



Laurea triennale in Fisica
a.a. 2016 - 2017

CORSO DI ASTRONOMIA

LEZIONE 09

Tecniche per la rilevazione

Tracce di dischi di polveri

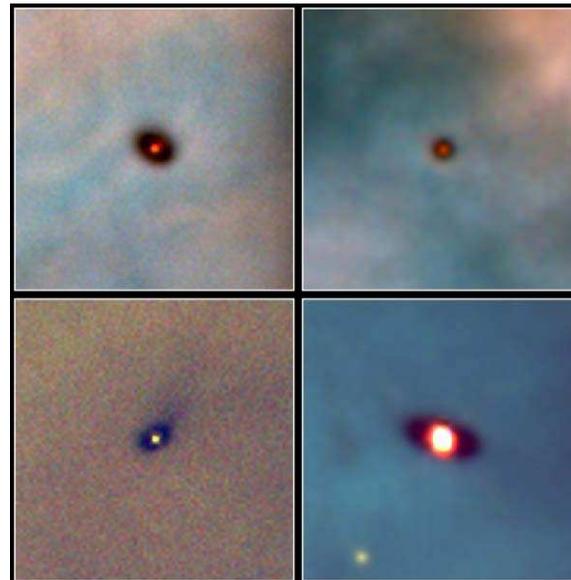
Un approccio recente consiste nello studio delle nubi di polveri.

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.



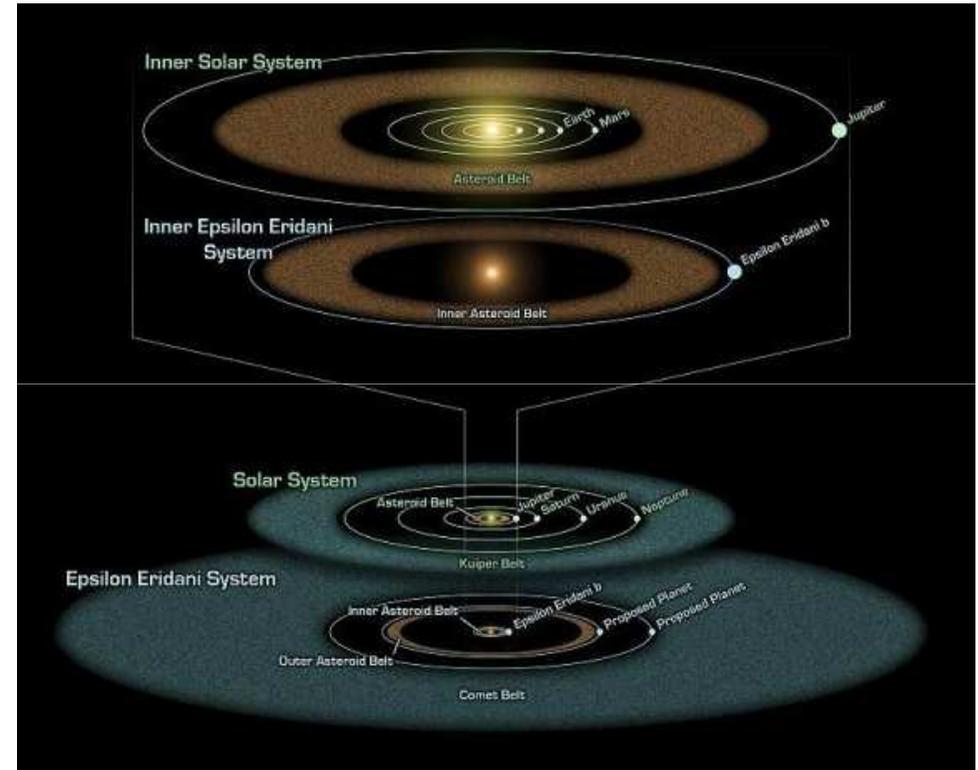
*Dischi
protoplanetari
nella nebulosa
di Orione*

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 ϵ 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.

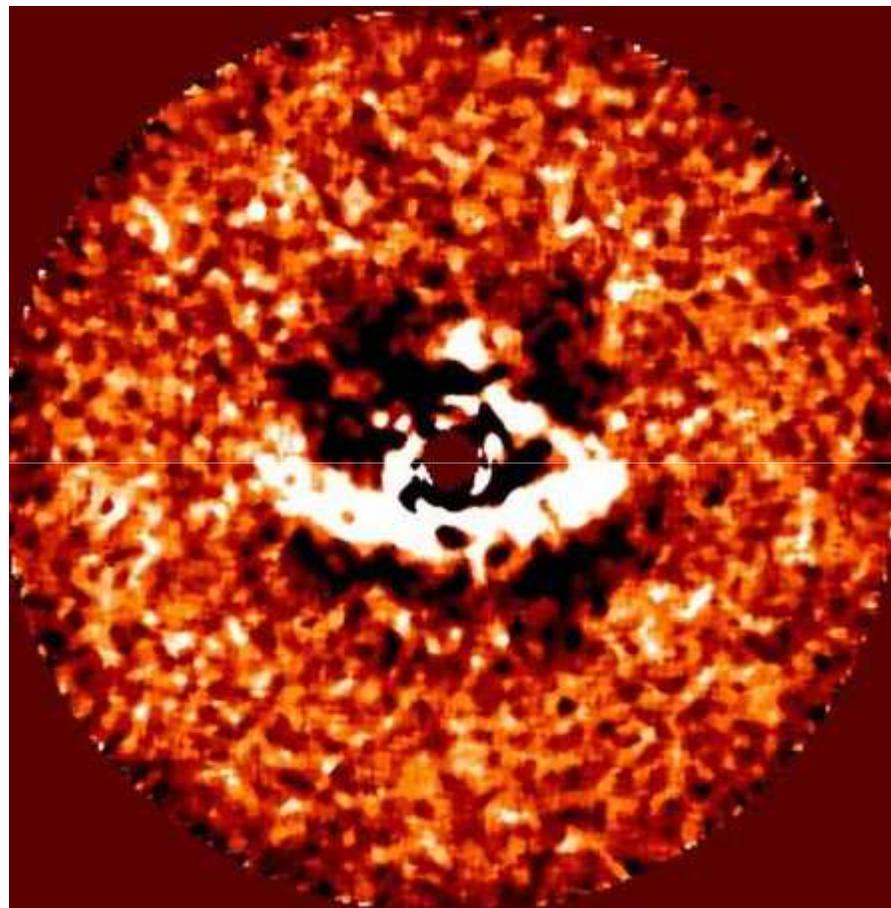
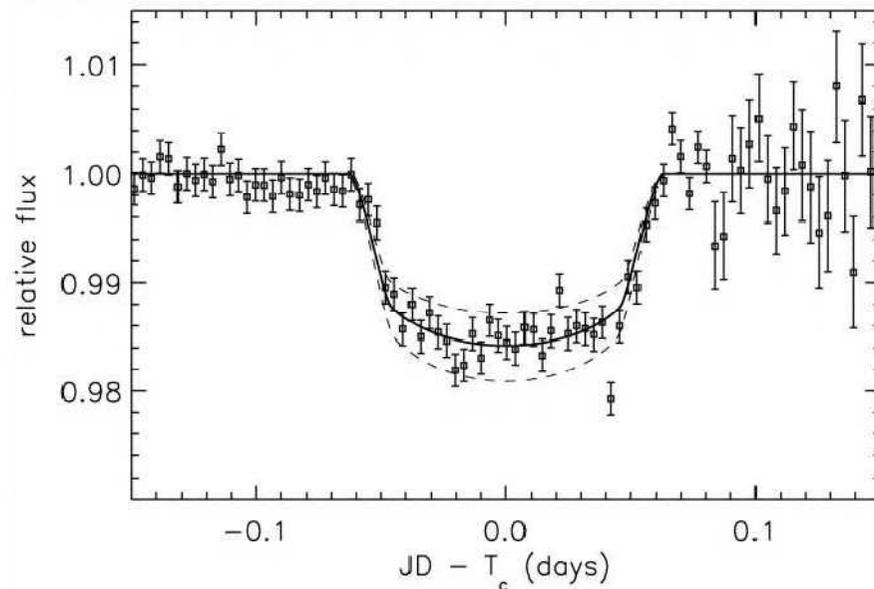


Immagine del Telescopio Subaru del disco protoplanetario intorno alla stella LkCa 15, una stella di pochi milioni di anni, situata a circa 450 a.l. Precedenti osservazioni avevano rilevato la presenza di un vuoto al centro del disco; le nuove immagini mostrano una forte luce brillare dalla superficie 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.

