



Laurea triennale in Fisica  
a.a. 2010 - 2011

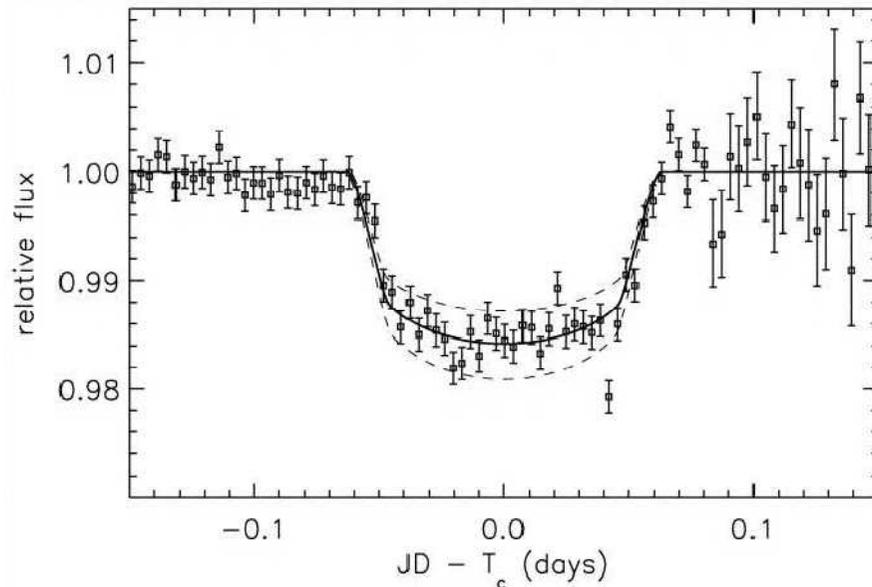
# CORSO DI ASTRONOMIA

LEZIONE 13 – 7 giugno 2011

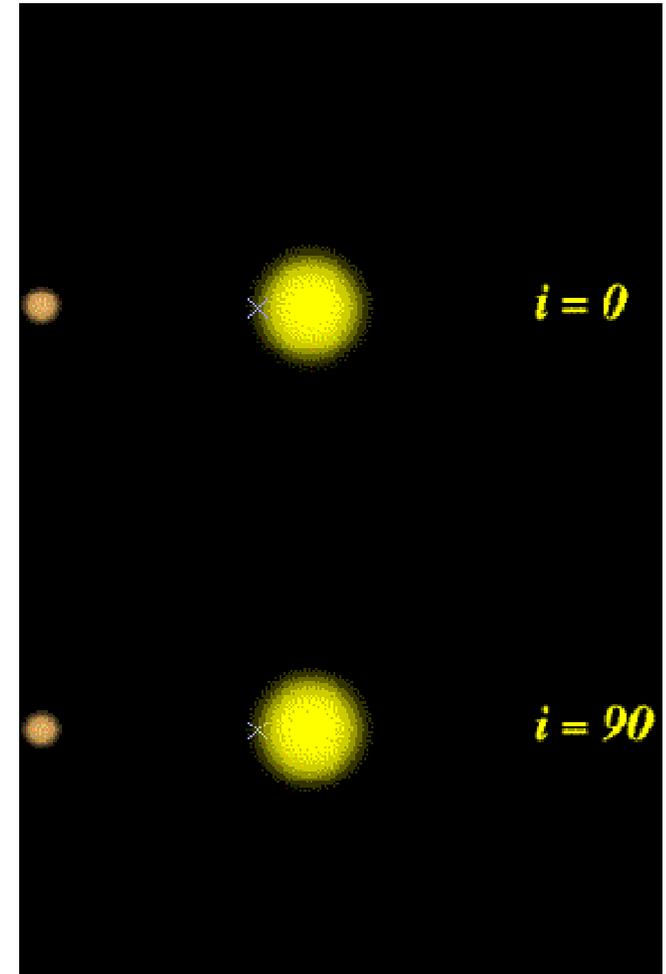
Prof. Angelo Angeletti

# Metodo del transito

Se un pianeta passa davanti alla propria 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 del transito

- 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 rilevatori 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

## Metodo del transito

- 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 di campo è 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 alla scoperta di pianeti

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

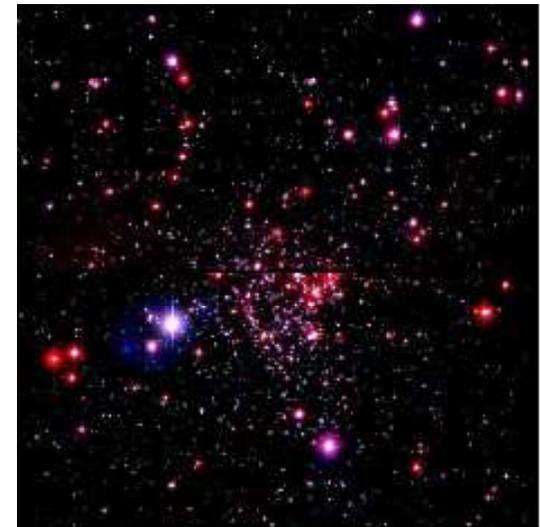
Survey for Transiting Extrasolar Planets in Stellar Systems (STEPSS)

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.

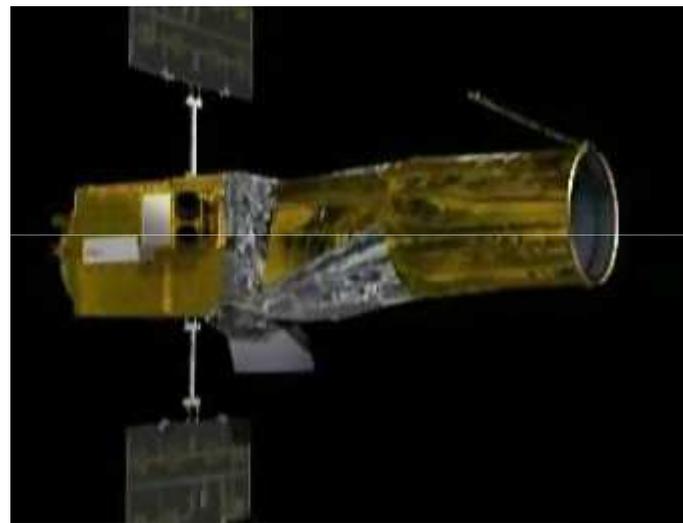
La ricerca di pianeti extrasolari, in particolare di pianeti di tipo terrestre, con il metodo dei transiti.

Questo programma ha come obiettivo rivelare periodici cali di luminosità delle stelle osservate dovuti a pianeti in transito di fronte ad esse.

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.



# Metodo del transito

## Kepler

La Missione Kepler è un programma della NASA.

È costituito da un satellite artificiale, chiamato Kepler, costituito da un fotometro e messo in un'orbita eliocentrica parzialmente sovrapposta a quella terrestre.

È in grado di cercare pianeti extrasolari della dimensione della Terra e anche più piccoli.

Può osservare la luminosità di oltre 100.000 stelle per più di quattro anni. Secondo i ricercatori potrà portare alla scoperta di molte centinaia di pianeti.

È stato lanciato da Cape Canaveral il 7 marzo 2009.

