# I risultati attuali

## Considerazioni

Sono tre attualmente i principali modelli proposti per spiegare la migrazione orbitale.

### **Migrazione di tipo I**

I pianeti di massa terrestre inducono onde spiraleggianti di densità nel gas che li circonda o nel disco dei planetesimi.

Tra le spirali interne ed esterne all'orbita del pianeta si instaura uno sbilanciamento delle forze; molto spesso le onde esterne possiedono un momento maggiore di quelle interne, cosicché il pianeta perde momento angolare e tende a spostarsi verso orbite più interne.

# I risultati attuali

## Considerazioni

Sono tre attualmente i principali modelli proposti per spiegare la migrazione orbitale.

### **Migrazione di tipo II**

I pianeti con più di dieci masse terrestri riescono a ripulire la fascia del disco che li circonda, creando così una discontinuità che pone fine alla migrazione di tipo I.

Tuttavia nel corso del tempo, nuovo materiale continua ad entrare nella lacuna spostando così il pianeta e la sua fascia di separazione verso orbite più interne.

Questa è una delle ipotesi più accreditate per la formazione della maggior parte dei pianeti gioviani caldi.

# I risultati attuali

## Considerazioni

Sono tre attualmente i principali modelli proposti per spiegare la migrazione orbitale.

### **Scattering gravitazionale**

Un altro possibile meccanismo è lo scattering gravitazionale provocato dai pianeti più massicci. Urano e Nettuno potrebbero aver subito un simile fenomeno a causa di Giove o Saturno.

I planetesimi che si erano già formati nella nebulosa solare hanno subito una dispersione molto accentuata che li ha spostati fino alla fascia di Kuiper e la nube di Oort. Sedna è un esempio, assieme agli altri oggetti più piccoli che sono stati inizialmente dispersi per poi raggrupparsi nella nube di Oort.

Questo meccanismo è un'altra possibile spiegazione delle orbite dei pianeti gioviani caldi, soprattutto di quelli eccentrici.

Tre o più giganti gassosi neoformati vengono a costituire un sistema di n-corpi che sul lungo periodo comporta l'espulsione su orbite iperboliche di uno o più pianeti, a scapito dell'energia orbitale di quelli rimanenti che così si stabilizzano su orbite più strette ed eccentriche.

Questo modello viene detto *Jumping Jupiters model*.

# Programmi recenti e futuri

Tutti i programmi futuri mirano ad un unico obiettivo:

*rivelare sempre più “terre”, ossia pianeti di taglia terrestre, posti nella zona di abitabilità di un sistema planetario.*

# Programmi recenti e futuri

## Per l'astrometria

L'ESO ha concretizzato nel 2008 il progetto per la ricerca da Terra di pianeti giganti intorno a un centinaio di stelle; tale programma ha avuto inizio con l'installazione dello strumento PRIMA sul grande interferometro di 120 metri VLTI (Very Large Telescope Interferometer) in Cile.



# Programmi recenti e futuri

## Per l'astrometria

GAIA dell'ESA è uno strumento che misura le variazioni di posizione di una stella rispetto a tutte le altre (più brillanti di  $m=20$ ).

Questo processo gli permette di misurare le variazioni di posizione di 1,5 miliardi di stelle. Avrà una precisione sufficiente per cercare pianeti delle dimensioni di Giove intorno a circa 20000 stelle.

Il lancio è stato effettuato nel 2013, si stanno analizzando i primi dati.



# Programmi recenti e futuri

Per l'osservazione diretta

Il metodo diretto è di gran lunga il più promettente.

Permette una dettagliata caratterizzazione delle proprietà fisiche e chimiche dei  
pianeti:

atmosfera (densità, composizione, ...),  
superficie (colore, morfologia degli oceani/continenti ...)  
rotazione del pianeta (durata del “giorno”)  
Satelliti e anelli.

Molti progetti sono in corso, sia Terra sia nello spazio.