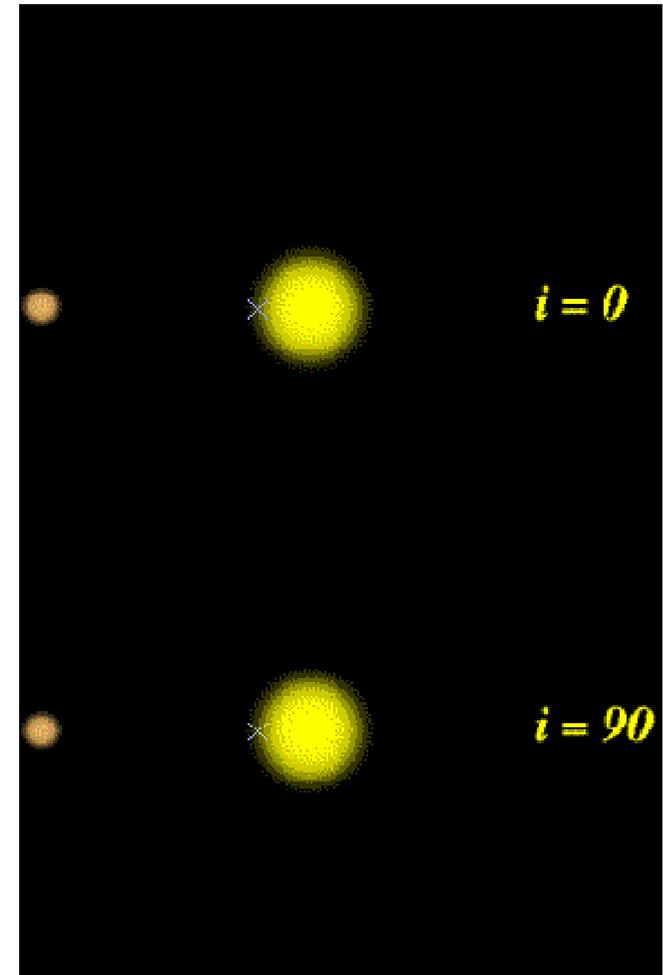
Tecniche per la rilevazione

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

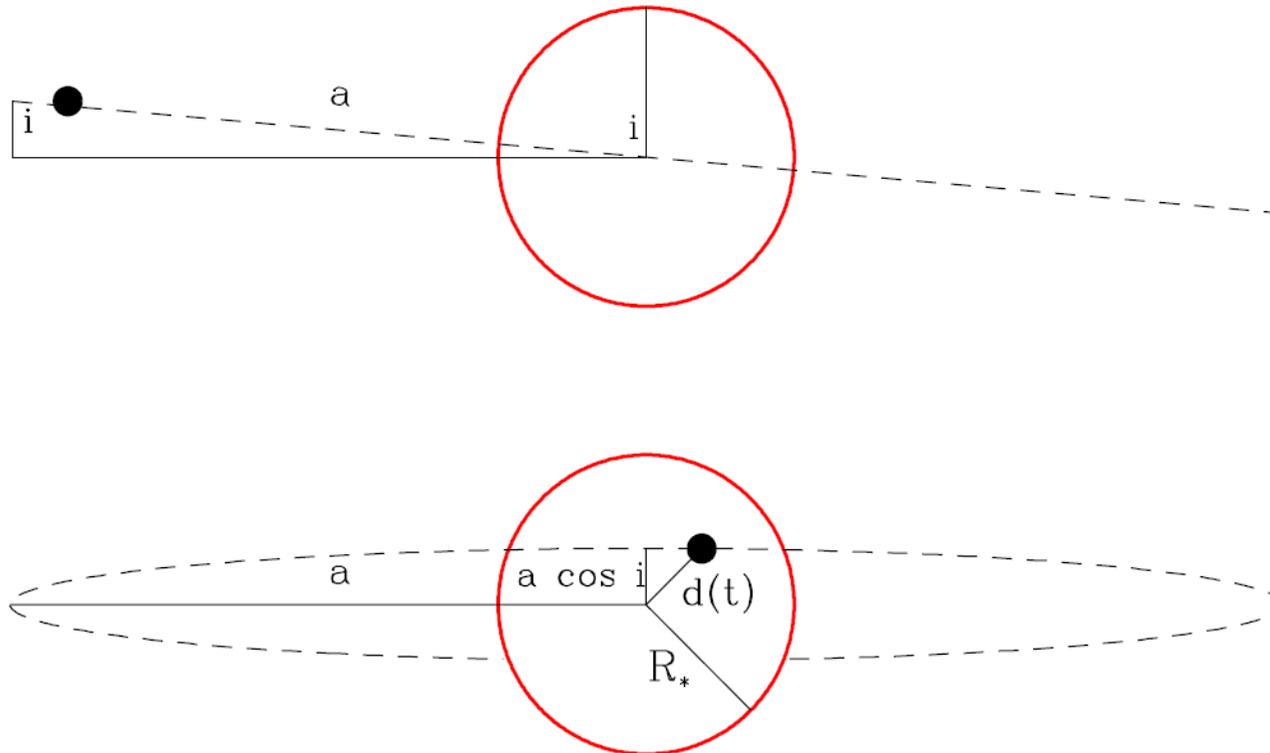
Se in un sistema in cui c'è un pianeta rilevato con il metodo del transito, la presenza di un TTV (Transit Time Variation), ossia la presenza di una variazione nel timing del transito permette di rilevare ulteriori pianeti di taglia terrestre.

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:

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

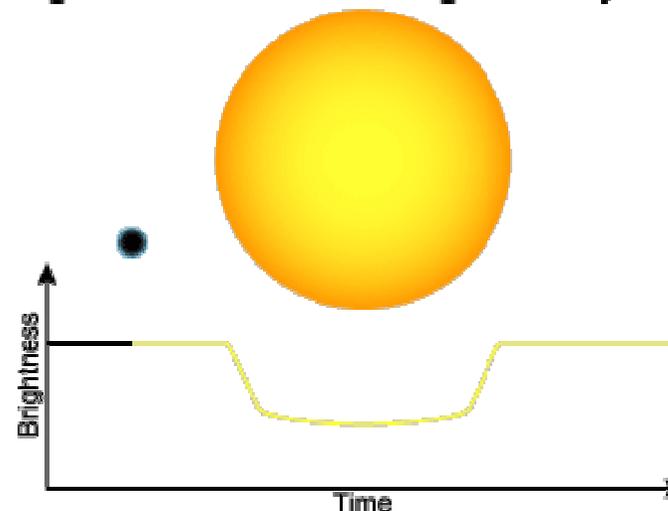
Metodo del transito

Parametri del pianeta

Se $F_{\lambda,*}$ è il flusso della stella alla lunghezza d'onda λ , $\Delta F_{\lambda,*}$ 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