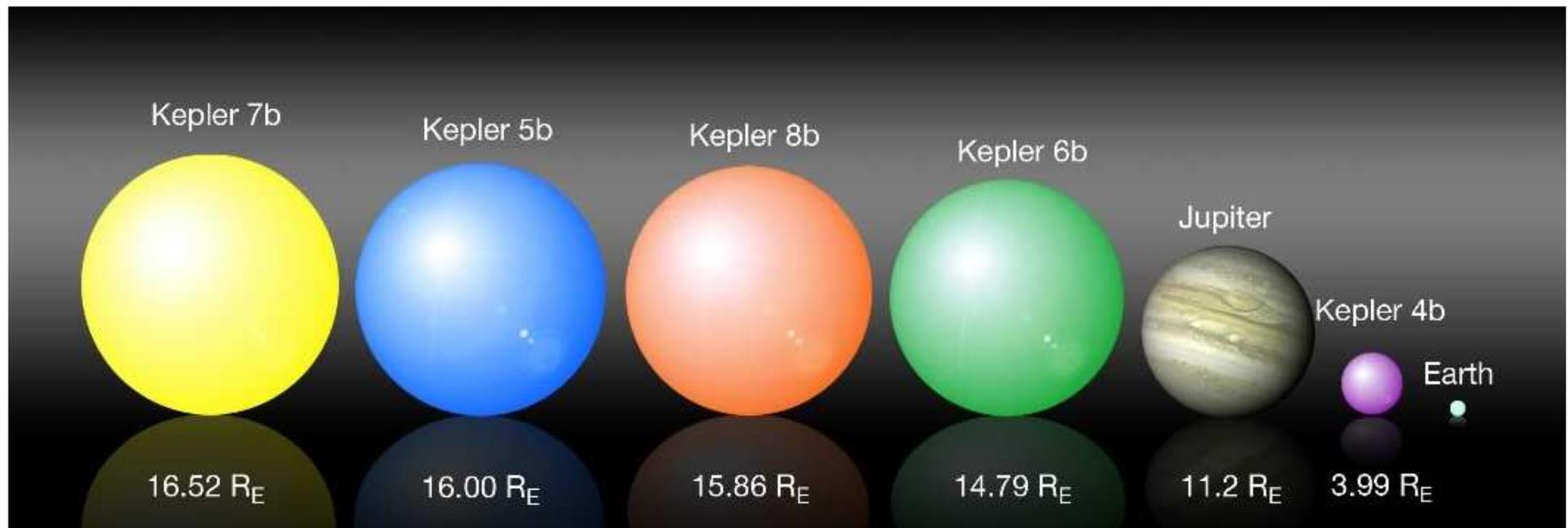


# Metodo del transito

## Kepler

Il 4 gennaio 2010 la NASA ha annunciato la scoperta di 5 esopianeti, Kepler-4b, 5b, 6b, 7b e 8b. Sono pianeti delle dimensioni che vanno da quelle di Nettuno ad addirittura più grandi di Giove.

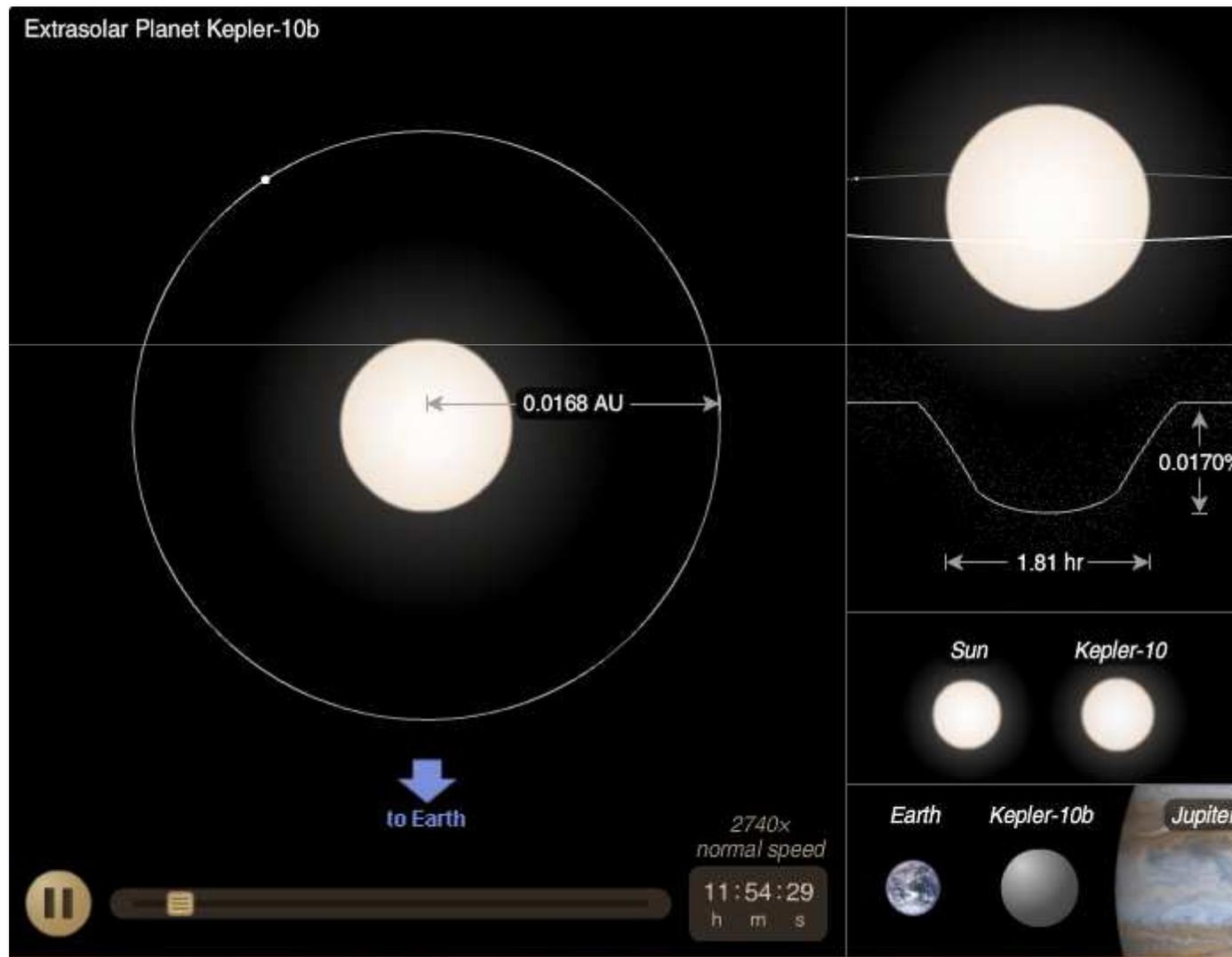
Sono caratterizzati da temperature molto elevate (dai 2200 ai 3000 gradi Fahrenheit) e le stelle attorno a cui ciascun pianeta ruota sono molto più grandi e calde del nostro Sole.