È il campo ove sono concentrate la maggior parte delle attività ed è in rapida  
espansione.

# Programmi recenti e futuri

Per l'osservazione diretta da Terra

Dal 2014 l'ESO ha reso operativo lo Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch (VLT-SPHERE) su uno dei telescopi di 8,2 m.

Il telescopio Keck di 10 metri ha uno strumento analogo.



*Very Large Telescope*

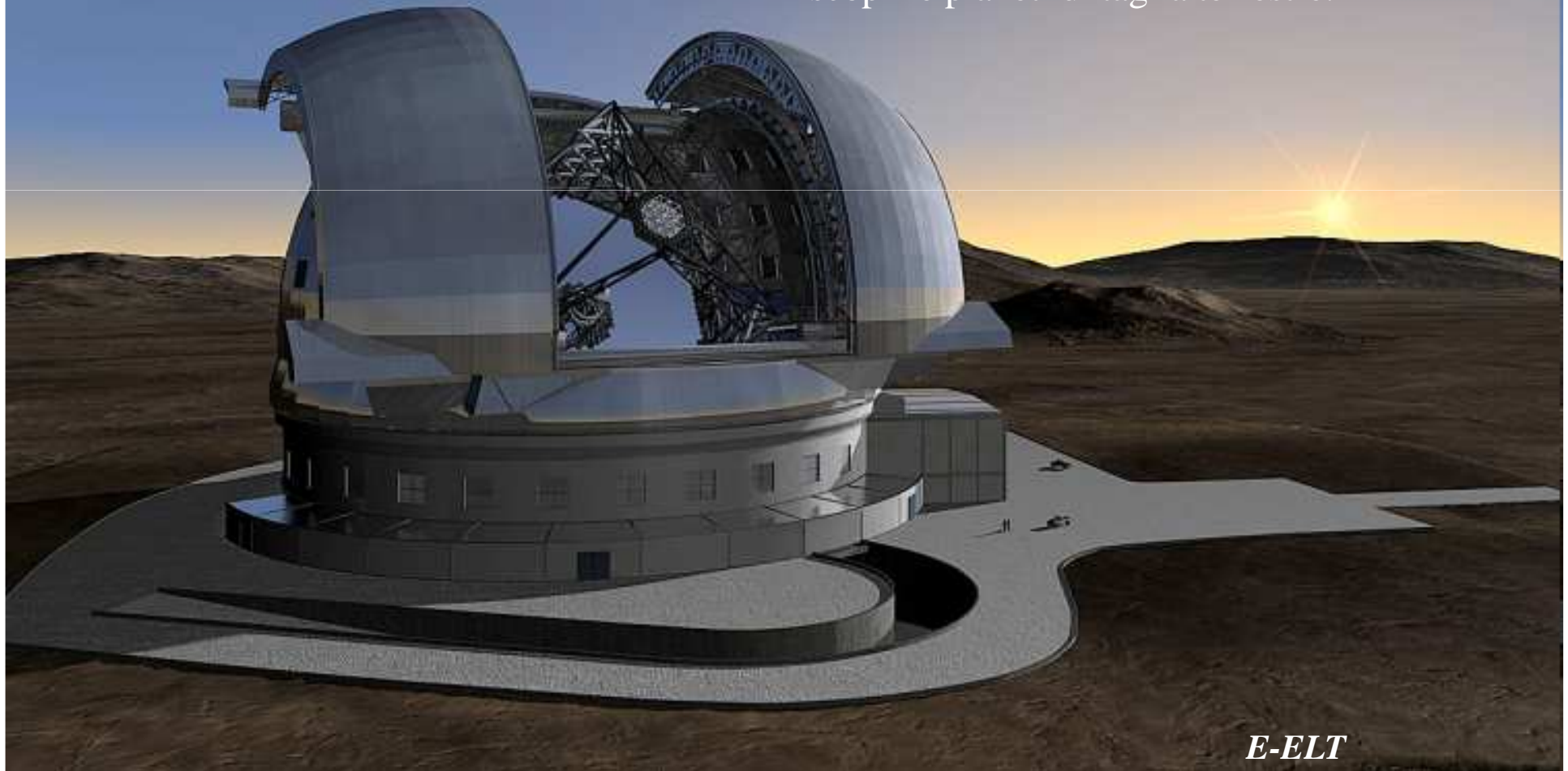


*Keck Telescope*

# Programmi futuri

## Per l'osservazione diretta da Terra

A lungo termine, gli Stati Uniti e l'Europa hanno progetti di grandi telescopi con diametri superiori a 30 metri che saranno attrezzati con strumenti per immagini destinati a scoprire pianeti di taglia terrestre.