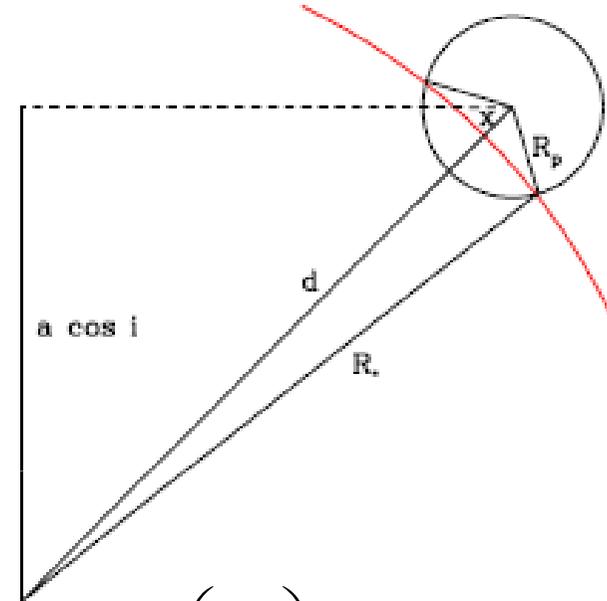
Parametri del pianeta

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)

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

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 $\Delta F_{\lambda,*} / F_{\lambda,*} \approx 8 \cdot 10^{-4}$.

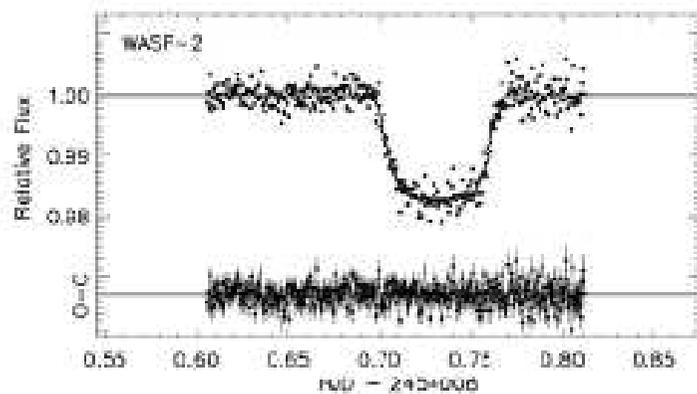
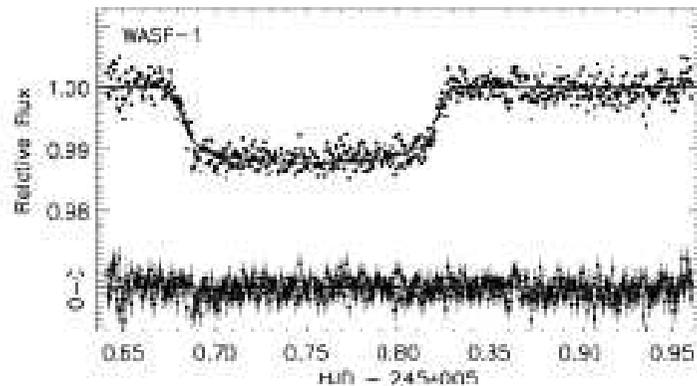
È praticamente impossibile rilevare transiti di pianeti di taglia terrestre da Terra!