# Metodo del transito

## Kepler10

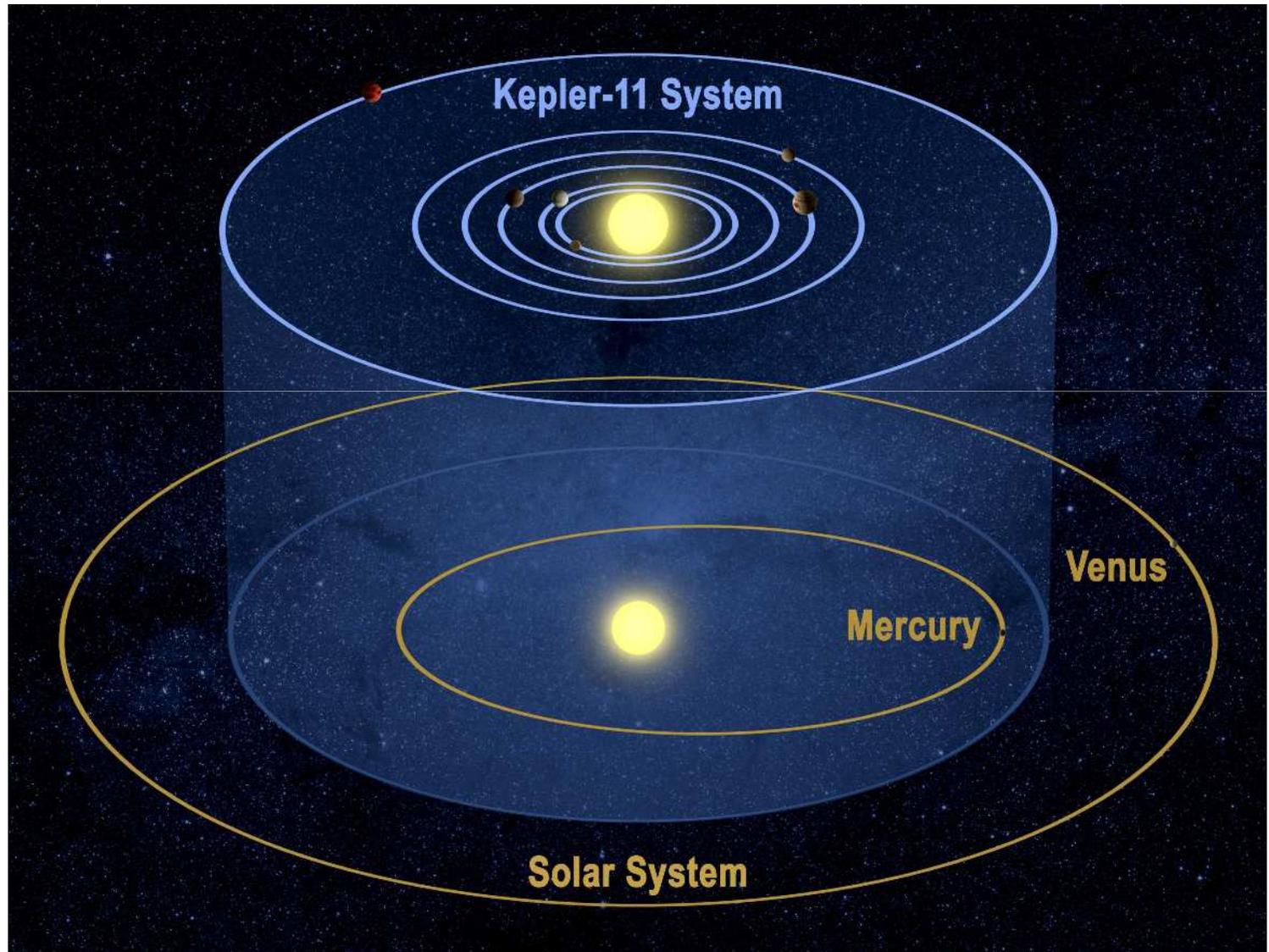
L'11 gennaio 2011 la NASA ha annunciato la scoperta del pianeta roccioso di tipo terrestre Kepler-10b, con diametro 1,4 volte quello della Terra. Orbita attorno al suo sole (molto simile al Sole e distante 560 anni luce), ad una distanza di 1/20 quella di Mercurio dal Sole, per cui è del tutto improbabile che possa ospitare acqua allo stato liquido e quindi forme di vita.



# Metodo del transito

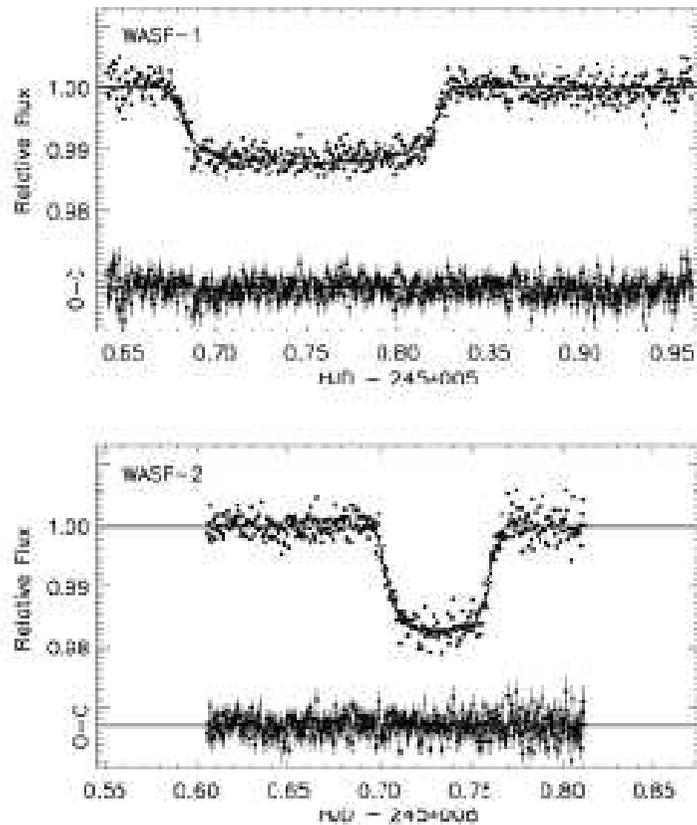
## Kepler 11

Il 2 febbraio 2011 è stata annunciata la scoperta di un intero sistema costituito da sei pianeti di roccia e gas in orbita intorno ad una stella nana gialla distante circa 2.000 anni. I cinque pianeti più interni del sistema hanno una massa che va da 2,3 a 13,5 volte quella della Terra, con un periodo di rivoluzione che varia da 10 a 47 giorni, mentre il pianeta più esterno, Kepler 11g di massa indefinita ruota intorno alla stella in 118 giorni, ad una distanza di circa 75 milioni di km, la metà della distanza Terra-Sole.