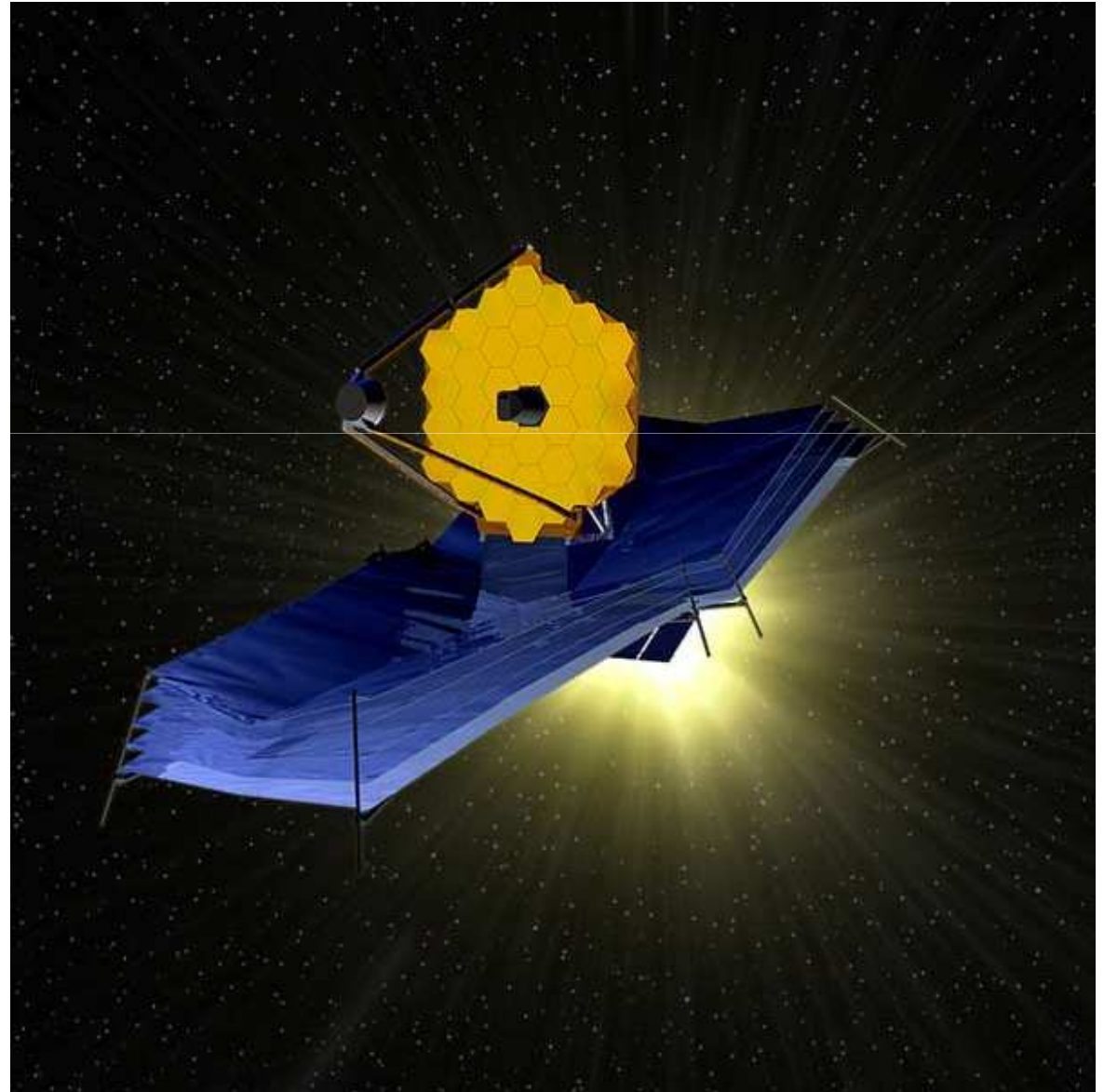
*E-ELT*

# Programmi futuri

Per l'osservazione diretta dallo spazio

Per il 2018 è previsto il lancio del James Web Space Telescope (JWST).

Il JWST è un telescopio di 7 metri di diametro ottimizzato per l'infrarosso capace di "vedere" pianeti in stelle vicine al Sole.



# Programmi futuri

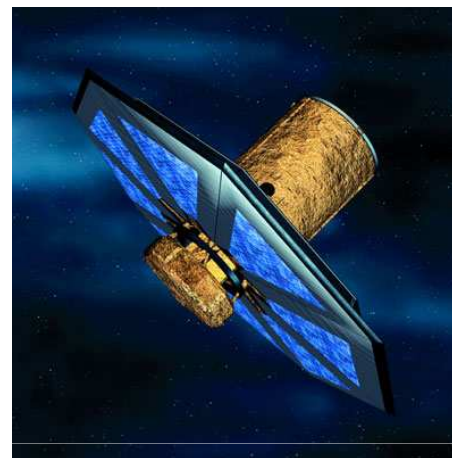
## Progetti a medio termine per l'osservazione diretta dallo spazio

Un interferometro è composto da un numero di telescopi