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

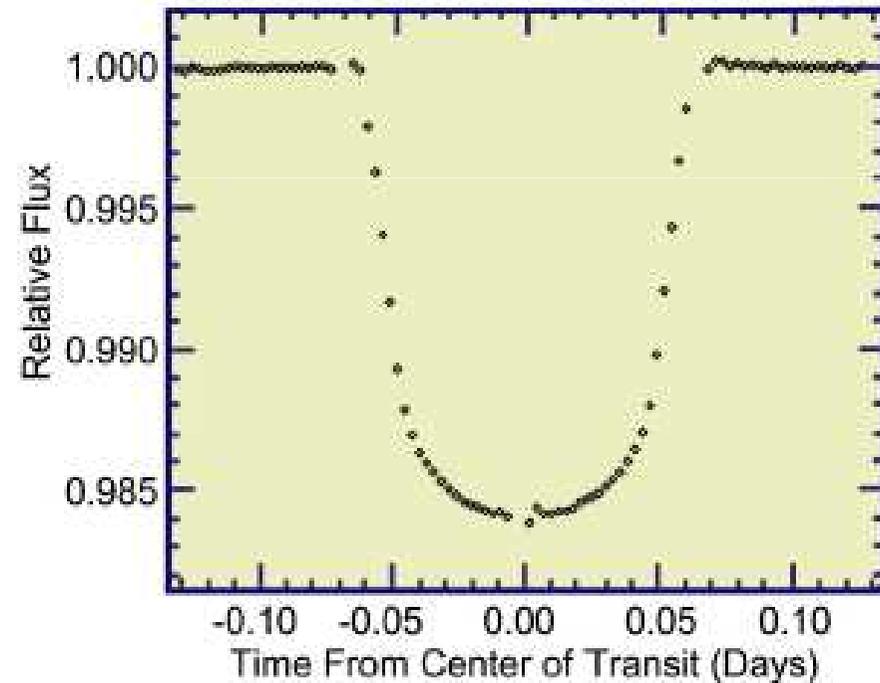
Metodo del transito

Parametri del pianeta

Sistemi basati a Terra



Sistemi nello spazio

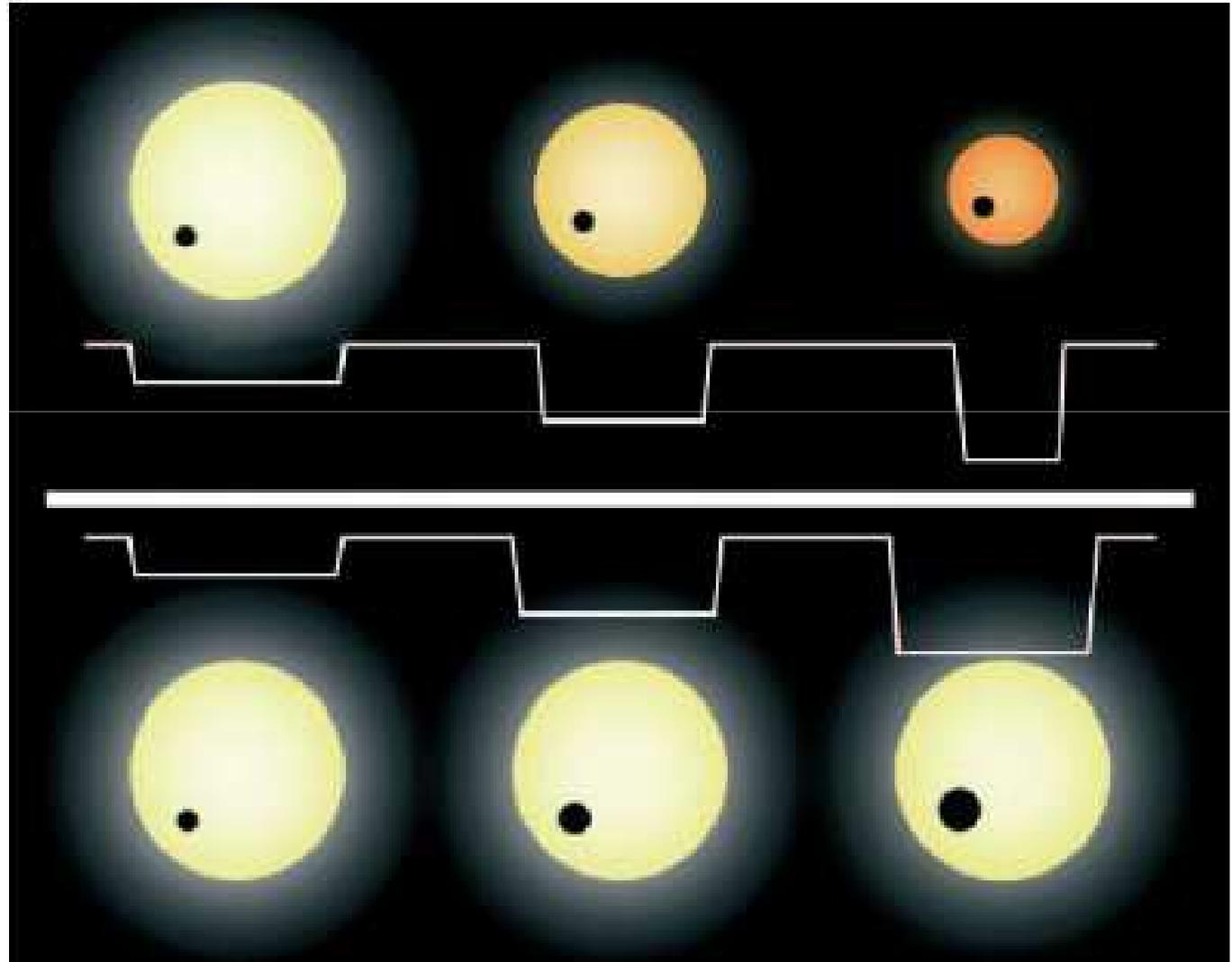


A8834_084

Metodo del transito

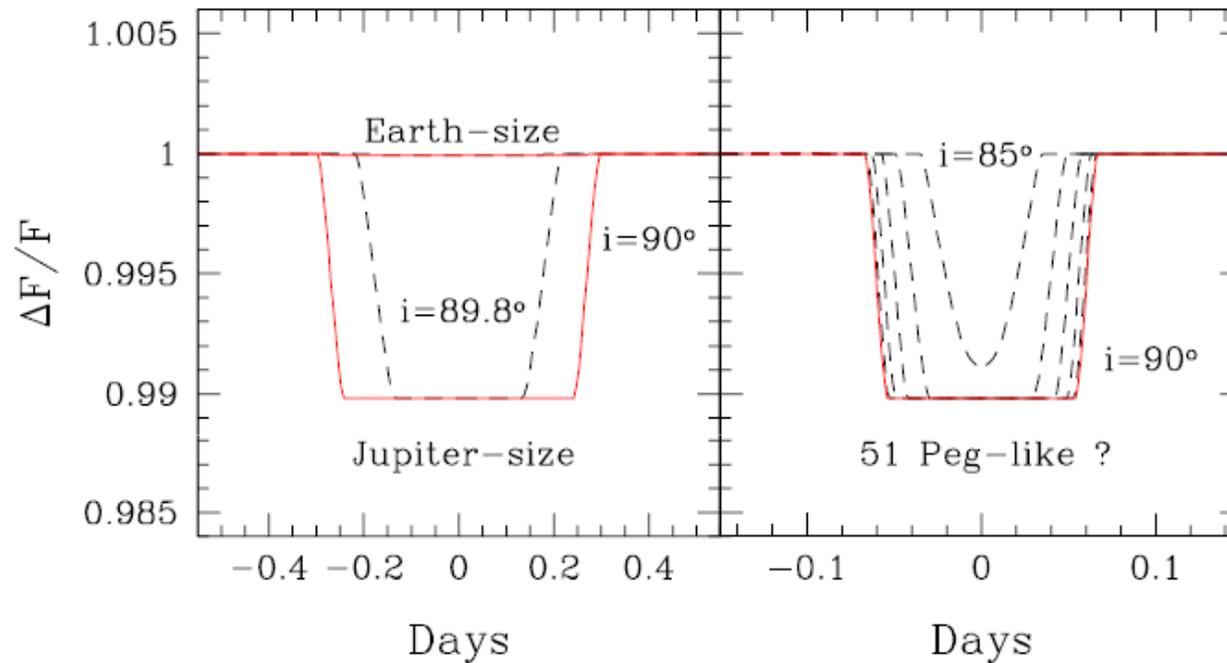
Parametri del pianeta

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° a 90° .

Si assume che la luminosità della stella sia uniforme.

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

Metodo del transito

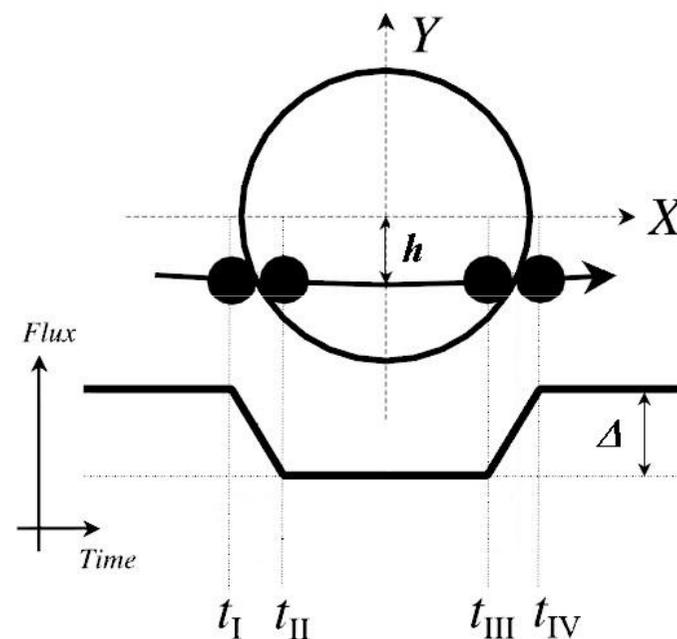
Parametri del pianeta

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.