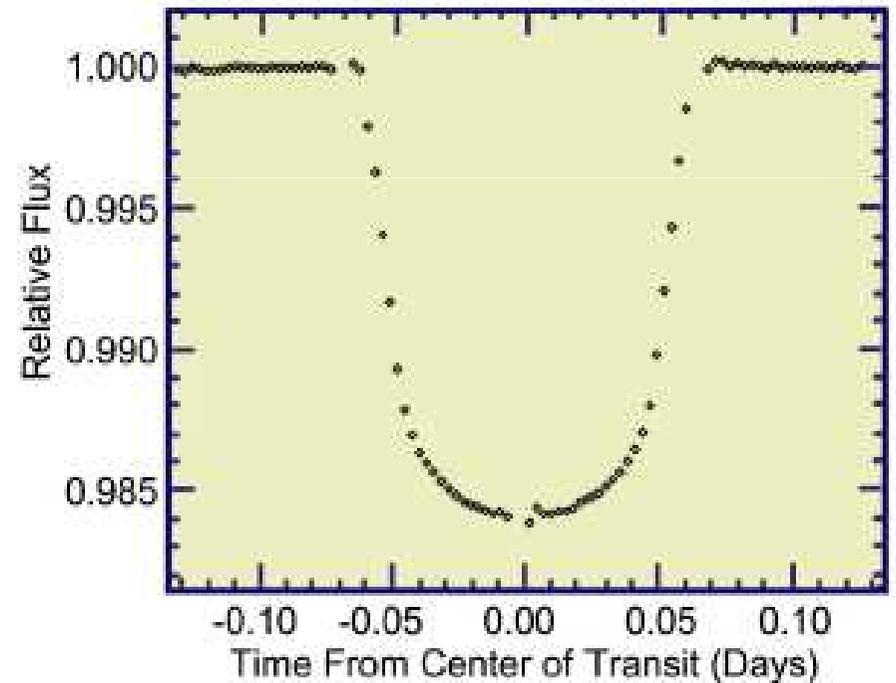


# Metodo del transito

Sistemi basati a Terra



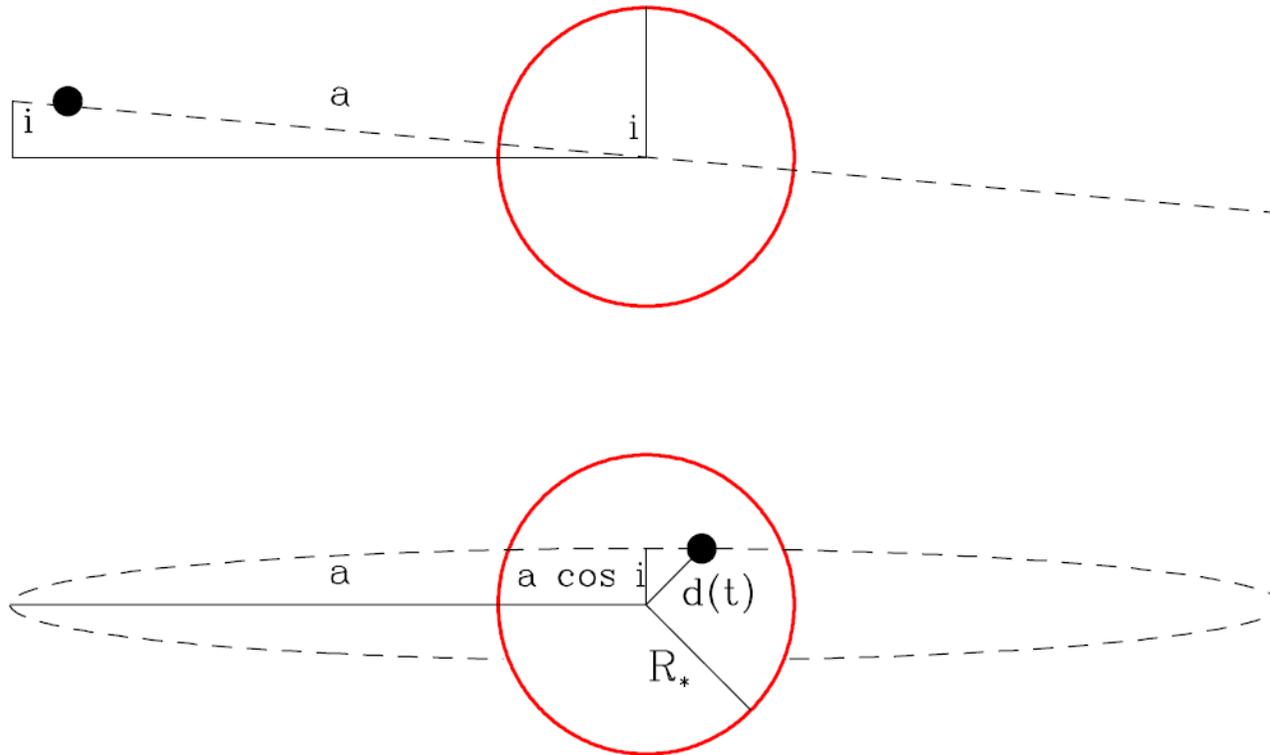
Sistemi nello spazio



A8834\_084

# 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

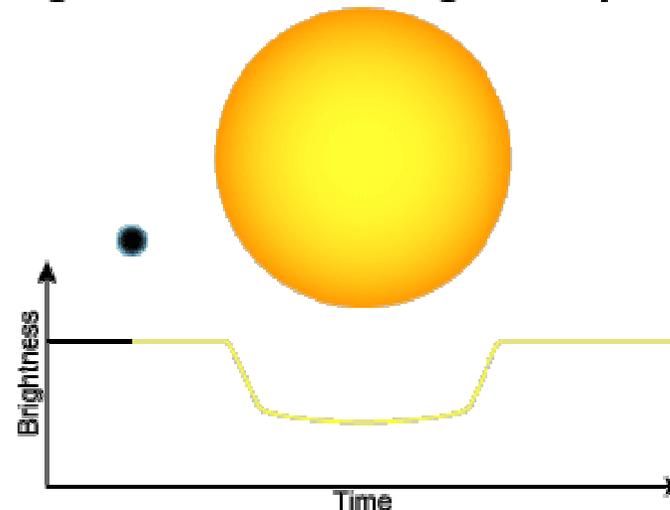
## Metodo del transito

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:

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

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.

Light Curve of a Star During Planetary Transit



# Metodo del transito

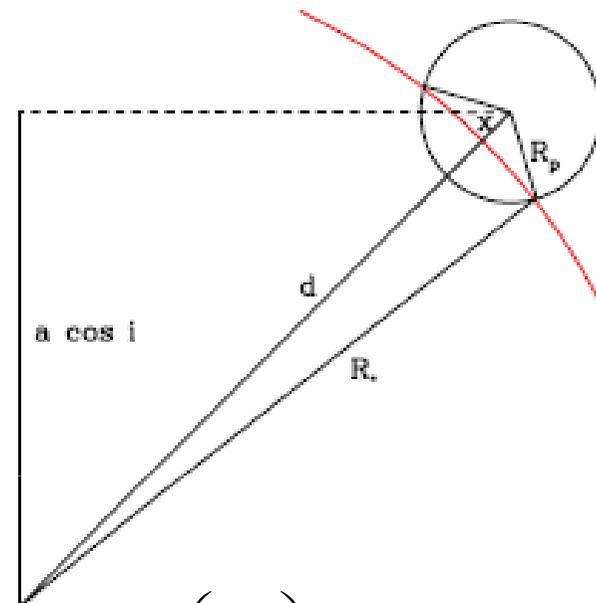
## Metodo del transito

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

## Metodo del transito

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

## Metodo del transito

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)