compreso fra 3 e 6, ognuno di 3 metri di diametro e distanti fra loro da qualche decina e qualche centinaio di metri.

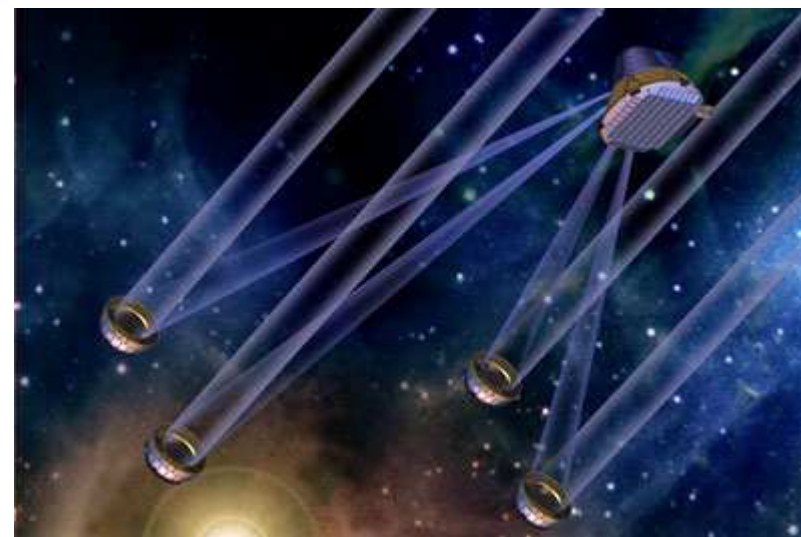
Sono stati sviluppati due progetti paralleli: Darwin dell'ESO e TPF-I della NASA.

Questi due progetti erano destinati a cercare pianeti di taglia terrestre grazie alla loro emissione termica.

ANNULLATI per la complessità e i costi.



*Uno dei quattro o cinque telescopi del progetto Darwin*



*TPF-I – Terrestrial Planet Finder Interferometer*