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

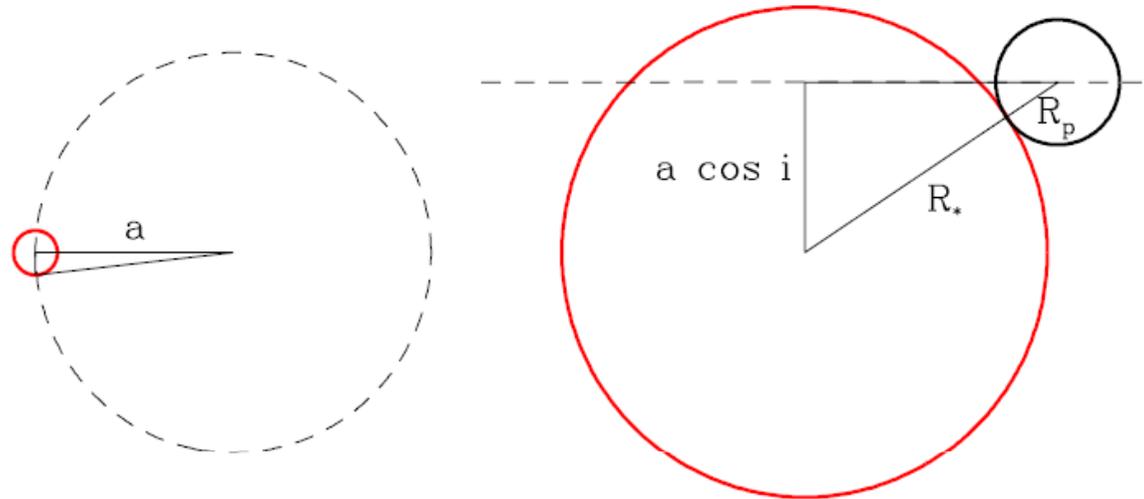


h è il **parametro di impatto**

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

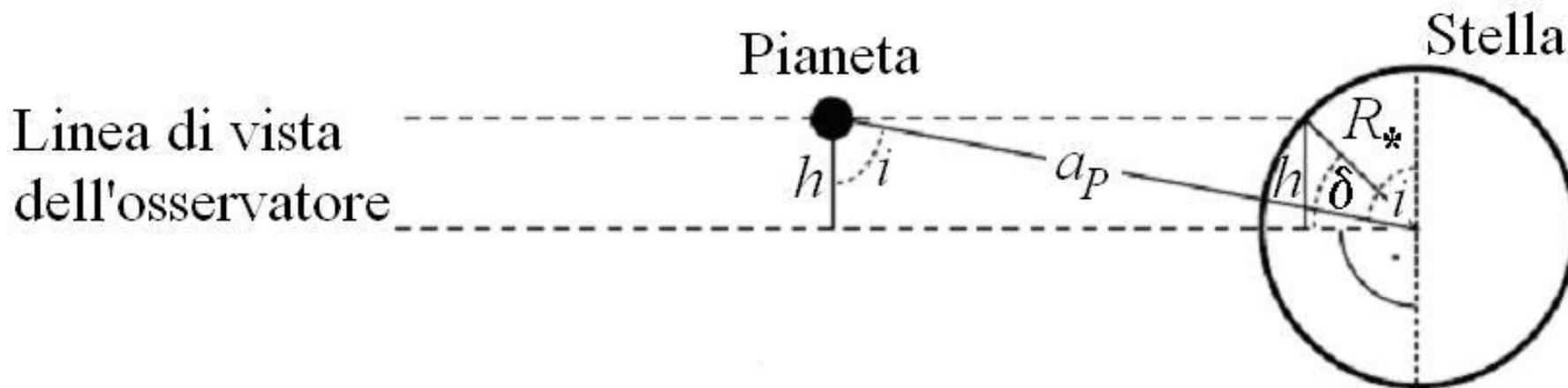
Parametri del pianeta

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 δ 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

Nota 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.

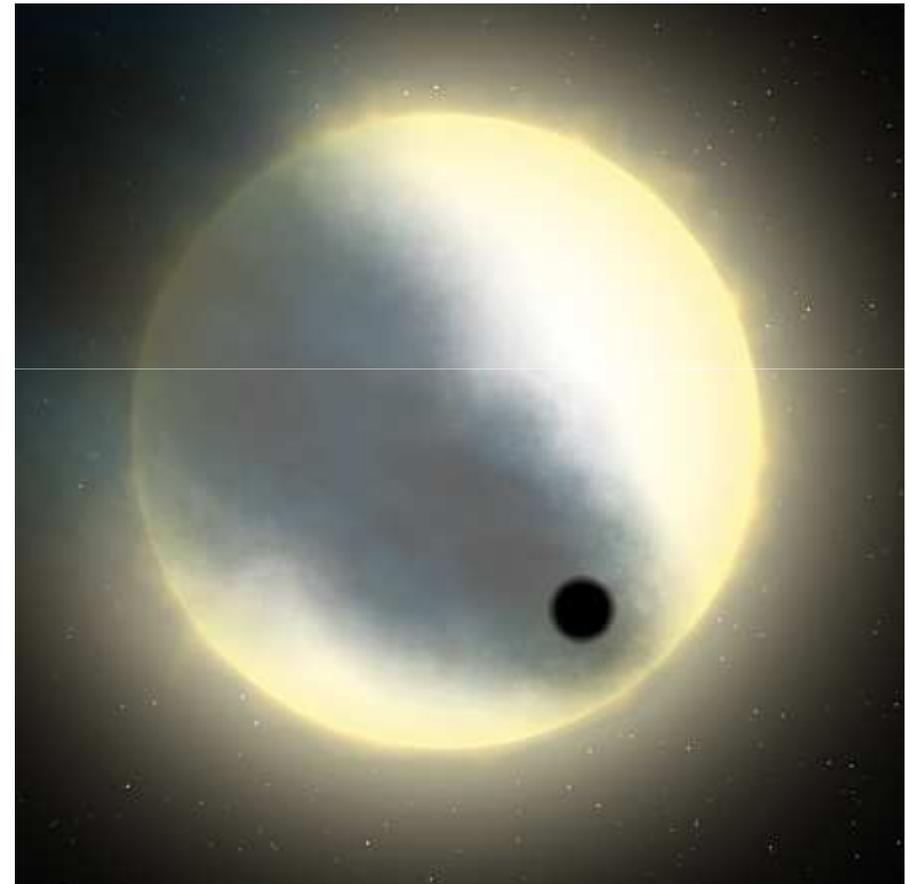
$$\cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_P}$$

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

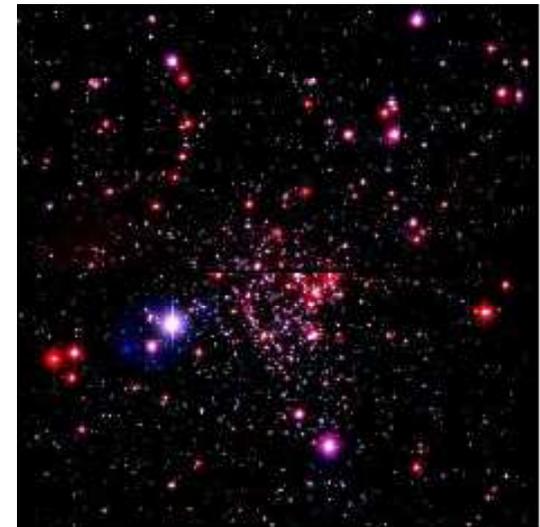
Survey for Transiting Extrasolar Planets in Stellar Systems (STEPSS)

Strumentazione: aperture: 1.3m e 2.4m

Campo di vista: 46x46 e 25x25 arcmin; 0,17 e 0,6 gradi²

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

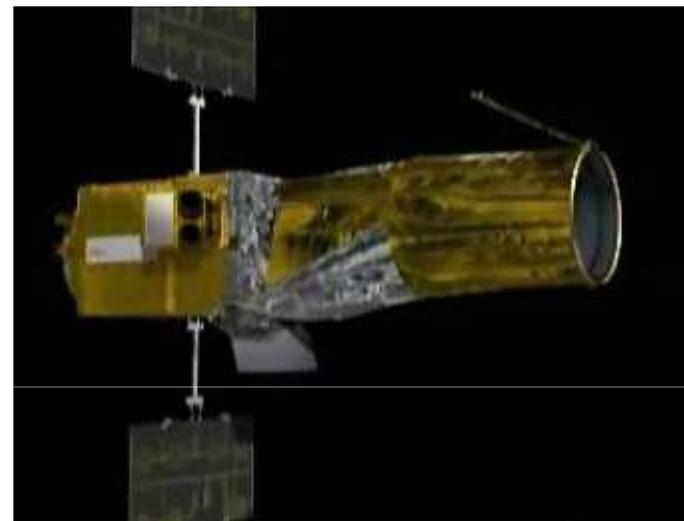
Utilizzare le misure di velocità Doppler per determinare la massa e la densità

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.