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

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

## Metodo del transito

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

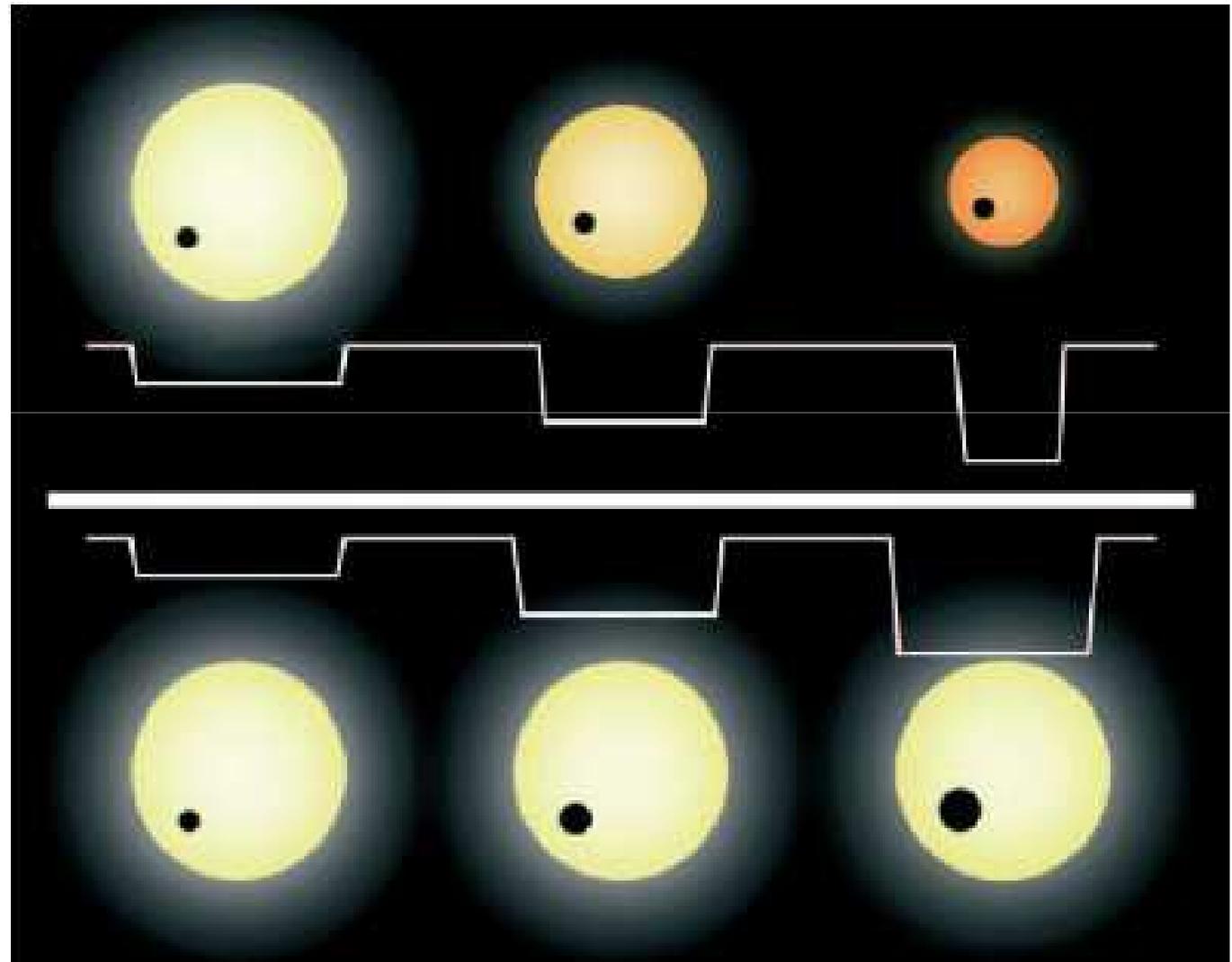
***È impossibile rilevare transiti di pianeti di taglia terrestre da Terra!***

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

# Metodo del transito

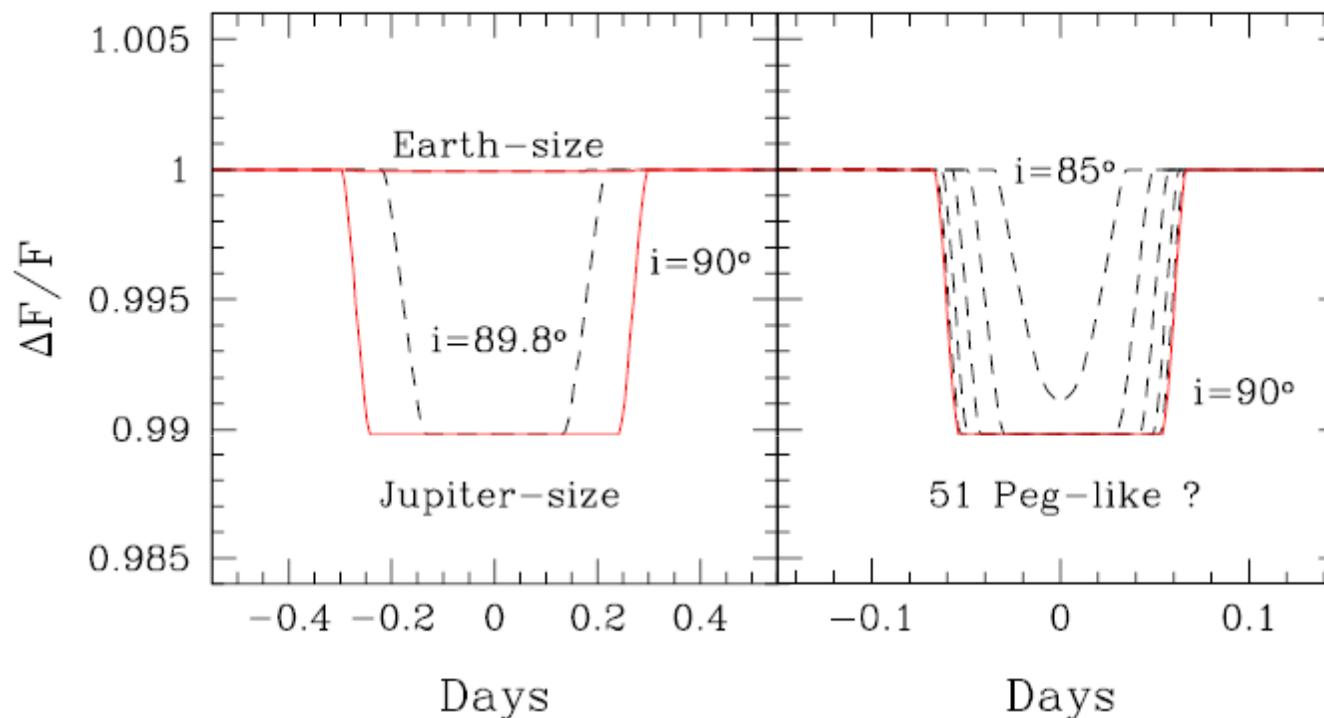
## Metodo del transito

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

## Metodo del transito



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 una stella di tipo solare ad un raggio 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.

Nota cambiamento nella scala dei tempo tra le due figure.