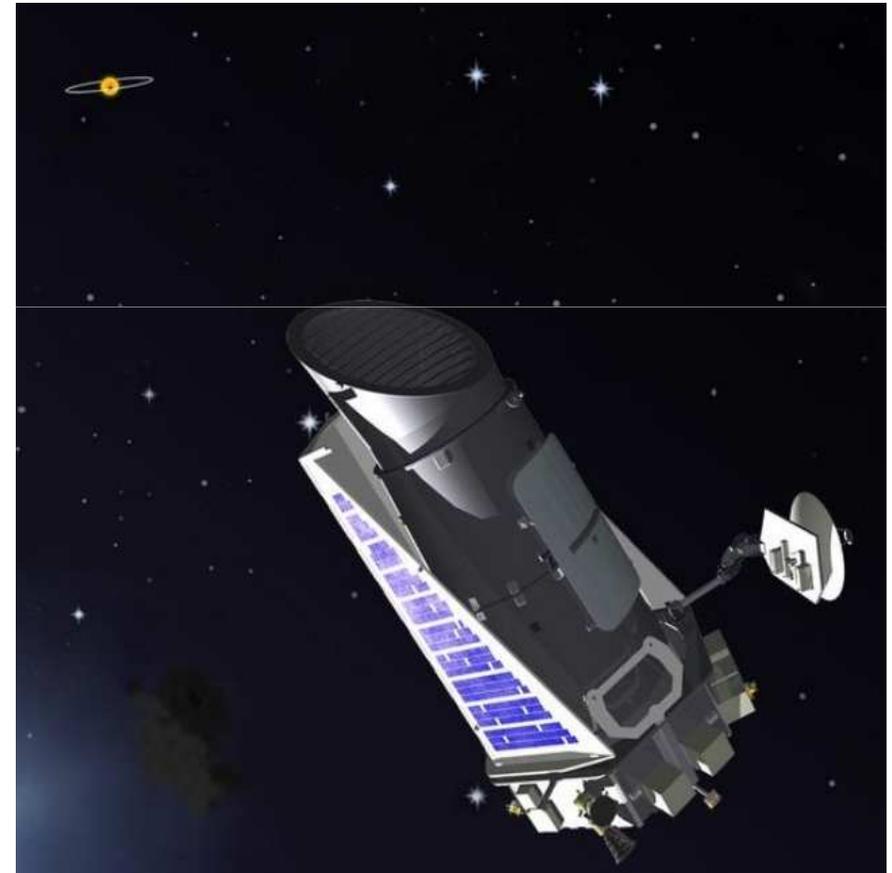
Metodo del transito

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.

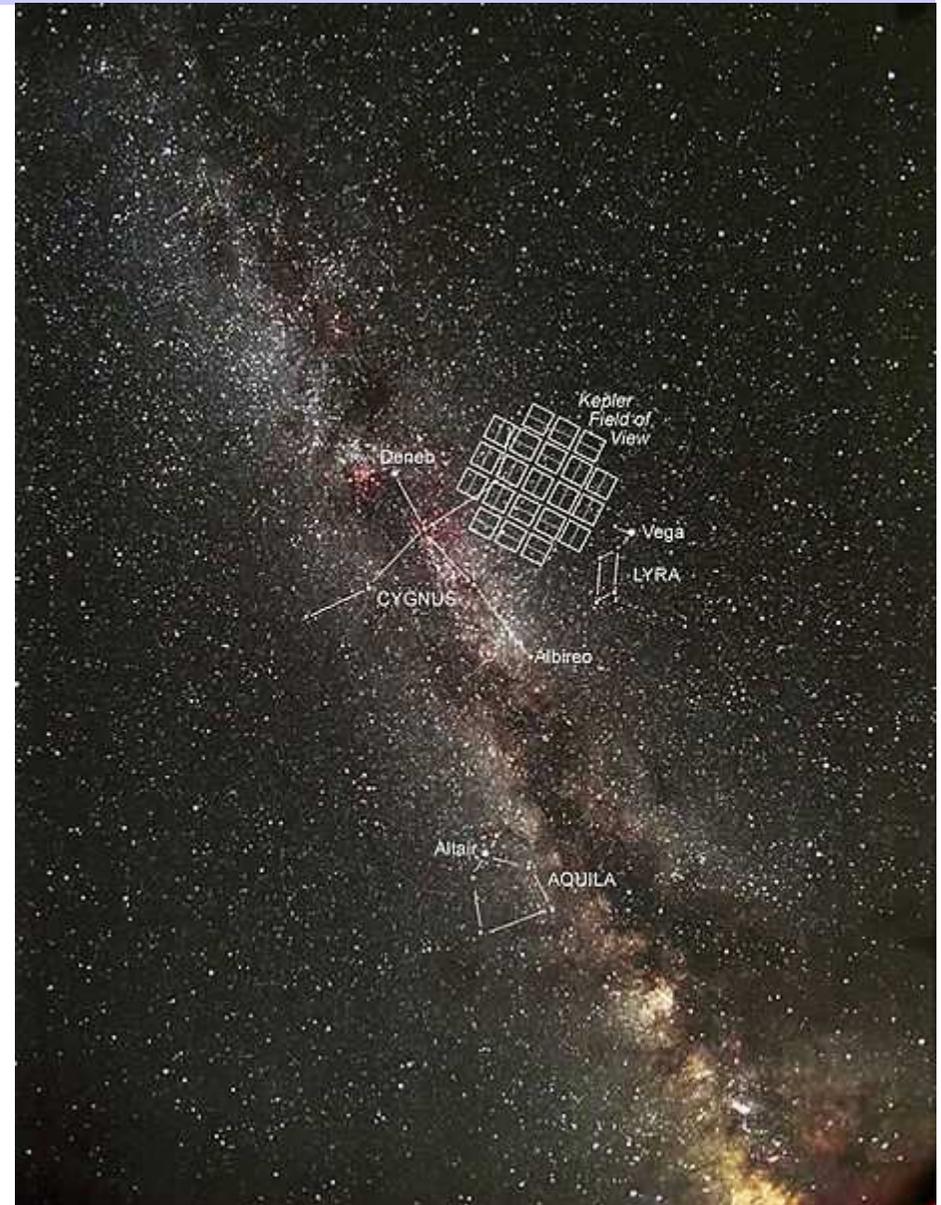


Metodo del transito

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.

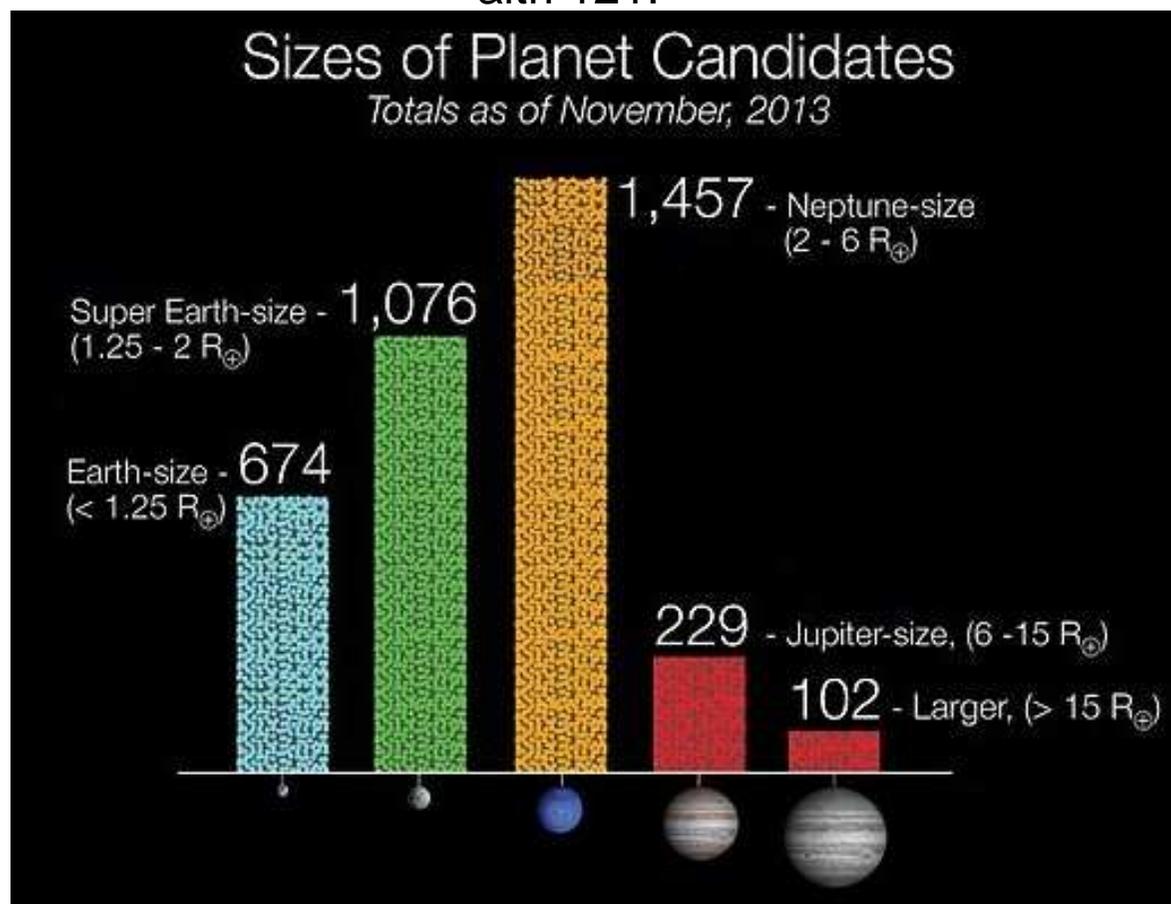


Metodo del transito

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

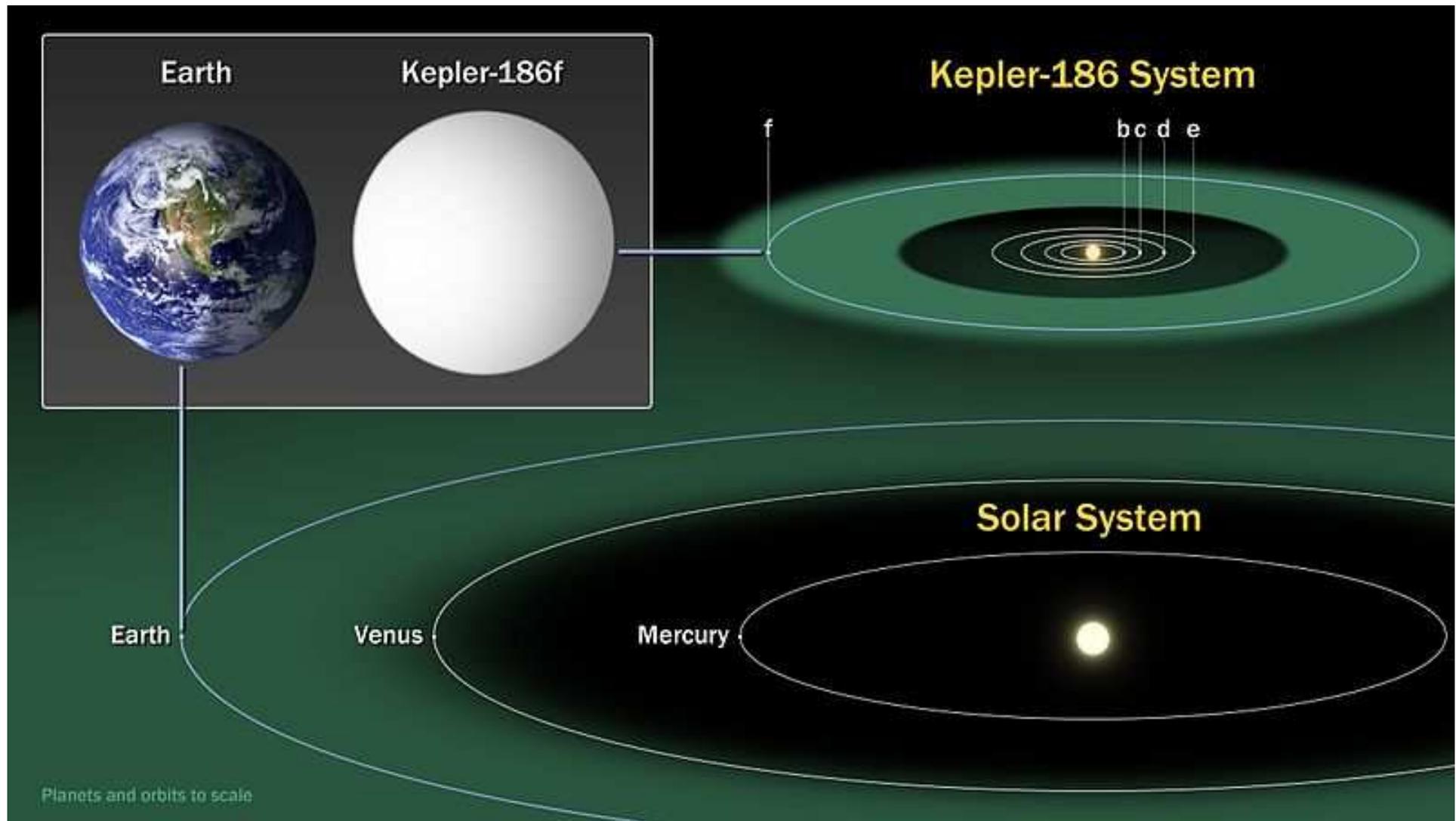
Kepler

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

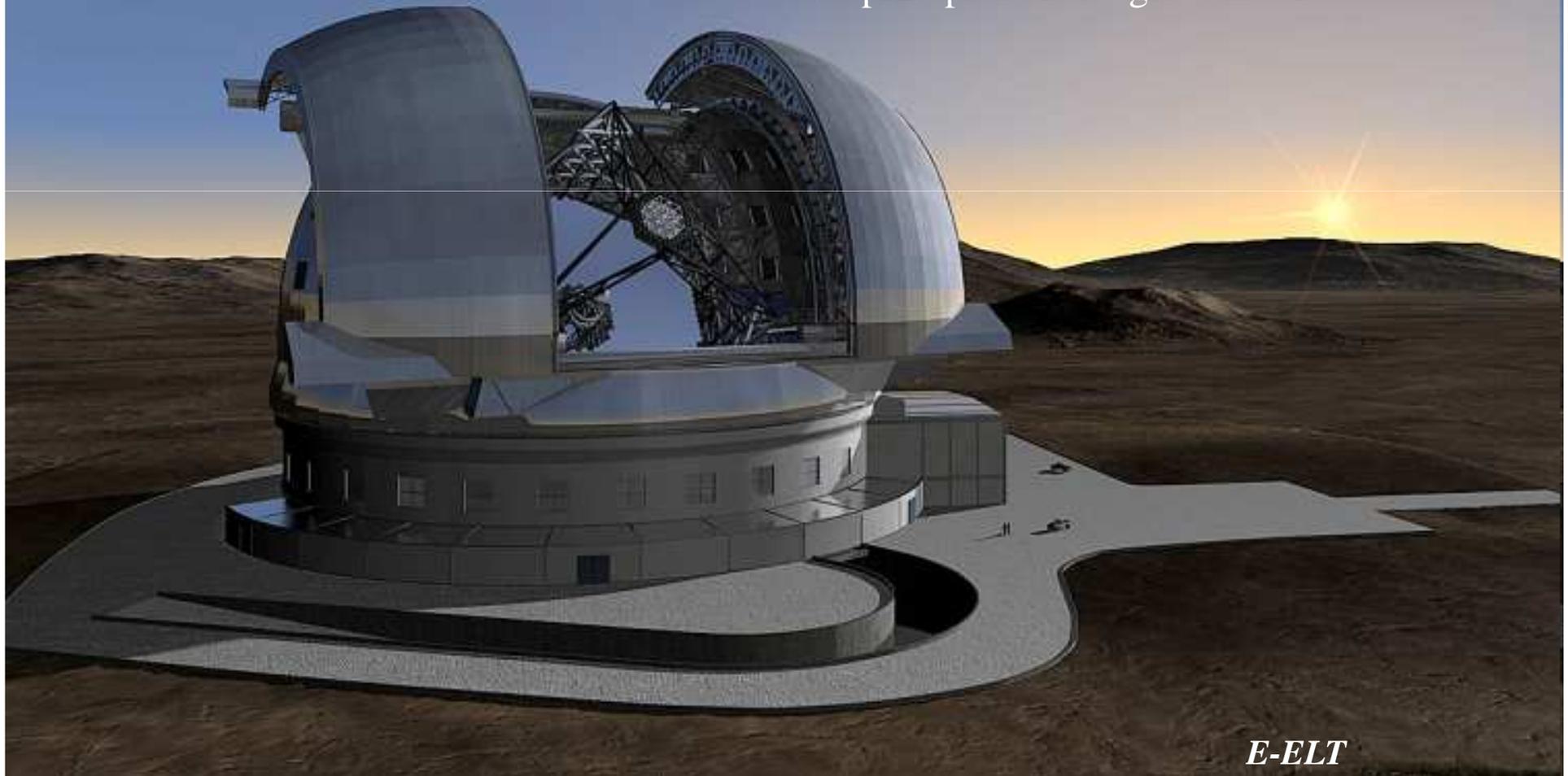


Keck Telescope