# Metodo del transito

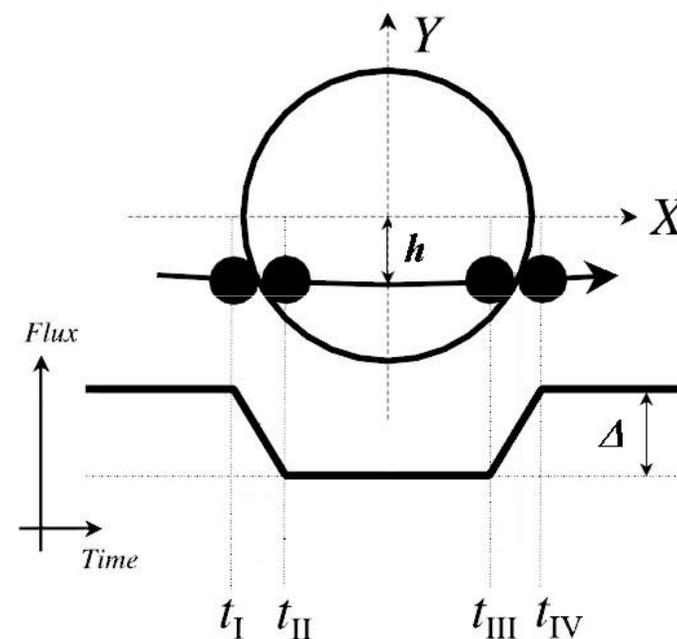
## Durata del transito

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.

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

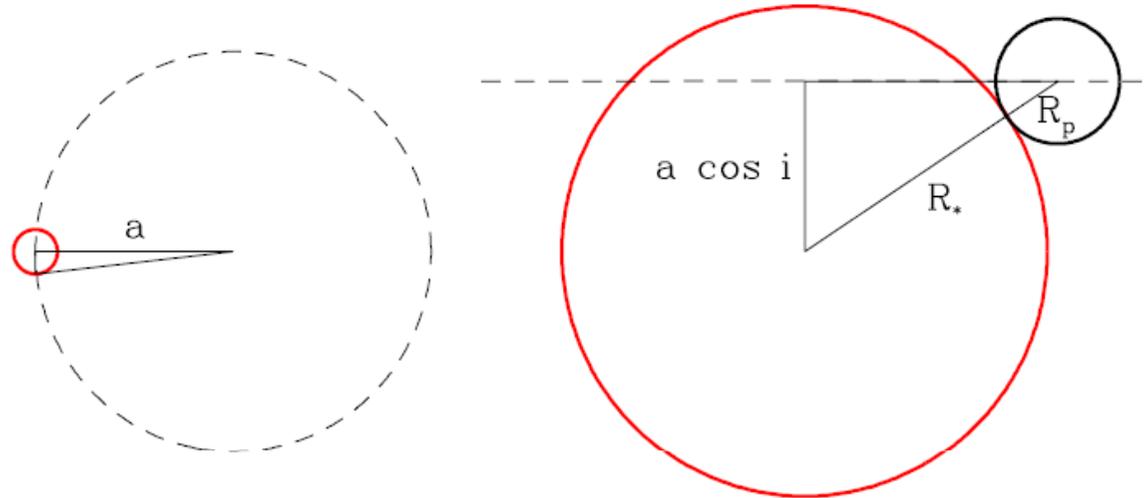


$h$  è il **parametro di impatto**

# Metodo del transito

## Durata del transito

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

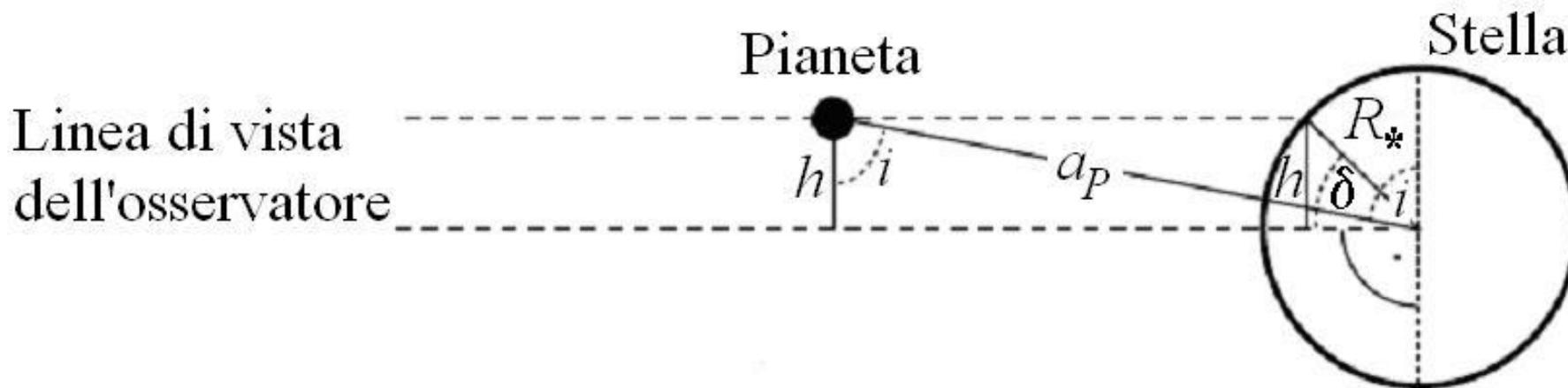
## Metodo del transito

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

## Metodo del transito

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.

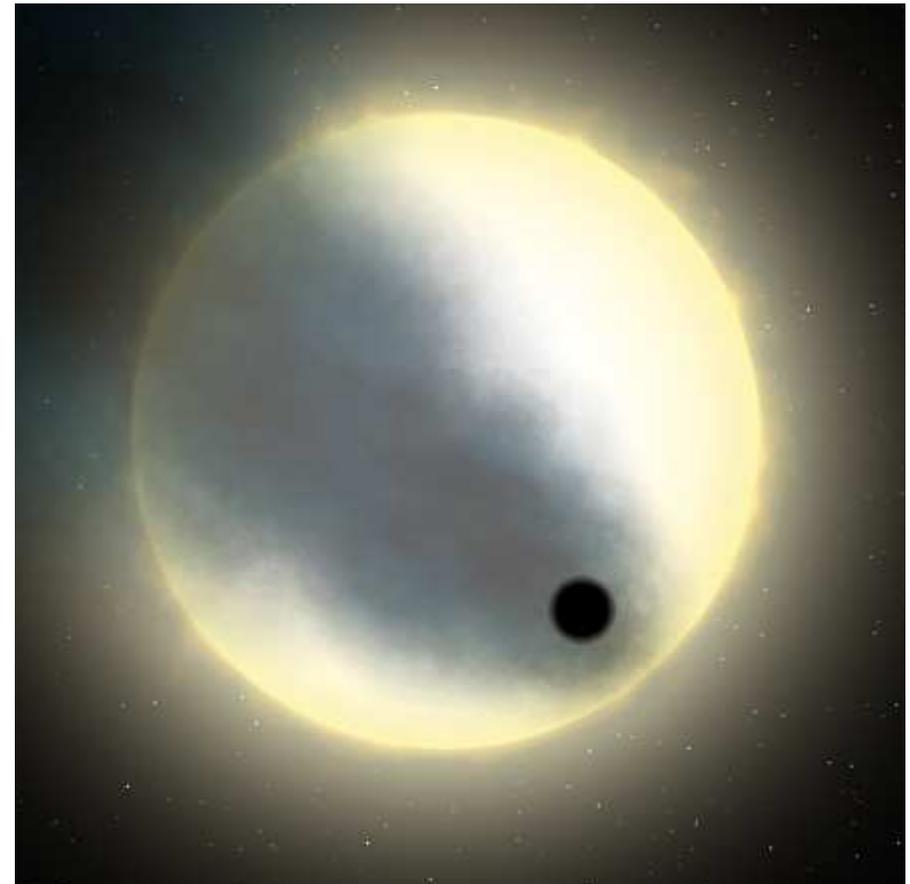
$$\cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_P}$$