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.



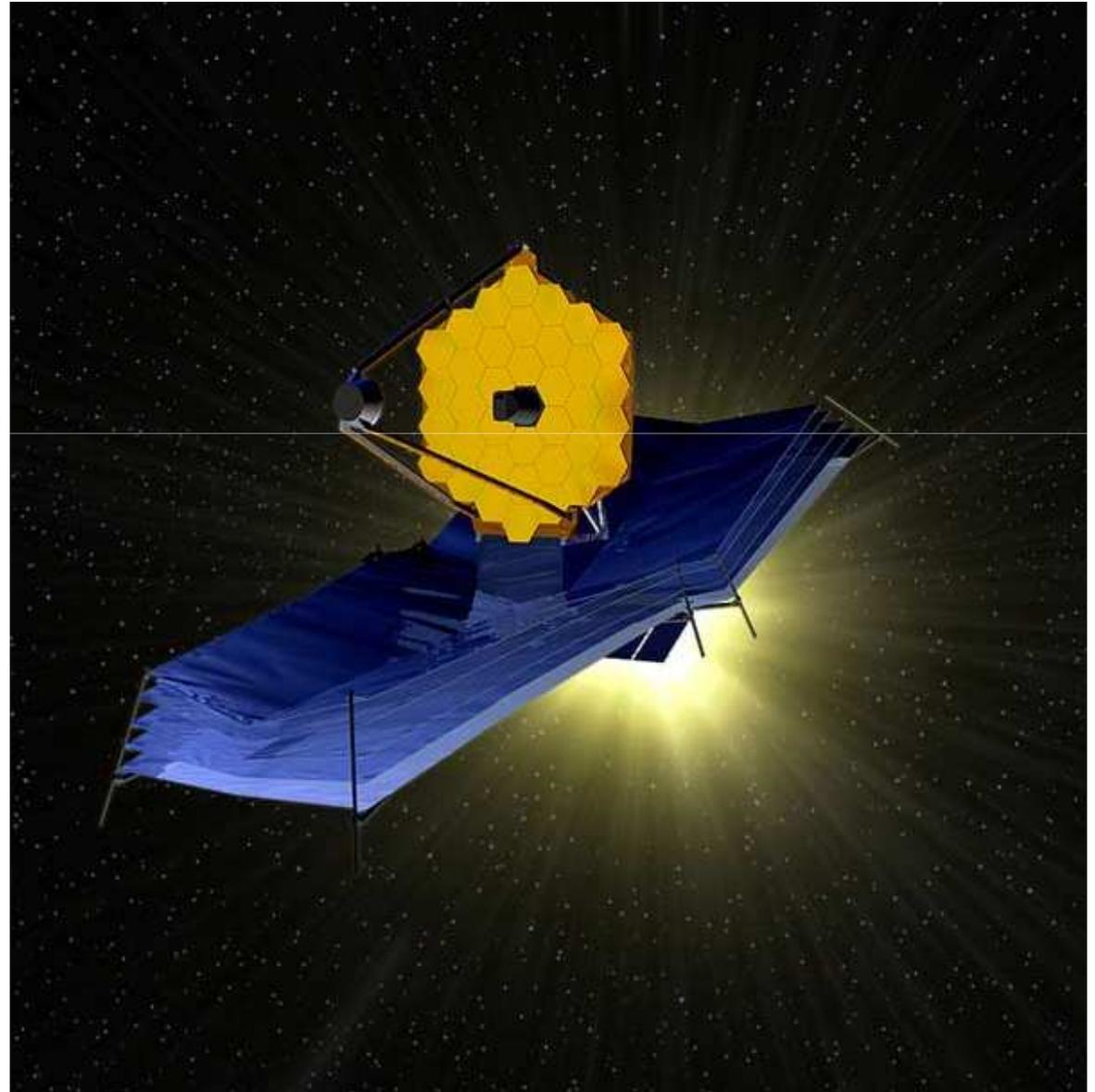
E-ELT

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.

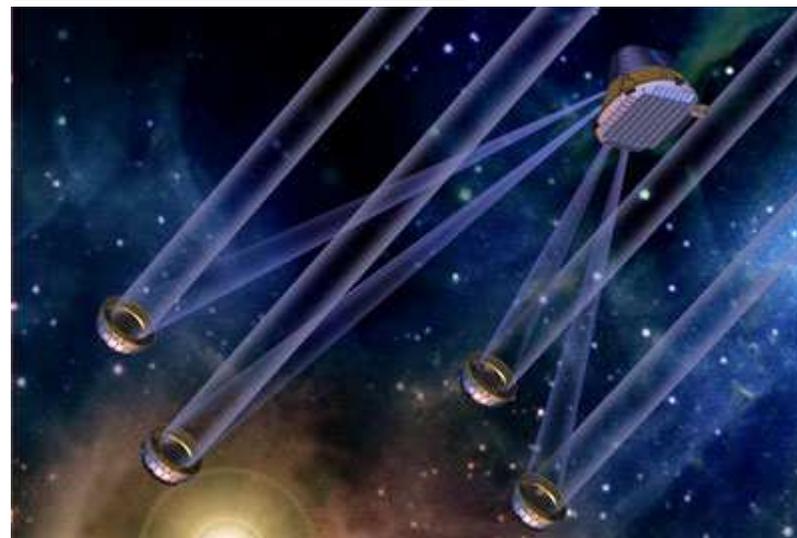
Sono stati sviluppati due progetti paralleli: Darwin dell'ESO e TPF-I della NASA.

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