# Metodo del transito

## Metodo del transito

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.*

# I risultati attuali

## Considerazioni

I risultati finora ottenuti soffrono del fatto che i metodi utilizzati mettono in evidenza principalmente pianeti giganti.

I pianeti gioviani caldi hanno reso necessaria una revisione del modello di formazione di un sistema planetario basato sulle conoscenze del Sistema Solare.

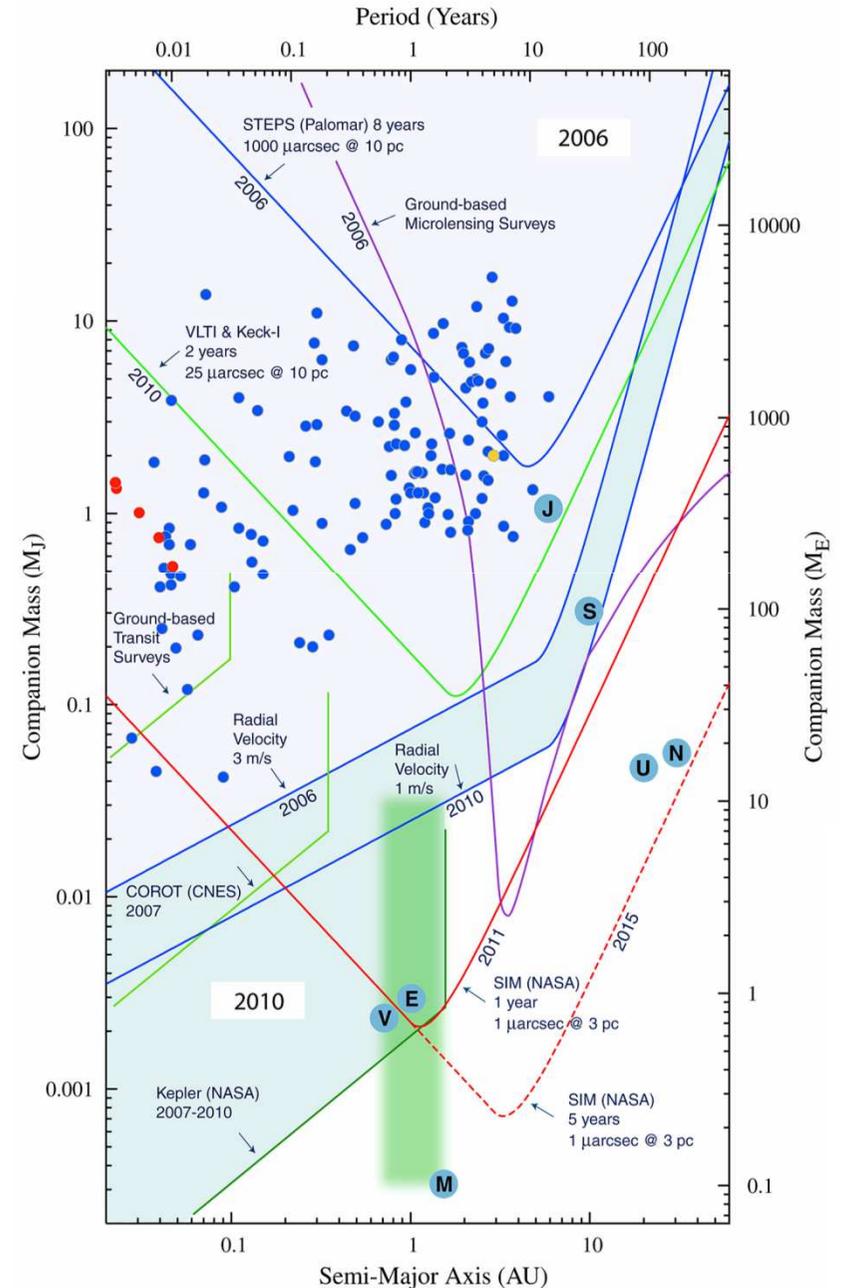
# Programmi futuri

Tutti i programmi futuri mirano ad un unico obiettivo:

*rilevare delle “terre”, ossia pianeti di taglia terrestre, posti nella zona di abitabilità di un sistema planetario.*

*L'immagine mostra i limiti delle capacità di rilevamento dei prossimi strumenti (linee colorate) – fino al 2015 –, sia terrestri che spaziali.*

*P.R. Lawson, S.C. Unwin e C.A. Beichman, 2004*



# Programmi futuri

Per l'astrometria

L'ESO ha in progetto la ricerca da Terra di pianeti giganti intorno a un centinaio di stelle; tale programma avrà inizio nel con lo strumento PRIMA installato sul grande interferometro di 120 metri VLTI (Very Large Telescope Interferometer) in Cile.



# Programmi futuri

## Per l'astrometria

Nello spazio due progetti sono nella fase finale dello studio:

SIM (Space Interferometry Mission) della NASA è un interferometro di 20 metri di base installato su una trave e composto da 2 telescopi di 40 cm di diametro. Il suo lancio è previsto per il 2005 è slittato al 2015. Potrà cercare pianeti intorno alle 1500 stelle più vicine. E' sufficientemente preciso per scoprire pianeti di qualche massa terrestre situati a meno di 15 anni luce dal Sole.

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 previsto per 2012.

# Programmi 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 futuri

Per l'osservazione diretta da Terra

L'ESO dovrebbe rendere operativo uno strumento per immagini chiamato Planet Finder su uno dei telescopi di 8 metri di diametro del Very Large Telescope installato in Cile.

Il telescopio Keck di 10 metri ha un progetto analogo.



*Very Large Telescope*

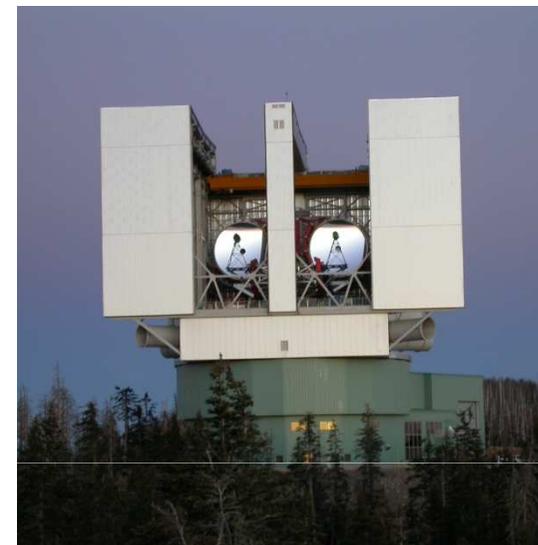


*Keck Telescope*

# Programmi futuri

Per l'osservazione diretta da Terra

Il LBT (Large Binocular Telescope) è attrezzato per la ricerca di pianeti extrasolari.



*Large Binocular Telescope*

A più 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*

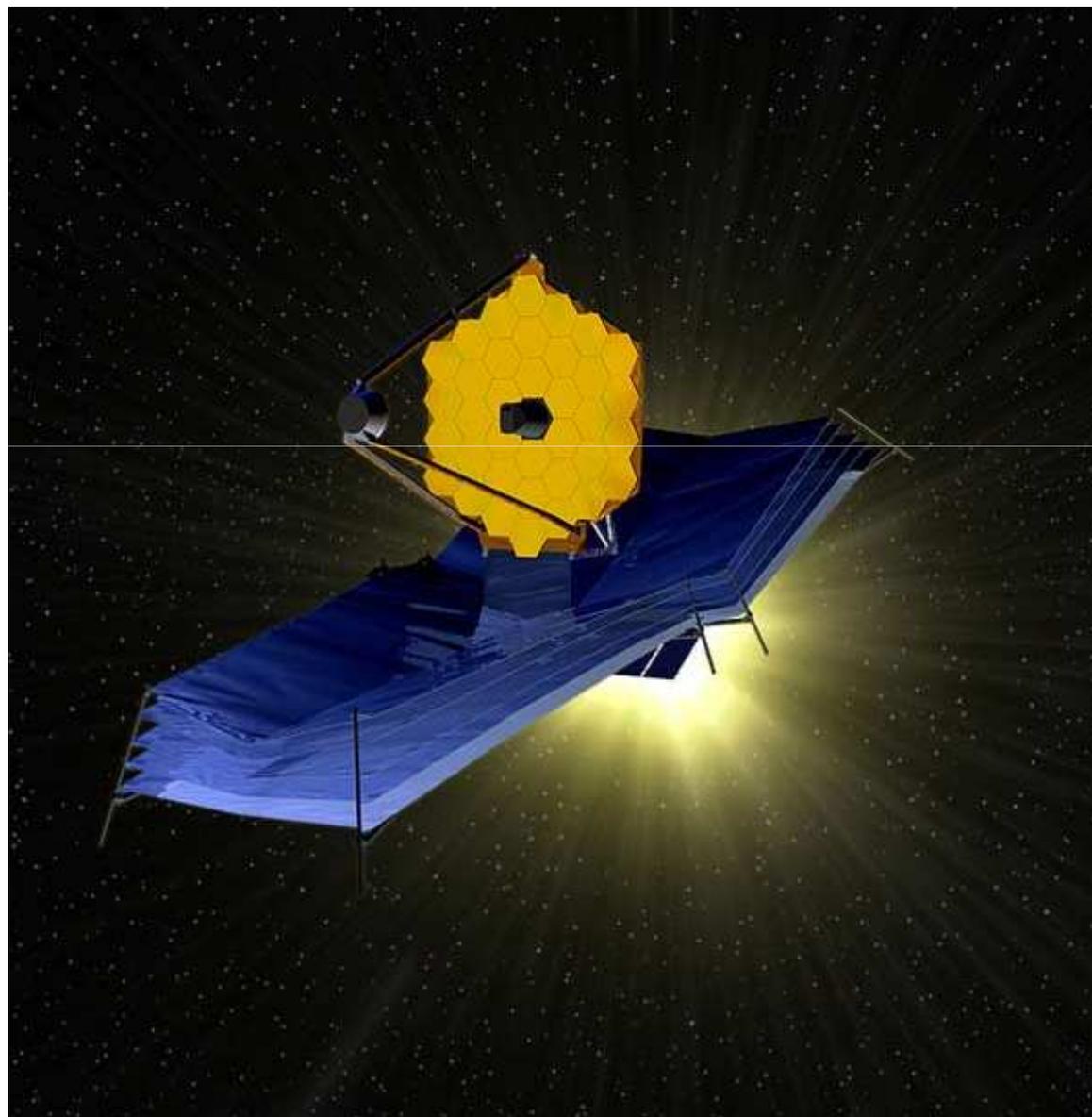
# Programmi futuri

Per l'osservazione diretta dallo spazio

Al momento è attivo solo il vecchio Hubble.

Per il 2014 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

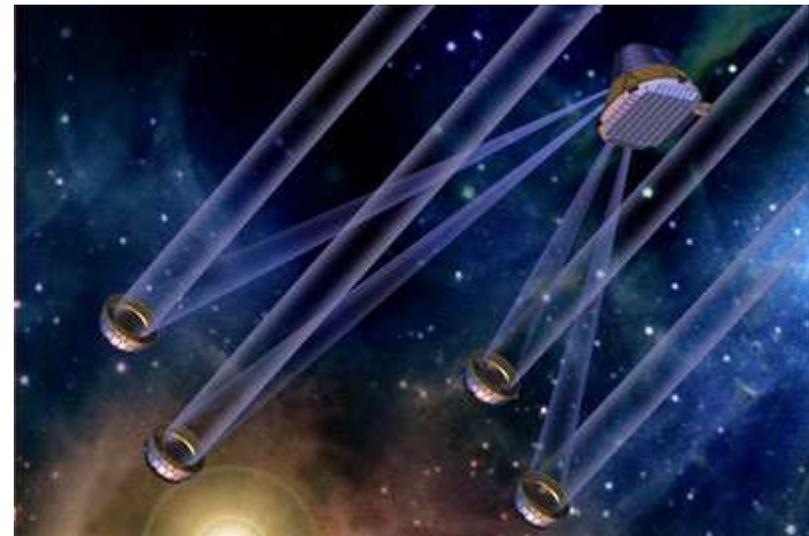
Un interferometro è composto da un numero di telescopi compreso fra 3 e 6, ognuno di 3 metri di diametro e distanti fra loro da qualche decina e qualche centinaio di metri.

Esistono due progetti paralleli: Darwin dell'ESO e TPF-I della NASA.

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



*Uno dei quattro o cinque telescopi del progetto Darwin*



*TPF-I – Terrestrial Planet Finder Interferometer*

# Programmi futuri

## Bibliografia

- C. A. Haswell: Transiting exoplanets, 2010
- H. Deeg: Photometric Detectionn of Extrasolar Planets by the Transit Method, 1998
- P. D. Sackett: Searching For Unseen Planets Via Occultation And Microlensing, 1998
- K. Mandel, E. Agol: Analytic Light curves for Planetary Transit Searches, 2002 (tradotto in italiano)
- O. Pejcha: Exoplanet transit parameters from amateur astronomers observations, 2008
- J. N. Winn: Transits and Occultations, 2010 (tradotto parzialmente in italiano)
- B. L. Gary: Exoplanet Observing For Amateurs, 2010

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

[var2.astro.cz/ETD/index.php](http://var2.astro.cz/ETD/index.php)

[brucegary.net/book\\_EOA/x.htm](http://brucegary.net/book_EOA/x.htm)

